

# ICEUBI

International  
Congress  
on Engineering  
2024



## Sustainability and Resilience: Innovation and Solutions



**27, 28 e 29 nov**

Universidade da Beira Interior  
Covilhã | Portugal

<https://iceubi2024.pt/>



ORDEM  
DOS  
ENGENHEIROS



**November 2024 | Covilhã – Portugal**

Info: [www.iceubi2024.pt](http://www.iceubi2024.pt)

**Proceedings of the International Congress on  
Engineering UBI – ICEUBI2024 - *Sustainability and  
Resilience: Innovation and Solutions***

**University da Beira Interior**

27<sup>th</sup>-29<sup>th</sup> of November 2024 | Covilhã, Portugal

**Edited by**

Marisa Dinis de Almeida, PhD and Francisco Brójo, PhD

**IMAGEM CAPA | DESIGN**

Madalena Sena, PhD

**PAGINAÇÃO**

Dra. Andreia Alves | Faculdade de Engenharia da UBI

Copyright to the authors, 2024. All Rights Reserved.

No reproduction, copy or transmission are allowed without written permission from the individual authors.

Abstracts, and Full Papers were read and selected by Review Committee of the ICEUBI2024.

All manuscripts went through a double peer review process to be presented at the Congress.

Further copies of these proceedings can be consulted at: [www.iceubi2024.pt](http://www.iceubi2024.pt)

DOI: <https://doi.org/10.25768/9239-05-0>

ISBN: 978-989-9239-05-0

SUPPORT: ELECTRONIC | FORMAT: PDF

EDITOR: UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR – FACULDADE DE ENGENHARIA

PUBLISHER: UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR – FACULDADE DE ENGENHARIA

CALÇADA DA FONTE DO LAMEIRO, 6200-358 COVILHÃ, PORTUGAL

# ICEUBI2024

*“Sustainability and Resilience: Innovation and Solutions”*



ORDEM  
DOS  
ENGENHEIRO



## **COMISSÃO ORGANIZADORA**

Prof<sup>a</sup>. Doutora Marisa Dinis de Almeida  
Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo  
Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria do Rosário Alves Calado  
Prof. Doutor Helder Joaquim Dinis Correia  
Prof.<sup>a</sup> Doutora Tânia Daniela Miranda Lima  
Prof. Doutor Miguel Ângelo Rodrigues Silvestre  
Prof. Doutor Pedro Vieira Gamboa  
Prof. Doutor Luís José Andrade Pais  
Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria de Fátima Neto  
Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria Madalena Rocha Pereira  
Prof<sup>a</sup>. Doutora Teresa Raquel Aurélio da Silva Nunes Barata  
Prof. Doutor João Carlos Raposo Neves  
Prof. Doutor Rui João Morais de Almeida Cardoso

## **SECRETARIADO E APOIO TÉCNICO:**

Dra. Andreia Alves  
Doutor Hugo Pinto  
Dr. Rui Costa  
Doutora Madalena Sena

## **COMISSÃO CIENTÍFICA**

**Afzal Suleman**, University of Victoria, Canada  
**António Alberto**, Universidade de Coimbra, Portugal  
**António João Marques Cardoso**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal  
**Bruno Samways dos Santos**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil  
**Carlos Xisto**, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia  
**Eber Huanca Cayo**, Universidad Católica San Pablo, Peru  
**Glauber Cruz**, Universidade Federal do Maranhão, Brasil  
**Hugo Pinto**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal  
**João Manuel Milheiro Caldas Paiva Monteiro**, Universidade da Beira Interior, Covilhã  
**Jorge Marum**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal  
**Jorge Reis Silva**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal  
**Manuel José dos Santos Silva**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

**Manuela Cristina Paulo Carvalho Almeida**, Universidade de Lisboa  
**Nuno José Ramos Belino**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal  
**Pedro Leão Neto**, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Portugal  
**Rafaela Cardoso**, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal  
**Rita Ochoa**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal  
**Roshan Paul**, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Germany  
**Rui Alberto Lopes Miguel**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal  
**Roberto Goycoolea Prado**, Universidad de Alcalá, Madrid  
**Sílvio José Pinto Simões Mariano**, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal  
**Willians Ribeiro Mendes**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Brasil

### **COMISSÃO DE REVISORES**

Abel João Padrão Gomes  
Alexandre Miranda  
Amine Benmoussa  
António Albuquerque  
António Eduardo Vitória do Espírito Santo  
Bertha Santos  
Bruno Jorge Ferreira Ribeiro  
Clemente Pinto  
Dario Lopes  
Davide Sérgio Baptista da Fonseca  
Eliane Brito  
Farid Dolati  
Fateme Bagherighajari  
Francisco Brójo  
Glauber Cruz  
Hugo Pinto  
Isabel Falorca  
João Carlos Raposo Neves  
João Castro Gomes  
João Monteiro  
João Morgado  
João Pedro Nunes Pereira  
João Pires da Fonseca

Jorge Gonçalves  
Jorge Gregório  
Jorge Silva  
José Álvaro Nunes Pombo  
Kateryna Oleksandrivna Shvydyuk  
Kouamana Bousson  
Luís Ferreira Gomes  
Luís Pais  
Luís Pires  
Maria Emília Baltazar  
Marisa Dinis de Almeida  
Mehdi Habibnia Rami  
Miguel Nepomuceno  
Miguel Silvestre  
Mohammad Reza Pendar  
Mohammadmahdi Abdollahzadehsangroudi  
Odelma Santana D'Alva Teixeira  
Pedro Albuquerque  
Pedro Dinis Gaspar  
Pedro Gabriel Almeida  
Pedro Gamboa  
Pedro Miguel de Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar  
Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva  
Rui João Morais de Almeida Cardoso  
Rui Pedro Gouveia Mendes  
Sílvio Miguel Rodrigues Cândido

# ÍNDICE

PREFACE	8
SPONSORS	10
SESSION ICEUBI2024	12
<b>SESSION AEROSPACE ENGINEERING</b>	13
FROM THE G-LOC RISK TO A PLANNING SYSTEM OF AEROBATIC FLIGHTS	14
LOW SPEED AIRFOIL OPTIMIZATION	26
APPLICATION OF EVTOL AIRCRAFT IN ADVANCED AIR MOBILITY: VERTIPOINT IN HUMBERTO DELGADO AIRPORT	41
ENHANCING SMART CITY CAPABILITIES WITH THE INTEGRATION OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS: THE CASE OF PORTO	56
THE ECONOMIC IMPACT OF AN AIRPORT ON AN INSULAR REGION	71
A NOVEL CONCEPT FOR AIRFOIL MORPHING WITH A COMPOSITE MATERIAL SKIN	82
ANÁLISE DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO LEO / MEO PARA OPTIMIZAR A TRANSMISSÃO DE DADOS NA AVIAÇÃO	97
MAXIMIZING UAV RANGE THROUGH WING AEROSTRUCTURAL OPTIMIZATION: A STUDY ON CHORD, SHAPE, SPAN AND COMPOSITE MATERIAL PROPERTIES	112
ENHANCING AIRPORT ADAPTABILITY TO SUSTAINABLE AIRCRAFT PROPULSION METHODS	127
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MOTORES JUNKERS 2-TEMPOS	142
VARIABLE-PITCH PROPELLERS: ELEVATING ADVANCED AIR MOBILITY	157
<b>SESSION CIVIL ENGINEERING</b>	172
INFRAESTRUTURA HÚMIDA SUSTENTÁVEL RETARDANTE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS	173
INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS COM RECURSO A GEOMÁTICA E VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)	184
POST-OCCUPANCY EVALUATION OF FIVE CASE STUDIES ON THERMAL COMFORT: EVALUATION AND ANALYSIS OF BEDROOM VS. LIVING ROOM	201
REABILITAÇÃO NÃO ESTRUTURAL DE EDIFÍCIO HABITACIONAL: CASO DE ESTUDO NO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU - PORTUGAL	224



AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA DE QUEIMA DE BIOMASSA NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS	239
DETERMINATION OF AN ANALYTICAL EXPRESSION FOR CHART RT (WMAPT) USING EVOLUTIONARY POLYNOMIAL REGRESSION	254
SOIL STABILIZATION WITH SISAL FIBRES	267
SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR AREIAS DE LEITO FLUIDIZADO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS: UMA ABORDAGEM PARA SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	276
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS COM RCD REFORÇADAS COM FIBRA DE SISAL	290
BUILDING REHABILITATION AS A DRIVER FOR SUSTAINABLE RURAL DEVELOPMENT: POLICIES, STRATEGIES AND INTERACTIONS	304
GESTÃO DA MANUTENÇÃO COM SUPORTE NA VISUALIZAÇÃO DINÂMICA DE DADOS	316
INFRAESTRUTURA HÚMIDA SUSTENTÁVEL RETARDANTE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS	326
INTEGRATION OF BIM-VR-FM TOWARDS THE APPLICATION OF INSPECTION PROTOCOLS AND ENERGY-EFFICIENCY MEASURES	337
BAMBU COMO ELEMENTO DE CONTRAVENTAMENTO DE PÓRTICOS EM EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS METÁLICOS	352
GLOBAL STABILITY IN GABION WALLS	368
A IMPLEMENTAÇÃO DO SIG NO MUNICÍPIO DE ÍLHAVO REFORMULAÇÃO E REVITALIZAÇÃO PARA UMA NOVA ESTRUTURA	383
ANALYSIS OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF RAIL AND ROAD FREIGHT TRANSPORT: A CASE STUDY IN PORTUGAL	398
VARIAÇÃO DO VOLUME ÚTIL EM UMA BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ESGOTO FECAL	406
ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM CIMENTO DE UMA ESTRADA DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO	420
REVIEW ON ROAD PAVEMENT DISTRESS DETECTION WITH YOLO	434
ANÁLISE DE REDES APLICADA AO APOIO DA POPULAÇÃO IDOSA COM RECURSO SIG	448
<b>COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING</b>	465
DESAFIOS DA AVALIAÇÃO ONLINE NO ENSINO SUPERIOR	466

MONITORIZAÇÃO DA DISPONIBILIZAÇÃO DE COBERTURA CELULAR UBÍQUA EM AMBIENTE HOSPITALAR: MEDIÇÕES DO ESPETRO RADIOELÉTRICO NO CHUCB	481
DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS EM EDIFÍCIOS	497
UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE APRENDIZAGEM AUTOMÁTICA PARA TIPIFICAÇÃO DO RISCO DE ABANDONO ESCOLAR	513
CONTRIBUIÇÃO DOS JOGOS ELETRÓNICOS PARA O ENVELHECIMENTO ATIVO	527
<b>ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING</b>	540
DESIGN OPTIMIZATION OF THE ROTOR OF A NEW BRUSHLESS GENERATOR	541
DIAGNÓSTICO NÃO INVASIVO DE AVARIAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ALIMENTADOS A PARTIR DE VARIADORES DE FREQUÊNCIA	556
COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLID-STATE DC PROTECTION DEVICES	571
REDE ELÉTRICA DO DEPARTAMENTO DE FÍSICA	586
CIRCUITO DE FONTE DE ALIMENTAÇÃO SIMÉTRICA	600
CIRCUITO DE COMPENSAÇÃO DE JUNÇÃO FRIA PARA TERMOPAR	610
CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS ENERGIAS FOTOVOLTAICA E EÓLICA EM ANGOLA	623
MODELAÇÃO E CONTROLO DE SUSPENSÃO REGENERATIVA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS COM GERADOR LINEAR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL COMUTADO	637
PLUVIÔMETRO AUTOMATIZADO COM MONITORAMENTO EM TEMPO REAL	652
<b>INDUSTRIAL MANAGEMENT AND ENGINEERING</b>	668
ENERGETIC AND ECONOMIC IMPACT OF THE HVAC TEMPERATURE SETPOINT ADJUSTMENT IN COMMERCIAL AND SERVICE BUILDINGS IN BEIRA INTERIOR REGION	669
INTERNET DAS COISAS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AGRICULTURA DE PRECISÃO	681
INTERNET OF THINGS APPLIED TO THE INTELLIGENT MANAGEMENT OF PARKING PARKS IN THE OLD AREA OF COVILHA	697

<b>MECHANICAL ENGINEERING</b>	712
INFLUENCE OF WATER PERCENTAGE ON PERFORMANCE AND EMISSIONS OF A DIESEL ENGINE FUELLED WITH WATER EMULSIFIED DIESEL	713
APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM GERADOR DE VAPOR PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	727
AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO DO SECTOR RODOVIÁRIO PORTUGUÊS	743
AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO DO IOGURTE	756
<b>TEXTILE SCIENCE AND ENGINEERING</b>	771
SUSTAINABILITY AND CIRCULARITY: EMERGING RECYCLING TECHNOLOGIES	772
AMAZONIAN BIO-COLOURATION OF SUSTAINABLE SHOES AND SPORTS CLOTHING	785
<b>SPECIAL SESSIONS</b>	795
DEVELOPMENT OF NEW PLASMA ACTUATORS BASED ON FLEXIBLE MATERIALS ELECTROSTATICALLY ACTIVATED FOR FLOW CONTROL AND ICE MITIGATION	796
THERMAL ANALYSIS OF NOVEL CERAMIC COMPOSITES FOR SURFACE DIELECTRIC BARRIER PLASMA ACTUATORS	811
EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELECTROHYDRODYNAMIC JETS BASED ON THE PHASE DOPPLER TECHNIQUE	823
OPTIMIZATION OF ELECTROSPRAY PERFORMANCE USING DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA ACTUATORS: AN EXPERIMENTAL STUDY ON DIFFERENT OPERATION MODES	838
RING PLASMA ACTUATORS FOR CONTROLLING THE METHANE/AIR FLAME IN A NON-PREMIXED BLUFF BODY BURNER	853
COMPUTATIONAL STUDY OF VIBRATIONAL NON-EQUILIBRIUM EFFECTS ON SURFACE PROPERTIES OF A HYPERSONIC BODY	868
IMPLEMENTATION OF A CALORIMETRIC TECHNIQUE FOR DBD PLASMA ACTUATORS THERMAL POWER QUANTIFICATION	879
EMPOWERING SUSTAINABILITY: INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND PRACTICES IN AGRICULTURE AND INDUSTRY	896
ROBOTA SUDOE - ROBOTICS, DIGITALISATION, AND AUTOMATION AS ENGINES OF COMPETITIVENESS AND GROWTH OF SMES	897

TECHNOLOGICAL INNOVATIONS FOR REMOTE MONITORING AND AI-BASED DECISION SUPPORT IN MOUNTAIN ECOSYSTEMS: THE MONTANHAVIVA PROJECT	899
HIGHLY SENSITIVE FLEXIBLE THREE-DIMENSIONAL STRAIN SENSOR AND ITS APPLICATION	901
IMPLEMENTATION OF INTERACTIVE DIGITAL PANELS TO PROMOTE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY AND TOURISM IN SERRA DA GARDUNHA: THE MONTANHA VIVA APPROACH	902

## **PREFACE**

### **PREÂMBULO**

Desejamos as boas-vindas ao ICEUBI2024 - International Congress on Engineering UBI 2024 – promovido pela Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, com o apoio institucional da Universidade da Beira Interior, Ordem dos Engenheiros, Ordem dos Arquitetos.

Esta edição vem na sequência do sucesso de dez Congressos de Engenharia anteriores, realizados na FEUBI que se constituíram como uma organização de referência no domínio da Engenharia em Portugal. Este congresso tem por objetivo principal divulgar a contribuição e interesse da Engenharia, Arquitetura e áreas afins, para a Sociedade, fomentando o contato entre investigadores e profissionais de diferentes áreas e possibilitando a divulgação das suas atividades de investigação, de inovação e desenvolvimento, junto dos vários setores de atividade económica e também servir de divulgação ao trabalho de investigação e desenvolvimento que é realizado no seio da FEUBI. Ao mesmo tempo, tencionava-se fazer uma antecipação de futuros cenários que se debrucem sobre as temáticas da emergência climática, nomeadamente, a partir de práticas de inovação e sustentabilidade.

Na edição 2024, pretendia-se consolidar a internacionalização do evento e elevar o seu patamar de qualidade, recebendo contribuições de diferentes especialistas e promovendo o debate sobre a importância e interesse da Inovação e Sustentabilidade para a Sociedade.

Todos os artigos foram submetidos na plataforma EASYCHAIR criada para o efeito, sendo revistos por dois elementos da comissão científica no sistema “blind review”, tornando o processo de revisão mais transparente, cuidado e exigente. Expressamos um profundo agradecimento a todos os autores de comunicações por aceitarem partilhar o seu saber, conhecimento e experiência, membros da comissão científica a quem coube a árdua tarefa de revisão dos artigos, palestrantes convidados pelas interessantes comunicações de carácter transversal, proponentes, dinamizadores e organizadores das sessões

temáticas, participantes, membros da comissão de honra, parceiros médios, revistas científicas, bem como a todas as empresas e instituições que patrocinaram ou apoiaram a organização do ICEUBI2024, sem os quais esta iniciativa não seria possível. Deixamos um agradecimento especial aos membros da Comissão Organizadora e a todos os que de alguma forma participaram na concretização da ICEUBI2024, pelo empenho e profissionalismo demonstrado em todas as tarefas organizativas. Os editores, revisores, autores e elementos de apoio fizeram um esforço considerável para produzir umas atas sem erros ou omissões significativas. No entanto, num volume tão significativo de comunicações com mais de 900 páginas é possível que não tenham sido completamente detetadas algumas falhas.

Neste sentido lamentamos qualquer incorreção e pedimos antecipadamente desculpa por algum erro ou imprecisão que não tenha sido possível detetar em tempo útil. Deseja-se que esta iniciativa seja útil para todos os que nele decidiram participar, contribua para a discussão, sistematização e o avanço do conhecimento nos domínios da engenharia e sua contribuição para a sociedade e ainda que tenha a continuidade desejável com a organização do ICEUBI2026.

Os Editores

Marisa Dinis de Almeida

Francisco Brójo

# Patrocinadores









**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# SESSIONS

# ICEUBI2024



**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# AEROSPACE ENGINEERING



## FROM THE G-LOC RISK TO A PLANNING SYSTEM OF AEROBATIC FLIGHTS

BARAHONA DA FONSECA, JOSÉ (1);

(1) DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE,  
NOVA SCHOOL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, NEW UNIVERSITY OF  
LISBON, E-MAIL: [JBFO@FCT.UNL.PT](mailto:JBFO@FCT.UNL.PT)

### ABSTRACT

*We begin by a revision of our mathematical model of G-LOC risk, which will be the basis of our Planning System of Aerobatic Flights. This model is based on the paradox of the flyup, an extension of the paradox of uniform circular movement. Then we obtain the risk of G-LOC in a vertical circular loop and we find that it cannot be done more than two consecutive loops with an F-16 aircraft and generalize the expression to the risk of G-LOC in an aerobatic flight. Next, we find that it cannot be done more than three consecutive horizontal circular loops with an F-16 aircraft. Finally, based on the expression of the G-LOC risk in an aerobatic flight we design a planning system of aerobatic flights.*

**Keywords:** G-LOC risk, New Type of GCAS, Planning System of Aerobatic Flights.

### RESUMO

Começamos por rever o nosso modelo matemático do risco de G-LOC, que será o ponto de partida do nosso Sistema de Planeamento de Voos Acrobáticos. Este modelo baseia-se no paradoxo do flyup, uma extensão do paradoxo do movimento circular uniforme. Então obtemos o risco de G-LOC num loop circular vertical e concluímos que com o F-16 não podem ser feitos mais de dois loops verticais consecutivos e generalizamos a expressão do risco de G-LOC num voo acrobático.

**Palavras-chave:** Risco de G-LOC, Novo Tipo de GCAS, Sistema de Planeamento de Voos Acrobáticos.

### 1 INTRODUCTION

During the AFTI/F-16 program, in the 1990s, the USAF in conjunction with the Swedish Air Force developed a ground collision avoidance system (GCAS) that triggered automatic *flyups* with a centripetal acceleration of 5g [1]. In 2011 we introduced a new type of GCAS [2] that allows higher

centripetal acceleration *flyups* but they must not exceed a given G-LOC risk. This way we solved simultaneously the G-LOC problem and the ground collision avoidance problem. As a continuation of this work based on the definition of G-LOC risk, we design a planning system of aerobatic flights also based on the G-LOC risk. As a demonstration of this system, we calculate the risk of G-LOC of a circular vertical loop and of a circular horizontal loop and we show that it cannot be done more than two consecutive vertical loops and three consecutive horizontal loops with an F-16 aircraft. To our knowledge, there are no similar published works in the literature.

## 2 THE PARADOX OF THE UNIFORM CIRCULAR MOTION

The main idea behind our model of G-LOC risk is the paradox of uniform circular motion. For constant centripetal acceleration,  $Gf$ , the time  $\Delta t$ , to make an arc of  $\Delta\gamma$  radians with constant linear speed  $V$ , is proportional to  $V$ . Next, we will show this result.

For a uniform circular motion with angular speed,  $\omega$ , the centripetal acceleration can be written as (1).

$$Gf = \omega^2 V \quad (1)$$

So, the time to make an arc of  $\Delta\gamma$  radians will be given by (2).

$$\Delta t = \Delta\gamma / \omega = \Delta\gamma / Gf V \quad (2)$$

Since  $\Delta\gamma$  and  $Gf$  are constants, (2) tells us that the time to make an arc of circumference is proportional to the linear speed,  $V$ , as we wanted to show.

## 3 THE PARADOX OF THE FLYUP

When an aircraft is descending with a constant trajectory angle,  $\gamma_0$ , and a certain altitude, the *flyup* altitude,  $h_f$ , the pilot pulls the stick generating, in the case of the F-16 aircraft, a constant centripetal acceleration,  $G_f$ , until a final trajectory angle,  $\gamma_f$ , it describes a *little bit* spiral-like trajectory since the speed decreases through the *flyup*, due to gravity and to the augment of induced drag, i.e., the radius of curvature decreases continuously through the *flyup*.

Empirically we will show that the *flyup time* is almost proportional to the initial speed of *flyup*,  $V_f$ , through simulations with an F-16 aircraft model. Since the *flyup* can be seen as a sequence of arcs of circumferences with decreasing radius, we expect that the *flyup time* will be less than an arc

of circumference with constant speed,  $V_f$ , and the same centripetal acceleration,  $G_f$ , given by (2), as we show in (3).

$$\Delta t \cong \sum_{i=1}^N \frac{\Delta \gamma_i}{G_f - g \cos(\gamma_i)} V_i \quad (3)$$

Increasing the number of arcs,  $N$ , and making  $\Delta \gamma \rightarrow 0$ , we get the exact value of  $\Delta t$  given by (4).

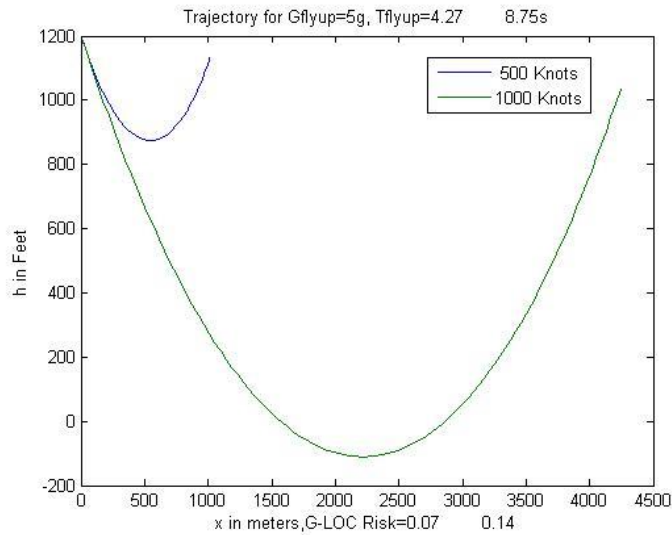
$$\Delta t = \int_{\gamma_0}^{\gamma_f} \frac{V(\gamma)}{G_f - g \cos(\gamma)} d\gamma \quad (4)$$

Equation (4) tells us that the exact *flyup* time is *approximately* equal to the area under  $V(\gamma)$  divided by the centripetal acceleration  $G_f$ . If we consider a horizontal curve then the *flyup* time is exactly equal to the referred area divided by  $G_f$ . If we consider a constant initial speed through the *flyup* then (4) will simplify approximately to (2) and exactly to (2) if we consider a horizontal curve, since in this latter case  $g \cos(\gamma)=0$ .

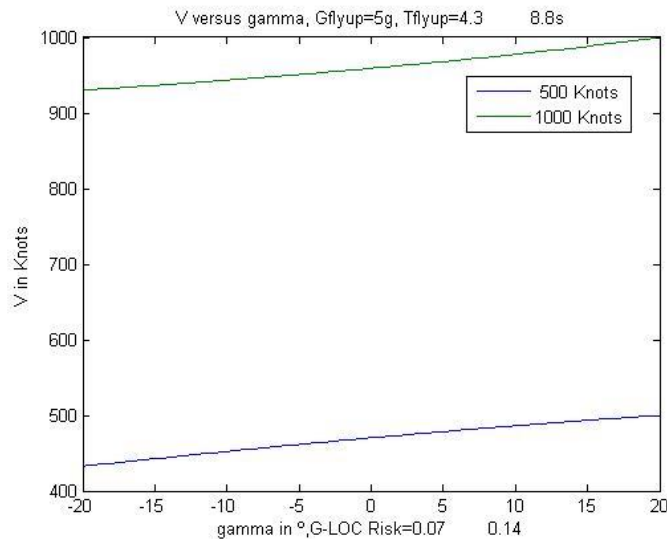
### 3.1 Examples of simulated *flyups* for the F-16 aircraft

Next in figure 1 we show the trajectories of two *flyups* with initial speeds of 500 and 1000 Knots with a constant centripetal acceleration of 5g and  $\gamma_0=20^\circ$  and the final angle of trajectory  $\gamma_f=-20^\circ$ . In figure 2 we show the evolution of speed  $V(\gamma)$  through these two *flyups*. As can be seen, the time of the second *flyup*, 8.75s, is almost the double of the first, 4.27s, and the decrease of speed is almost 100 Knots in both *flyups*. For an ideal situation of constant speed through the *flyups*, we would have a duration of 4.58s and 9.15s, respectively.

**Figure1 – Trajectories for two *flyups***



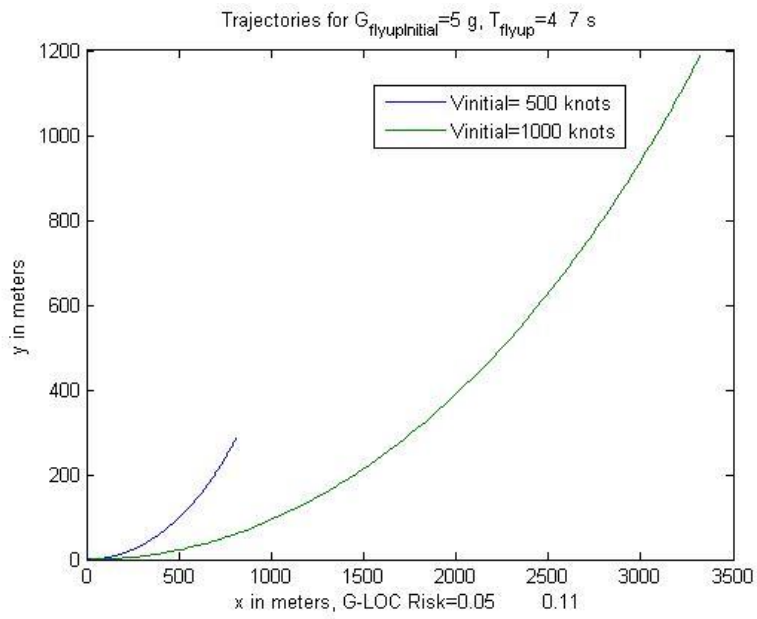
**Figure2 – Evolution of speed through the two flyups**



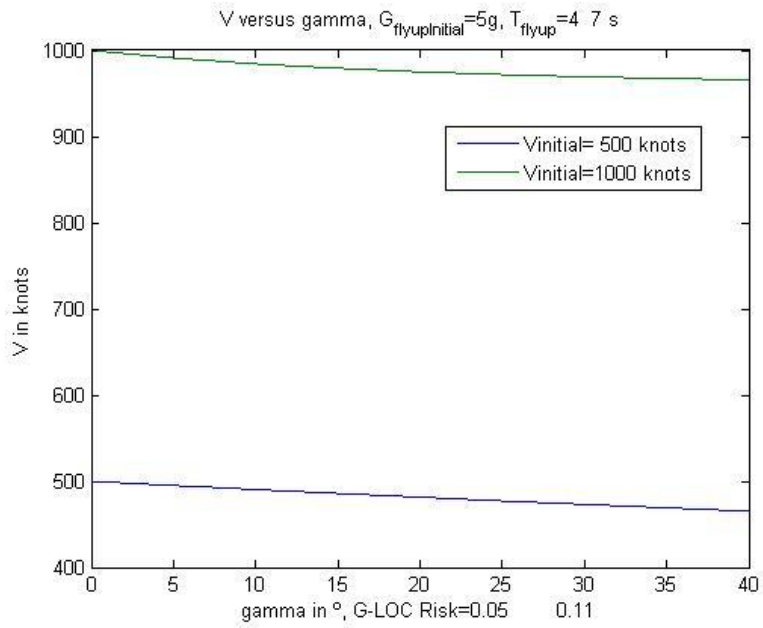
### 3.2 Examples of simulated horizontal curves for the F-16 aircraft

Next, in figure 3, we show the trajectories of two simulated horizontal curves with a constant centripetal acceleration of 5g and with initial speeds of 500 and 1000 Knots with trajectory angle varying between 0° and 40°, and, in figure 4, we show the evolution of speed through the two curves. Note that now the times to make the two curves are 4s and 7s, respectively. In both curves the decrease of speed is less than 50 Knots.

**Figure3 – Trajectories for two horizontal curves**



**Figure4 – Evolution of speed for two horizontal curves**



#### 4 DEFINITION OF THE G-LOC RISK OF AN ARC OF CIRCUMFERENCE

As we showed previously the time to make an arc of  $\Delta\gamma$  radians is given by (2). The G-LOC risk of an arc of circumference will be given by (5), where  $\Delta t_{G-LOC}(G_f)$  is a model of the pilot +Gz tolerance [3].

$$Risk_{G-LOC} = \frac{\Delta t}{\Delta t_{G-LOC}(G_f)} \quad (5)$$

After some simplifications, the pilot +Gz tolerance from [3] can be written as (6).

$$\Delta t_{G-LOC}(G_f) = \frac{K_{pilot}}{G_f^2} \quad (6)$$

In (6) the pilot +Gz tolerance is characterized by  $K_{pilot}$ . A typical value is given by  $\Delta t_{G-LOC}(9g)=20s$  for F-16 pilots. Substituting (2) and (6) in (5) we obtain the final expression of the G-LOC risk given by (5').

$$Risk_{G-LOC} = \frac{G_f \Delta\gamma V_f}{K_{pilot}} \quad (5')$$

#### 5 THE G-LOC RISK OF A VERTICAL CIRCULAR LOOP

Dividing the loop in  $N$  flyups of  $\Delta\gamma$  radians, considering constants the centripetal acceleration  $G_f(\gamma_i)$  and speed  $V_f(\gamma_i)$  through each flyup, the G-LOC risk in a vertical circular loop can be written as (7).

$$Risk_{G-LOC} \cong \frac{\Delta\gamma}{K_{pilot}} \sum_{i=1}^N (G_{f_i} - g \cos(\gamma_i)) V_{f_i} \quad (7)$$

In the limit, when  $N \rightarrow \infty$  and  $\Delta\gamma \rightarrow 0$ , we get the exact value of G-LOC risk in a vertical circular loop given by (8).

$$Risk_{G-LOC} = \frac{1}{K_{pilot}} \int_0^{-2\pi} (G_f(\gamma) - g \cos(\gamma)) V_f(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

Equation (8) tells us that the exact G-LOC risk in a vertical circular loop is given by the area under  $(G_f(\gamma) - g \cos(\gamma)) V_f(\gamma)$  divided by  $K_{pilot}$ .

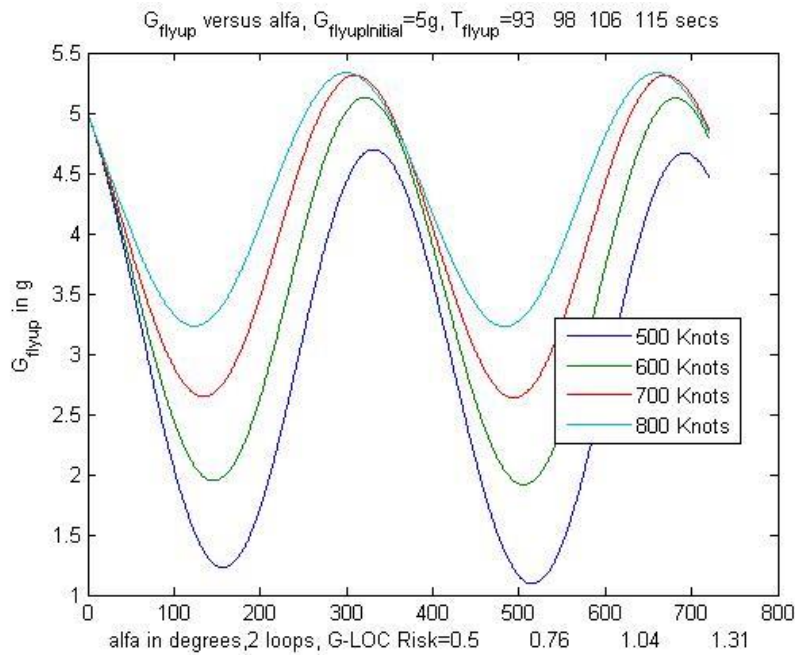
##### 5.1 The G-LOC risk in two consecutive vertical loops

Next, we will show that it cannot be done more than two consecutive vertical circular loops with the F-16 aircraft, using a simulation model developed in a previous work [4]. Fixing the initial centripetal acceleration in 5g and initial speeds varying between 500 and 800 Knots, in figure 5 we show the evolution of the centripetal acceleration through the two consecutive loops, in figure 6 we show the evolution of speed and in

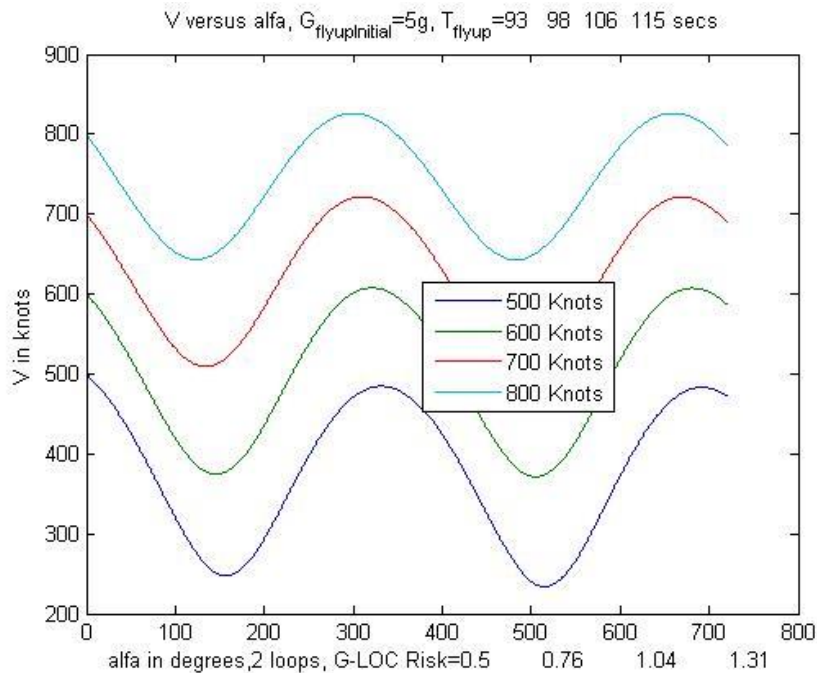


figure 7 we show the evolution of  $(G_f(\gamma) - g \cos(\gamma)) V_f(\gamma)$ . The areas under the curves of figure 7 are a measure of the G-LOC risk in each pair of loops. Note that for a initial speed of 600 Knots we have big G-LOC risk of 0.76 and for 700 Knots we have a G-LOC risk of 1.04. So, for an initial  $G_f=5g$ , the maximum initial speed to make two consecutive vertical loops is about 600 Knots.

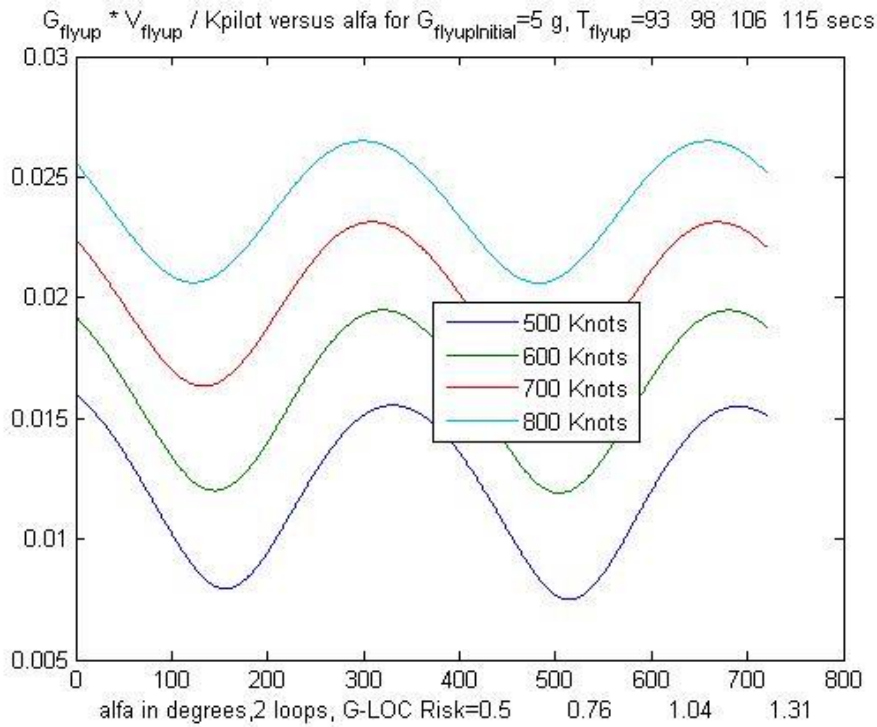
**Figure5 – Evolution of centripetal acceleration through two vertical loops**



**Figure6 – Evolution of speed through two vertical loops**



**Figure7 – Evolution of  $(G_f(\gamma) - g \cos(\gamma)) V_f(\gamma)$  through two vertical loops**



## 6 THE G-LOC RISK OF A HORIZONTAL CIRCULAR LOOP

From (8) it is easy to show that the exact G-LOC risk in a horizontal loop is given by (9).

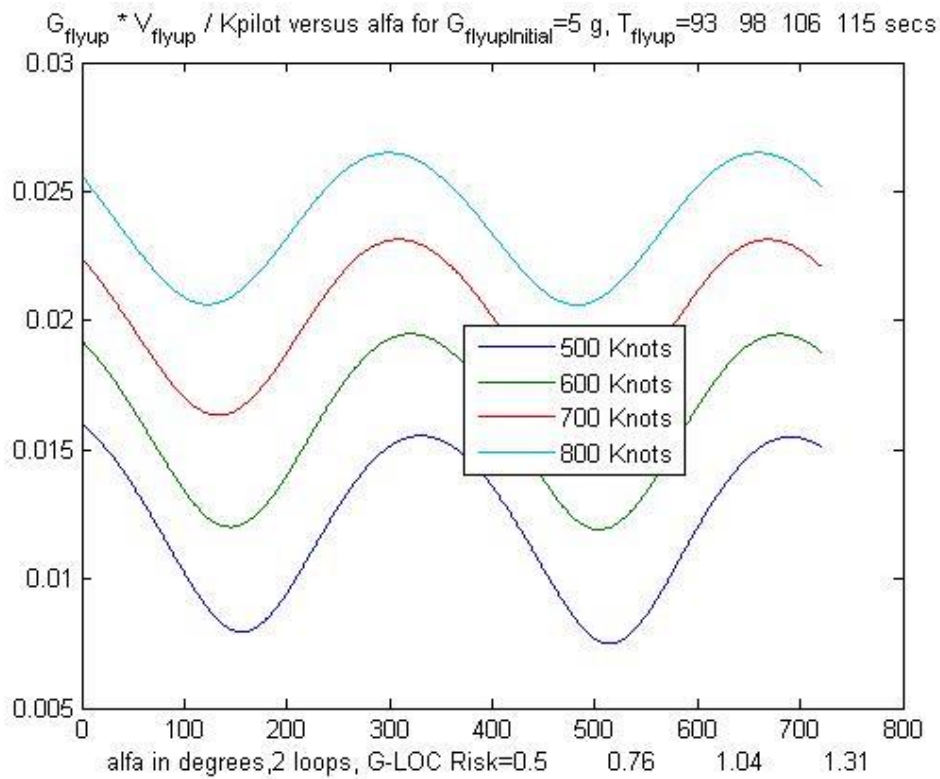
$$Risk_{G-LOC} = \frac{1}{K_{pilot}} \int_0^{2\pi} G_f(\alpha) V_f(\alpha) d\alpha \quad (9)$$

Equation (9) tells us that the G-LOC risk of a horizontal loop is the area under  $G_f(\alpha) V_f(\alpha)$  divided by the pilot +Gz tolerance  $K_{pilot}$ .

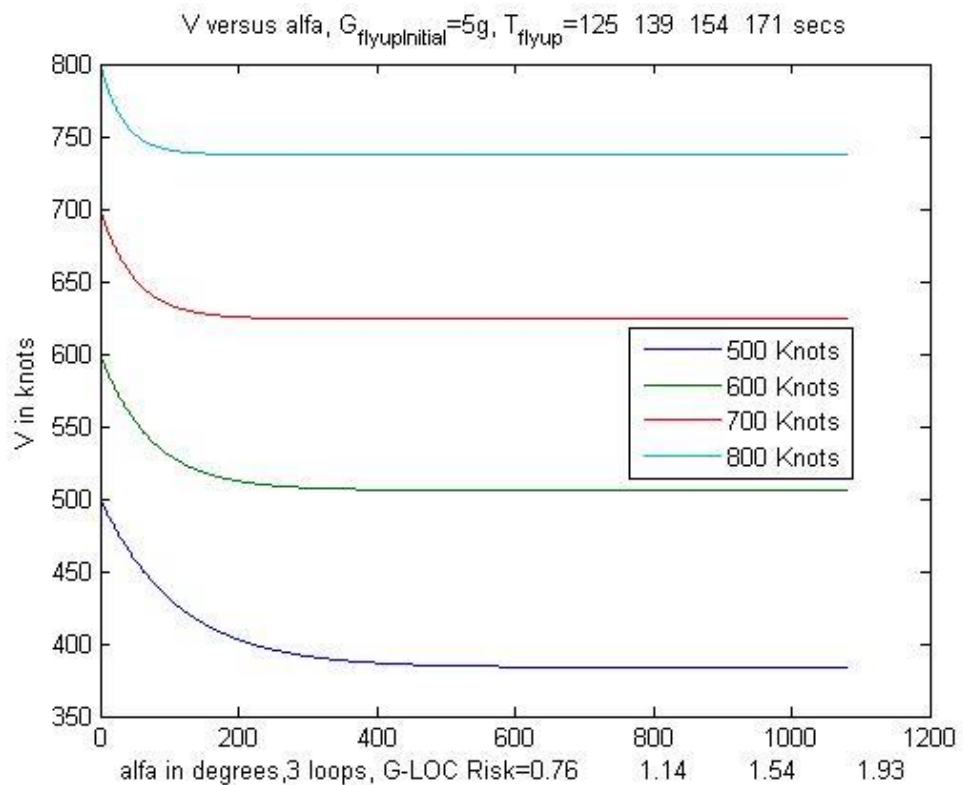
### 6.1 The G-LOC risk in three consecutive horizontal loops

Next, we show that with an initial centripetal acceleration of 5g it cannot be done more than three consecutive horizontal circular loops with an F-16 aircraft. In figures 8, 9 and 10 we show that the estimated G-LOC risk for an initial speed of 500 Knots is 0.76 but for an initial speed of 600 Knots it is already greater than 1.

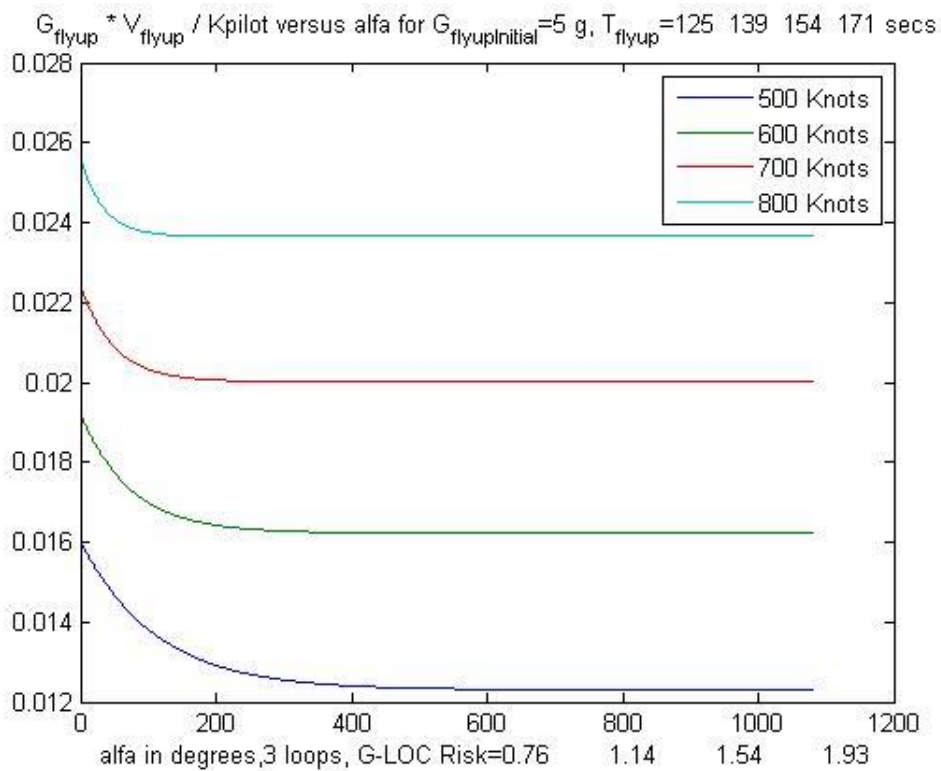
**Figure8 – Evolution of centripetal acceleration through three horizontal loops**



**Figure9 – Evolution of speed through three horizontal loops**



**Figure10 – Evolution of  $G_f(\alpha)V_f(\alpha) / K_{pilot}$  through three horizontal loops**



## 7 THE G-LOC RISK OF AN AEROBATIC FLIGHT

Based on (8) and (9) we can estimate the G-LOC risk of an aerobatic flight as the maximum of the sums of G-LOC risks of segments of “sequential” aerobatics. For example, if after two vertical loops there is a big “silence” time interval, we can make three horizontal loops. But if after a vertical loop we make a horizontal loop, without introducing a “silence” interval, we must adjust the initial centripetal accelerations and initial speeds to guarantee a G-LOC risk less than 1 of the sequence of the two aerobatics.

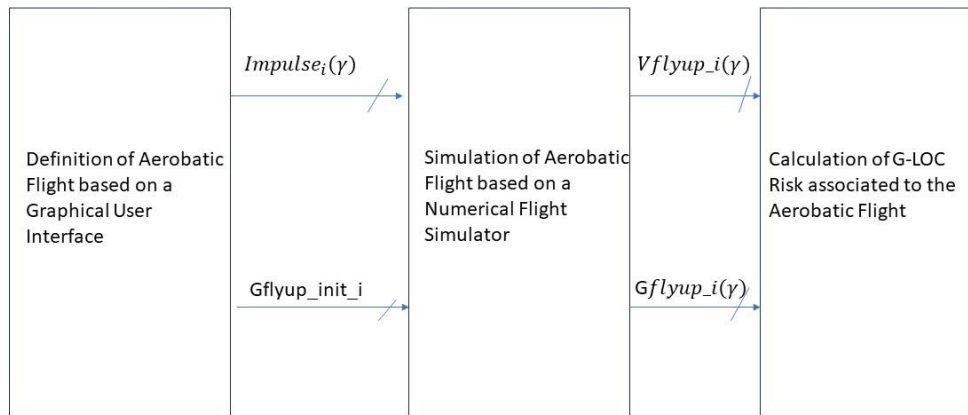
In practice, we must develop a high quality flight simulator where we introduce the equations of estimation of the G-LOC risk.

## 8 DESIGN OF A PLANNING SYSTEM OF AEROBATIC FLIGHTS

In figure 11 we show the architecture of a planning system of aerobatic flights. First, we must have a graphical interface where the user defines the trajectory and other input parameters. Next, we receive that information and simulate the flight, generating the values  $V_{fi}(\gamma)$  and  $G_{fi}(\gamma)$  that enter in the third block where is estimated the risk of G-LOC. Note that in this first approach we consider that the various segments of the aerobatic flight are successive, so the total risk of G-LOC will be the sum of the G-LOC risk

of each segment. In practice, if the risk of G-LOC exceeds 1, we must introduce “silent” time intervals between some segments.

**Figure 11– Architecture of the planning system of aerobatic flights**



## 9 CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In a previous work [2] we showed how to improve the GCAS system developed during the F-16/AFTI program using the concept of risk of G-LOC. In this work we make another application of the risk of G-LOC and designed a planning system for aerobatic flights. In the near future, we will search for partners to implement this system and we will study how to formalize the more common case where the various segments of an aerobatic flight are not successive, and so the resultant risk of G-LOC is less than the sum of the risk of G-LOC of the various segments.

## REFERENCES

- 1 NASA DRYDEN F-16AFTI HOMEPAGE, available at <https://www.dfr.nasa.gov/Gallery/Photo/F-16AFTI/HTML/EC91-630-8.html>, Last accessed: 26 Febr. 2022.
- 2 Barahona da Fonseca, J., “From a Model of the Time to G-LOC to the Anti-G-LOC GCAS: Solving Simultaneously the G-LOC Problem and the Flight into the Ground Problem”, IN *Proceedings of ICEUBI 2013 Conference*, UBI Press, 2013.
- 3 MOORE, D. et al. A Mathematical Model of G Time-Tolerance. **Aviat. Space Environ. Med.** v. 64, p. 947-951. 1993.
- 4 Barahona da Fonseca, J.,

5 Barahona da Fonseca, J., "An Auto Pilot to Make Circular Loops: From Vertical to Horizontal Loops", IN *Proceedings of CONTROLO 2018 Conference*, 2018, APCA.

6 STEVEN, A. et al, *Introduction to Aeronautics: A Design Perspective*, 1997, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Chap. 6.

7 RAYMER, D. P., *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, AIAA, Washington, DC, 1989, Chap. 16.



## LOW SPEED AIRFOIL OPTIMIZATION

PANGAS, GUILHERME (1); GAMBOA, PEDRO (2)

(1) C-MAST - UBI, E-MAIL: [GUILHERME.PANGAS@UBI.PT](mailto:GUILHERME.PANGAS@UBI.PT)

(2) C-MAST - UBI, E-MAIL: [PGAMBOA@UBI.PT](mailto:PGAMBOA@UBI.PT)

### ABSTRACT

The advancement of computational capabilities has allowed for more efficient analysis and iteration of airfoil designs. Consequently, it has become possible to expand the design space and explore new geometries and configurations. However, the current state does not allow for a press-and-run optimization. The new capabilities have simply carried over the trial-and-error approach, previously used for the geometry, to the formulation of the optimization problem. The goal of this work is to study the formulation of an optimization problem and propose a new methodology that better portrays the aircraft's requirements for airfoil performance. The new objective, based on the Air Cargo Challenge 2022, is implemented by modifying an existing tool. This software has implemented a constrained multi-point optimization to improve the aircraft's airfoil performance. The optimization is based on the free-gradient technique called Particle Swarm Optimization (PSO), using B-spline parametrization and a coupled viscous/inviscid interaction method. The new objective function, added to this program, estimates the main performance parameters of the aircraft developed for the competition, such as lift-off weight, climb speed, and cruise and turn maximum speeds. The estimates are done using a method that extrapolates the characteristics of the airfoil, analyzed through a sequence of defined operating points, into the aircraft's performance. The competition score is then added to a penalty value, if any of the imposed constraints are not met, to use as the objective function value.

**Keywords:** Airfoil design, Low Reynolds Number, Multi-point constrained optimization, Particle Swarm Optimization, B-spline, Coupled viscous/inviscid interaction method.

### 1 INTRODUCTION

The aerodynamic properties of an aircraft, such as lift, drag and pitching moment, are strongly affected by the features of the wing cross-section. Hence, the airfoil design has a major impact on the aircraft's efficiency during flight. This significance results in the necessity to fit the aircraft's airfoil to the unique requirements of each mission, thus keeping the progress of airfoil design an area of interest.

The advancement of computational power enabled engineers to replace traditional methodologies heavily reliant on the designer's skill as well as slower and costly iteration with numerical optimization, which analyzes and iterates airfoil designs more effectively.

As mentioned in [1], the numerical optimization approaches are classified as gradient-based, a method that requires the objective function's gradient information, or gradient-free, a strategy based on a naturally occurring phenomenon.

Gradient-based techniques are ideal for solving well-defined polynomials or finding locally optimal solutions. On the other hand, gradient-free do not need continuity or predictability across the design space, making them ideal for determining the global optimum in numerically noisy optimization issues, such as experimental or simulation findings [1].

One of the widely used gradient-free methods is the swarm particle optimization (PSO) introduced by Eberhart and Kennedy [2,3,4,5] in the 1990s that models the social behavior of animals. This method was then improved by Shi and Eberhart in [6], with the implementation of a new control parameter to better balance the global and local search.

The performance of each iteration in the swarm is evaluated using a fitness function that must align with the aircraft mission. According to the Air Cargo Challenge 2022 handbook [7], the competition aimed to simulate a real medical emergency in a village, cut-off from outside contact due to an avalanche or flood, where it is necessary to transport medical supplies, specifically blood bags.

Regarding the flight task, the aircraft has to take-off in a 60 m grass runway with the maximum possible payload. Next, it must climb to an altitude as close as possible to 100 m within 60 seconds. Immediately after the 60 seconds, it starts the distance task where it needs to travel as far as possible within 120 seconds. Lastly, the aircraft must perform a safe landing. Because some of these traits clash with each other, the aircraft's total score results from a balance between the different features.

For that reason, a multi-point objective function was implemented to discover this equilibrium and obtain the highest overall performance. This method also allows the enhancement of the off-design performance, improving reliability as flying circumstances shift greatly depending on the atmospheric conditions and pilot skill.

To calculate the fitness of the objective function for each particle in the swarm, the PSO makes frequent calls to the computing resources that obtain the airfoil aerodynamic data. In optimization research, computational fluid dynamics (CFD) is the most common method used for performing these calculations. However, CFD solvers are time-consuming and demand a significant amount of computing work.

The XFOIL solver, developed by Drela [8], is an alternate method that combines high-order panel methods with the fully coupled viscous/inviscid interaction method. The results in [9] reveal that XFOIL represents



an accurate form to calculate low Reynolds number airfoils. To further reduce the estimation time, a parallelization strategy for evaluating the objective function was used, based on multi-core computers.

The focus of this paper is to formulate an airfoil optimization problem that enhances the overall score in the Air Cargo competition while achieving a reliable design capable of performing effectively under varying flight conditions.

## 2 AIRFOIL SHAPE PARAMETRIZATION

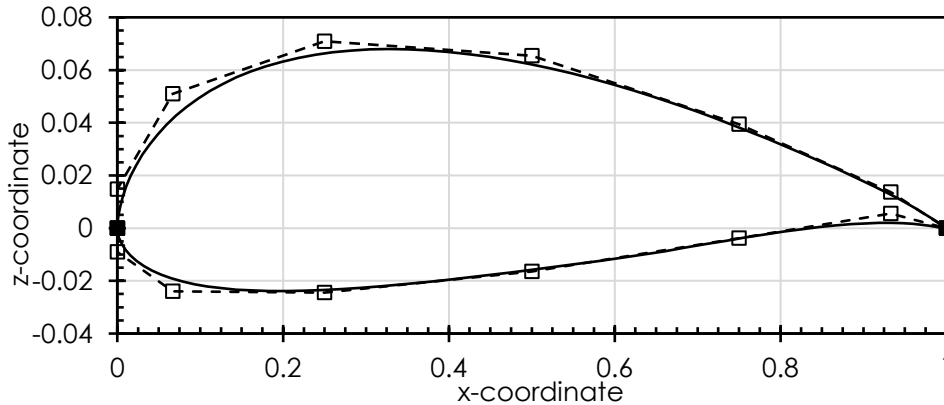
The B-splines designate a smooth curve technique that is obtained by the product of basis functions  $N_{i,k}(t)$  and an array of spatially defined discrete control points  $P_i$ . [10]

Equation 1 establishes the B-spline curves for a planar curve,  $P_i \in \mathbb{R}^2$  and  $C(t) \in \mathbb{R}^2$ , with  $n$  basis functions of order  $k < n$  and parametrized by the scalar  $u \in [u_{k-1}, u_n]$ .

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n-1} N_{i,p}(u) P_i \quad (1)$$

The B-Splines method represents the airfoils using two B-Splines, one for each upper and lower surfaces. For each B-spline,  $P_0$  is fixed at the leading edge (0,0),  $P_{n-1}$  is fixed at the trailing edge midpoint and  $P_1$  is aligned vertically with the leading edge. This applies to both upper and lower surfaces.

**Figure 1 – A cubic B-spline parametrization of a S9000.**



**Source:** Authors

For the other control points, the  $x$  coordinates follow a cosine distribution, thus being the  $z$  coordinates of the control points between 1 and  $n - 2$  the only free coordinates. This results in  $n - 2$  design variables per surface. This is resumed in equations 2.

$$P_0 = (0,0), \quad P_i = \left( \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi(i-1)}{n-2} \right) \right], a_i \right), \quad P_{n-1} = (1,0) \quad (2)$$

Where  $a_i$  denotes a design variable. Figure 1 represents an example of this type of parametrization for the S9000 airfoil with 12 design variables. Note that, the filled squares represent fixed control points.

### 3 MULTI-POINT OPTIMIZATION PROBLEM

#### 3.1 Particle Swarm Optimization

In 1995, Eberhart and Kennedy introduced a new optimization algorithm that defies convention by simulating the social behavior of flocks of birds, receiving the name particle swarm optimization (PSO) [2,3,4,5]. Within PSO, each individual is “evolved” through cooperation and competition among both the members of the swarm and themselves, across generations.

Each particle, in the D-dimensional space, is denoted by three vectors: position,  $\mathbf{X}_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d}, \dots, x_{i,D}\}$ , velocity,  $\mathbf{V}_i = \{v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d}, \dots, v_{i,D}\}$  and the personal best position  $\mathbf{P}_i = \{p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,d}, \dots, p_{i,D}\}$ . The best overall position within the population is also stored and symbolized as  $g$ .

The particles, at each iteration  $t$ , move through the search space following the equation system 3.

$$v_{i,d}(t+1) = v_{i,d}(t) + c_1 \text{rand}_1(p_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)) + c_2 \text{rand}_2(p_{g,d}(t) - x_{i,d}(t)) \quad (3a)$$

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \quad (3b)$$

In equation 1a,  $c_1$  and  $c_2$  are two positive constants and  $\text{rand}_1$  and  $\text{rand}_2$  are functions that generates a random number between [0, 1].

Iteratively, the particles “evolved” based on equation 1b, where their new position,  $x_{i,d}(t+1)$ , is calculated by adding the new velocity,  $v_{i,d}(t+1)$ , to their current position,  $x_{i,d}(t)$ . The velocity, in each iteration, is derived from equation 1a, which is composed of three terms. The second term introduces a “cognition” component to the equation, reflecting the particle’s own thinking. The third term includes a “social” element encouraging collaboration within the particle swarm. And lastly, the first term,  $v_{i,d}(t)$ , introduces a “flying” component to the equation by passing on the previous particle’s velocity to the new one, thus maintaining the tendency to explore the search space, as explained in [5].

To conclude, the first term enhances the global search capability, while the last two terms focus on the local search ability. To improve the balance between both global and local searches, a new inertial weight,  $w$ , is introduced by Shi and Eberhart in [6] and displayed by equation 4.

$$v_{i,d}(t+1) = w v_{i,d}(t) + c_1 \text{rand}_1(p_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)) + c_2 \text{rand}_2(p_{g,d}(t) - x_{i,d}(t)) \quad (4a)$$

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \quad (4b)$$

In this article, the inertial weight will follow a natural exponent function, studied by Chen et al. in [11]. This inertia weight function disperses the particles into the design space before gradually converging on the

optimal solution. Thus, providing a good balance between global and local search.

### 3.2 Objectives

The ideal airfoil should have an aerodynamic performance that achieves the highest score while also having a robust off-design performance to accommodate the shifting operating conditions. This idea is converted into the objective function, stated in equation 5, whose value will be minimized throughout the optimization.

$$Obj = \frac{1}{Score} + w_i \frac{C_{l_{max,ref}}}{C_{l_{max}}} + \sum_{i=1}^N w_i \left[ \frac{(C_l/C_d)_{i,ref}}{(C_l/C_d)_i} \right]_{\alpha} + \sum_{i=1}^N w_i \left[ \frac{C_{d_i}}{C_{d_{i,ref}}} \right]_{C_l} + \delta \quad (5)$$

The first term of the equation reflects the score obtained by the aircraft in the competition. The ACC Handbook [7] provides Equation 6, which is used to calculate this score. The equation employs a relative scoring method which needs specifying the best partial scores achieved during the competition, and available in ACC results [12].

$$Score = \frac{1}{3} \left( \frac{PS_{payload,team}}{PS_{payload,max}} + \frac{PS_{altitude,team}}{PS_{altitude,max}} + \frac{PS_{distance,team}}{PS_{distance,max}} \right) \quad (6)$$

The total score is divided into three flight tasks, each receiving a maximum of 1000 points. These tasks include the take-off phase, scored by the payload; the climb phase, scored by the altitude; and the cruise phase, scored by the distance traveled.

To estimate the aircraft performance in the competition, the method described by Raymer in [13] is employed. Using this method, the aerodynamic characteristics of the airfoil are translated to the aerodynamic features of the aircraft, which are then used to estimate the flight performance.

The second through fourth terms in equation 5 represent the relative improvement of the airfoil's aerodynamic characteristics. These terms analyze multiple operating points around the initial flight conditions, ensuring robust off-design performance. Specifically, the second and third terms relate to increasing the payload capacity, where the second term accounts for the maximum lift coefficient, while the third term addresses the lift to drag ratio at various angles during the take-off ground run. The fourth term focuses on minimizing the drag coefficient during the climb and cruise phases.

The weight of each operating point,  $w_i$ , is calculated using a bell curve, defined by equation 7. For each phase, the initial design point is used as the mean value,  $\mu$ , and the distance between the defined angle of attack or lift coefficient as the standard deviation,  $\sigma$ .

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

Each weight is then normalized so that the sum of the weights in each flight phase equals 1/3, making sure the total collective weight across all phases equals 1.

To prevent the optimization from converging to an impractical or nonviable design, the last term in equation 5 represents the relative difference between the actual property value and the specified upper or lower reference value. In other words, the last term is a penalty factor added for the noncompliance with the constraints imposed.

If this value is within a predefined limit, the evaluation proceeds; otherwise, the evaluation ends, and the objective value receives the penalty value multiplied by a factor of  $10^6$ .

### 3.3 Optimization procedure

The target of the optimization is the airfoil s9000, with the z-coordinates of 12 control points working as the design variables. Each of these variables has an upper  $x_{max}$  and lower  $x_{min}$  limit, given by equation 8.

$$x_{max,d} = x_{seed,d} + x_{seed,d} \cdot \xi_{rel} + \xi_{abs}, \quad \forall d \in [1, N_{dv}] \quad (8a)$$

$$x_{min,d} = x_{seed,d} - x_{seed,d} \cdot \xi_{rel} - \xi_{abs}, \quad \forall d \in [1, N_{dv}] \quad (8b)$$

These constraints are set through the application of both a relative perturbation  $\xi_{rel}$  and an absolute perturbation  $\xi_{abs}$ , with values described in table 1. In addition, the hinge position of the flaps and their deflection angles across the diverse flight phases are included as additional design variables. These variables, along with the geometric features, are penalized when set outside of the allowable limits provided in Table 2. The initial values for the flap parameters are provided in Table 3.

The airfoil enhancement is conducted according to the objective function outlined in equation 5 and discussed in section 3.2. The flight conditions selected to undergo optimization are centered around the initial operating points provided in tables 4-6 to ensure an efficient optimization and enable the score calculation.

**Table 1 – Design Variables initial value and range.**

Control points	Lower limit	Initial value	Upper limit	Control points	Lower limit	Initial value	Upper limit
Top -1	0.02322	0.01481	0.00640	Bot - 1	-0.01248	-0.00898	-0.00549
Top -2	0.07743	0.05095	0.02447	Bot - 2	-0.03501	-0.02400	-0.01300
Top -3	0.10738	0.07092	0.03446	Bot - 3	-0.03569	-0.02446	-0.01323
Top -4	0.09911	0.06540	0.03170	Bot - 4	-0.02360	-0.01640	-0.00920
Top -5	0.06008	0.03939	0.01869	Bot - 5	-0.00468	-0.00378	-0.00289
Top -6	0.02152	0.01368	0.00584	Bot - 6	0.00933	0.00555	0.00177

The initial operating conditions, shown in table 3, are also employed to compute the respective weight of each operating point. As a result, equation 9 shows how the objective function specified in equation 5 is adjusted.

**Table 2 – Geometrical constrains range.**

Property	Lower limit	Upper limit
Flap deflection	-15.0	25.0
Flap hinge position/chord ratio	0.70	0.90
Maximum thickness/chord ratio	0.09	0.25
Camber/chord ratio	-0.10	0.80
Trailing edge thickness/chord ratio	1.0E-5	1.0E-3

**Table 3 – Initial flap configuration.**

Parameter	Value
Flap hinge position/chord ratio	0.8
Flap deflection in take-off	25.0
Flap deflection in climb	4.0
Flap deflection in cruise	0.0

**Table 4 – Take-off initial condition.**

Take-off			
Ground run lift coefficient	Ground run drag coefficient	Maximum lift coefficient	Ground run speed
-	-	-	[m/s]
1.0329	0.02022	1.7131	8.327
Lift-off speed	Weight	Payload	Points
[m/s]	[N]	[N]	-
11.776	41.561	17.641	560.56

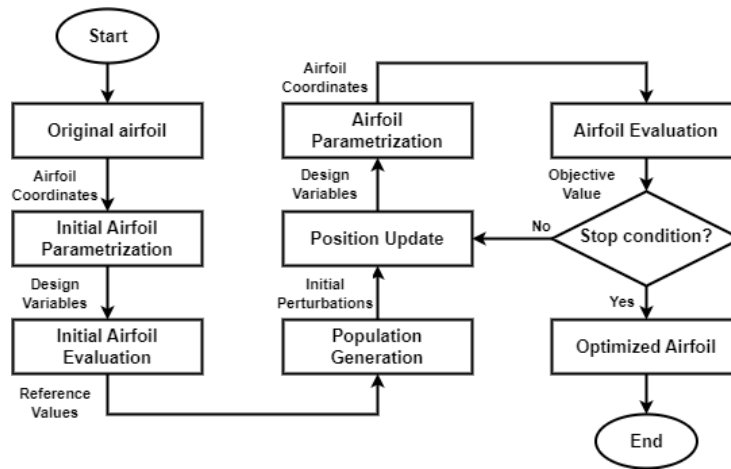
**Table 5 – Climb initial condition.**

Climb				
Climb lift coefficient	Climb drag coefficient	Climb speed	Best rate of climb	Points
-	-	[m/s]	[m/s]	-
0.7500	0.00935	15.388	2.823	1000.00

**Table 6 – Cruise initial condition.**

Cruise			
Cruise lift coefficient	Cruise drag coefficient	Turn lift coefficient	Turn drag coefficient
-	-	-	-
0.2343	0.00662	0.5086	0.00706
Cruise speed	Turn speed	Distance	Points
[m/s]	[m/s]	[m]	
27.702	26.498	3254.62	999.88

**Figure 2 – Optimization flowchart.**



**Source:** Authors

Figure 2 depicts the schematic of the optimization process, which begins with the computation of the initial control points derived from the B-spline parameterization. Subsequently, the XFOIL solver calculates the initial aerodynamic performance and the resultant lift and drag coefficients used to calculate the objective function value, which is supplied to the optimization algorithm.

$$\begin{aligned}
 Obj = \frac{1}{Score} &+ 0.1667 \cdot \frac{C_{l_{max,ref}}}{C_{l_{max}}} + 0.0417 \cdot \left[ \frac{(C_l/C_d)_{ref}}{(C_l/C_d)} \right]_{\alpha=7^\circ} + 0.0833 \cdot \left[ \frac{(C_l/C_d)_{ref}}{(C_l/C_d)} \right]_{\alpha=8^\circ} + 0.0417 \\
 &\cdot \left[ \frac{(C_l/C_d)_{ref}}{(C_l/C_d)} \right]_{\alpha=9^\circ} + 0.0012 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=1.05} + 0.0158 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.95} + 0.0782 \\
 &\cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.85} + 0.1426 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.75} + 0.0956 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.65} + 0.0097 \\
 &\cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.60} + 0.0432 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.55} + 0.0709 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.50} + 0.0429 \\
 &\cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.45} + 0.0041 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.35} + 0.0280 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.30} + 0.0701 \\
 &\cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.25} + 0.0644 \cdot \left[ \frac{C_d}{C_{d,ref}} \right]_{C_l=0.20} + \delta
 \end{aligned} \tag{9}$$

The PSO algorithm generates a population of 50 individuals, an efficient size according to [14], that are uniformly distributed within the range of the design variables. These recently computed individuals are assessed based on the objective function value, and the best personal and global positions updated, if appropriate. The population positions are iterated until the population converges or the maximum iteration limit ( $t_{\max} = 1000$ ) is reached.

The population is considered to have converged when the design radius  $r$ , as defined by Equation 10, meets the predefined threshold of  $r_{\max} = 1 \times 10^{-4}$ .

$$\bar{x}_{i,d} = -1 + 2(x_{i,d} - x_{\min,d}) / (x_{\max,d} - x_{\min,d}), \quad \forall d \in [1, N_{dv}], \forall i \in [1, N_{pop}] \quad (10)$$

#### 4 RESULTS AND DISCUSSION

After 1,000 iterations, the optimization procedure reduces the objective function value from 2.1765 to 2.1404, as shown in figure 3, and increases the competition score from 853.48 to 859.10 by converging to an airfoil with a thickness-to-chord ratio of 9% with a higher maximum camber of 2.84%. Figure 4 shows a geometric comparison of the optimized airfoil and the original design, while Table 7 and 8 compare the corresponding design variables.

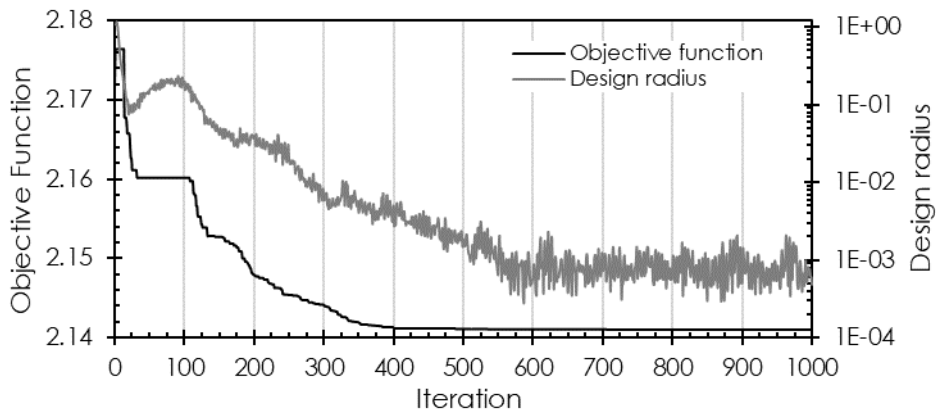
**Table 7 – Comparison of flap configuration between original and optimized airfoils.**

Parameter	Original	Optimize
Flap hinge position/chord ratio	0.800	0.774
Flap deflection in take-off	25.00	25.00
Flap deflection in climb	4.00	2.47
Flap deflection in cruise	0.00	-0.75

**Table 8 – Comparison of control point coordinates between original and optimized airfoils.**

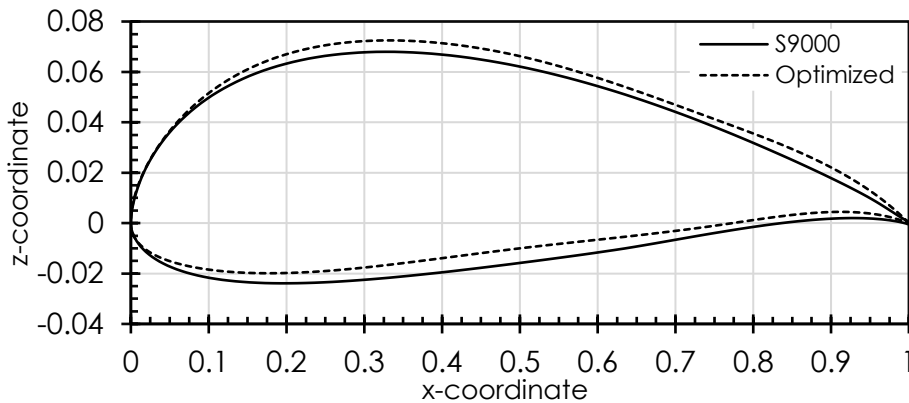
Control points	Original	Optimize	Control points	Original	Optimize
Top -1	0.01481	0.01524	Bot - 1	-0.00898	-0.01041
Top -2	0.05095	0.05041	Bot - 2	-0.02400	-0.02078
Top -3	0.07092	0.07558	Bot - 3	-0.02446	-0.02198
Top -4	0.06540	0.06906	Bot - 4	-0.01640	-0.00888
Top -5	0.03939	0.04277	Bot - 5	-0.00378	-0.00080
Top -6	0.01368	0.01891	Bot - 6	0.00555	0.00800

**Figure 3 – Optimization history.**



Source: Authors

**Figure 4 – Geometrical Comparison between original and optimized airfoils.**



Source: Authors

This score improvement is achieved by increasing the aircraft's payload capacity, of 0.595 N, mostly through a more efficient ground run. The gains result from a trade-off with the rate of climb, which still preserves the maximum score in the climb phase, and a decrease in sustained turn speed and cruise speed, which leads to a reduction in the distance traveled.

These findings are shown clearly in Tables 9-11, which describe the estimated aircraft performance with the optimized airfoil incorporated. The results demonstrate a substantial improvement, with the payload score increasing by 18.93 points, accompanied by a slight decrease of 2.07 points in the distance score.

The observed pattern can be attributed to the increase in the airfoil's maximum camber, as illustrated in Figure 4, which produce an increase in the airfoil's maximum lift coefficient and a higher ground-run efficiency. Consequently, a negative flap deflection during cruise conditions is employed to compensate for the drag coefficient rise during the cruise



due to the rise in camber line, effectively increasing angle of attack for a given lift coefficient.

Additionally, Figure 5 corroborates these conclusions by showing improvements between 6% and 10% in the ground run operating points efficiency, and a 3% increase in the maximum lift coefficient, further enhancing the payload score. Conversely, the lift coefficient intervals, associated with the climb, cruise, and turn operating points displayed in Tables 10 and 11, exhibited reductions ranging from -0.1% to -4% in the drag coefficient.

**Table 9 – Optimized take-off performance.**

Take-off			
Ground run lift coefficient	Ground run drag coefficient	Maximum lift coefficient	Ground run speed
-	-	-	[m/s]
1.0834	0.01927	1.7738	8.241
Lift-off speed	Weight	Payload	Points
[m/s]	[N]	[N]	-
11.655	42.156	18.236	579.49

**Table 10 – Optimized climb performance.**

Climb				
Climb lift coefficient	Climb drag coefficient	Climb speed	Best rate of climb	Points
-	-	[m/s]	[m/s]	-
0.7500	0.00935	15.498	2.775	1000.00

**Table 11 – Optimized cruise performance.**

Cruise			
Cruise lift coefficient	Cruise drag coefficient	Turn lift coefficient	Turn drag coefficient
-	-	-	-
0.2379	0.00669	0.5205	0.00729
Cruise speed	Turn speed	Distance	Points
[m/s]	[m/s]	[m]	
27.689	26.389	3247.86	997.81

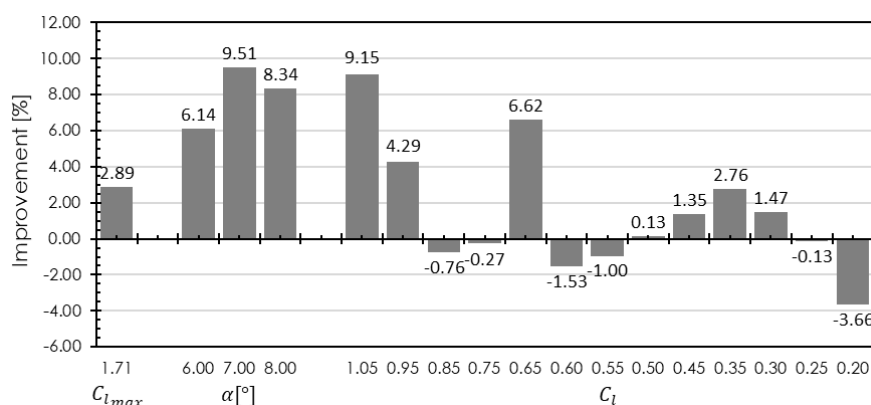
Furthermore, in contrast to the observed climb condition deterioration, the first two operating points of the climb optimization had a significant improvement. This enhancement is attributed to the proximity of these points with the ground-run condition. In other words, the improvement in

the ground run translates directly to an improvement to these two operating points.

Consequently, to avoid overlapping points, the lift coefficient range for the climb evaluation could be reduced, leading to a decrease in the lift coefficient interval. This reduction is important, as a large step size in the  $C_l$  interval complicates the determination of the real best rate of climb and the flap deflection with which it is obtained. Instead, the algorithm is optimizing the flap deflection to maximize the rate of climb at one of the preselected operating points. Similar considerations can also be made in determining the order phases flap deflection, however the use of smaller steps mitigates this issue.

Figure 6 portrays an aerodynamic comparison between the optimized and original airfoils under each flight condition. This aerodynamic comparison validates all prior results and demonstrates that the large ground run efficiency boost is also caused by a decline in airfoil performance between the ground run and maximum lift conditions. This can be explained by the absence of points under consideration in that location.

**Figure 5 – Aerodynamic improvement of the operating point under optimization.**



**Source:** Authors

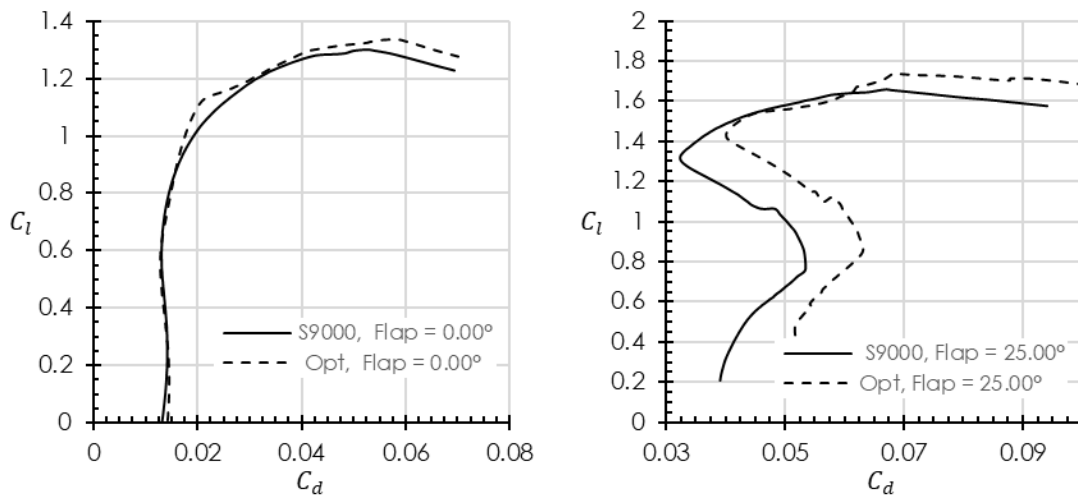
Moreover, Figure 6 also shows that the improvement in the aerodynamic characteristics at the operating point with a lift coefficient of 0.6 during the climb phase, as well as the enhancement at 0.35 of  $C_l$  during the cruise phase are associated to the smoothing of the polar curve in each respective condition.

These observed tendencies reinforce the influence of the operating point selection on the optimization outcomes. The chosen points not only set the margin of error of the aircraft performance characteristics but also the polar curve smoothing range in each respective condition.

Compared to Palmeira's prior research [15], the current approach improves the optimized airfoil in multiple areas. A key advancement is the direct integration of the estimated flight score into the objective function, which effectively achieves the aerodynamic balance required to improve the overall score. This contrasts with Palmeira's method, which incorporated a weight-based solution.

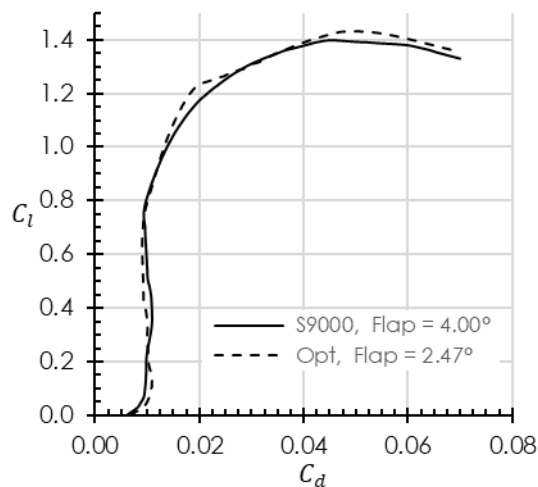
Additionally, the current optimization also considers operating conditions surrounding the design point. Thus, addressing a limitation in the previous study that led to point-specific improvements. The difference between the use of 17 operating points in this study, against the 7 points considered by Palmeira, led the algorithm to converge into a smoother drag polar. This is particularly prominent in the range of lift coefficients between 0.2 and 1.1, as illustrated in Figure 6, highlighting the consistent aerodynamic behavior achieved across a range of operating conditions.

**Figure 6 - Comparison of aerodynamic performance between original and optimized airfoils.**

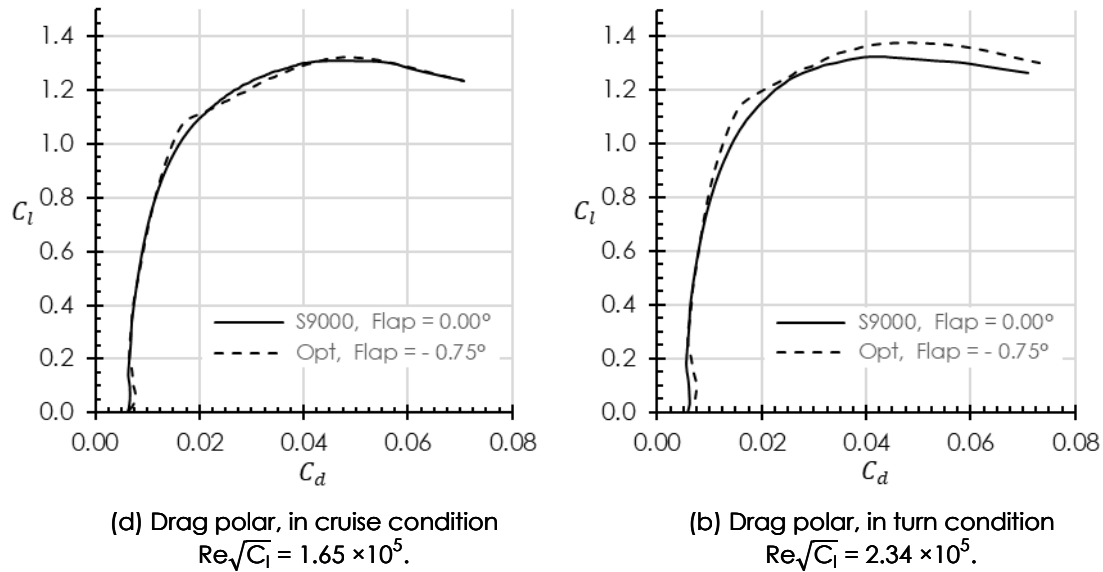


(a) Drag polar, in ground run condition  $Re = 1.07 \times 10^5$ .

(b) Drag polar, in take-off condition  $Re = 1.51 \times 10^5$ .



(c) Drag polar, in climb condition  $Re\sqrt{C_l} = 1.66 \times 10^5$ .



Source: Authors

As a result, the current method ensures more robust performance across off-design conditions, thus enhancing the overall effectiveness of the optimized airfoil.

However, the weight-based solution is not completely eliminated in the new objective function, as each objective function component can have different importance. This raises the question, if the competition score was assigned twice the weight of the aerodynamic relative improvement, would the resulting airfoil be better? Therefore, it would be valuable to implement a multi-objective optimization algorithm that eliminates the need to assign fixed weights to the objective function. Such approach provides a range of possible optimal airfoils, offering freedom to the optimization for explore the best scenario.

## 5 CONCLUSIONS

The multipoint constrained optimization strategy proposed in this paper efficiently addresses the challenges of optimizing an aircraft across various flight phases under different operating conditions. The integration of the competition score into the objective function resulted in improved performance at ACC 2022, while the inclusion of relative improvement for the points under study ensures robust operation across a broad range of conditions. The results verify this approach's ability to enhance competition performance while maintaining off-design performance.

## REFERENCES

- SKINNER, S. N.; ZARE-BEHTASH, H. State-of-the-art in aerodynamic shape optimisation methods. **APPLIED SOFT COMPUTING**, v. 62, p. 933-962, JAN 2018.
- EBERHART, R. C.; SIMPSON, P. K.; DOBBINS, W. R. **Computational intelligence PC tools**. Oxford: AP Professional, 1996.

EBERHART, R.; KENNEDY, J. **A new optimizer using particle swarm theory**. MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. [S.l.]: IEEE. 1995. p. 39-43.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. [S.l.]: IEEE. 1995. p. 1942-1948.

KENNEDY, J. **The particle swarm**: social adaptation of knowledge. Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC '97). [S.l.]: IEEE. 1997. p. 303-308.

SHI, Y.; EBERHART, R. **A modified particle swarm optimizer**. 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. [S.l.]: IEEE World Congress on Computational Intelligence. 1998. p. 69-73.

AKAMODELL MUNICH. **Aircargo Challenge 2022**, Participation Handbook, 2021. Disponível em: <[https://akamodell-muenchen.de/wp-content/uploads/2022/07/regulations\\_acc\\_2022\\_munich\\_v01\\_15.pdf](https://akamodell-muenchen.de/wp-content/uploads/2022/07/regulations_acc_2022_munich_v01_15.pdf)>. Acesso em: 05 fevereiro 2024.

CHEN, G. et al. **Natural exponential inertia weight strategy in particle swarm optimization**. 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. [S.l.]: IEEE. 2006. p. 3672-3675.

DRELA, M. **XFOIL**: Subsonic Airfoil Development System, 2013. Disponível em: <<https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>>. Acesso em: 25 julho 2024.

MASTERS, D. A. et al. **Review of aerofoil parameterisation methods for aerodynamic shape optimisation**. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2015.

AKAMODELL MUNICH. Results. **Aircargo Challenge 2022**, 2022. Disponível em: <<https://akamodell-muenchen.de/air-cargo-challenge-2022/results/>>. Acesso em: 5 fevereiro 2024.

RAYMER, D. P. **Aircraft design**: A conceptual approach. 6. ed. Ohio: AIAA Education Series, 2018.

PIOTROWSKI, A. P.; NAPIORKOWSKI, J. J.; PIOTROWSKA, A. E. Population size in Particle Swarm Optimization. **Swarm and evolutionary computation**, v. 58, p. 100718, 2020.

PALMEIRA, R. **Low speed aerofoil optimisation**. 2022. Tese (Mestrado em Engenharia Aeronáutica) – Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã.



## **APPLICATION OF EVTOL AIRCRAFT IN ADVANCED AIR MOBILITY: VERTIPOINT IN HUMBERTO DELGADO AIRPORT**

NAVE, TIAGO (1); SILVA, JORGE (2);

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, AEROSPACE SCIENCES  
DEPARTMENT, CONVENTO DE SANTO ANTÓNIO, 6200-001 COVILHÃ,  
PORTUGAL

E-mail: [tiago.nave@ubi.pt](mailto:tiago.nave@ubi.pt)

(2) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, AEROSPACE SCIENCES  
DEPARTMENT, CONVENTO DE SANTO ANTÓNIO, 6200-001 COVILHÃ,  
PORTUGAL

CITUA, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, AV.  
ROVISCO PAIS 1, 1049-001 LISBOA, PORTUGAL

E-mail: [jmrs@ubi.pt](mailto:jmrs@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [tiago.nave@ubi.pt](mailto:tiago.nave@ubi.pt)

### **ABSTRACT**

*Recent technological evolutions permitted the expansion of urban transport to a new dimension, in the airspace, originating the Advanced Air Mobility. The aim of this work is to understand the potential of a vertiport associated with Humberto Delgado Airport. Many challenges remain in order to implement a route, travelled by new eVTOL vehicles, in an industry that cannot compromise in strictness and safety. Prototype technical specifications have been released, but their transitional nature, alongside a lack of improvements to ATC and the many operational uncertainties bring doubt to the representativity of the models used so far. Seeking to minimise the impact of the previously mentioned factors, the steps for implementing a vertiport were taken while considering appropriate specifications, the impact on the public and obstacle environment of the airspace. Achieving a recommended layout, a model was developed aiming to predict its performance, possible bottlenecks and validate previous predictions. The many sources of uncertainty were pointed out alongside ponderations made in every decision. Results show that the lack of validation of claimed eVTOL capabilities, translated in rigorous EASA vertiport specifications, leads to few options for a vertiport associated with the airport. The achieved theoretical implementation is foreseen to be capable of serving only 0.74% of the hourly airport passenger traffic. Perhaps acceptable for an implementation seeking validation and public approval, expansion of operations would only be possible with more*

*relaxed requirements by authorities. Further research, targeted to the identified challenges is required to perfect this process, alongside issues not mentioned by this work such as the integration with the airport and approval by authorities beyond EASA.*

**Keywords:** Urban Air Mobility (UAM); Advanced Air Mobility (AAM); Electrical Vertical Take-off and Landing (eVTOL); Urban Airspace; Vertiport Layout;

## RESUMO

As evoluções tecnológicas permitem a expansão do transporte urbano para uma nova dimensão, no espaço aéreo, originando a Advanced Air Mobility. O objetivo deste trabalho é perceber o potencial de um vertiporto associado ao aeroporto Humberto Delgado. No entanto é necessário ultrapassar vários desafios para percorrer o processo de implementar uma rota, a ser percorrida por novos veículos eVTOL, numa indústria que não pode comprometer em rigor e segurança. Especificações técnicas iniciais já foram publicadas, mas a sua natureza transitória, em adição a falta de melhorias ao ATC e as muitas incertezas operacionais levantam dúvidas sobre a precisão dos modelos usados até ao momento. Procurando minimizar o impacto dos fatores previamente mencionados, ao percorrer os passos para a implementação de um vertiporto foram consideradas as especificações apropriadas, o impacto no público e a presença de obstáculos no espaço aéreo. Alcançando um layout recomendado, um modelo foi desenvolvido com intuito de prever a sua performance, fatores limitadores do mesmo e validação de previsões anteriores. As fontes de incerteza foram apontadas em conjunto com as ponderações relativas a cada decisão. Os resultados demonstram que a falta de validação das capacidades esperadas dos eVTOLs, traduzida em especificações mais rigorosas por parte da EASA, levam a poucas opções no caso de um vertiporto associado ao aeroporto. A implementação teórica recomendada apresenta uma capacidade prevista capaz de servir 0.74% do tráfego de passageiros horário do aeroporto. Aceitável para uma implementação que procure validação e aprovação do público, uma expansão das operações seria apenas possível com requisitos mais relaxados pelas autoridades. Trabalhos futuros, específicos aos desafios identificados, são precisos para aperfeiçoar este processo, acompanhados de esclarecimentos sobre problemas não abordados neste trabalho como a integração com o aeroporto e aprovação por autoridades além da EASA.

**Palavras-chave:** Urban Air Mobility (UAM); Advanced Air Mobility (AAM); Electrical Vertical Take-off and Landing (eVTOL); Urban Airspace; Vertiport Layout;

## 1 INTRODUCTION

The desire for flying cars goes back more than a century, with attempts to fulfil the dream largely focused on car-plane hybrid, all failing to produce

a truly successful product. Somewhat more fitting of the title, helicopters have been performing many of the operations desired from a flying car, such as an air taxi service, even if under restrictions to the operating environment due to noise and safety separation distances. This category of aircraft has largely gone without improvements until recently, when technological developments in areas like energy storage and electrical propulsion opened the possibility for both hybrid and fully electric VTOL aircraft.

Credited to a white paper from UBER (UBER, 2016), recognising the potential synergy with their currently offered services, research interest was reignited. Many studies on the potential of these aircraft, namely in the context of AAM, focused on market estimations achieving compelling conclusions. The consulting firm McKinsey alongside EASA predicted a 4.2b € market by 2030 (EASA, 2021). In the wake of this opportunity, many VTOL projects have been announced from already established companies like Airbus to purposely established ones like Lilium and Volocopter, presenting aircraft with a large range of capabilities suitable for the many market segments. The many benefits of transportation by these new aircraft include not exacerbating traffic congestion, the capability to operate in urban environments, expanding urban transport networks making use of a largely unused airspace and a greener nature compared to most road alternatives, still mainly reliant on combustion engines. This is to say, vehicles designed in accordance with present problems and values.

This study provides insights into challenges and decision processes met during the various steps of developing a vertiport, the name for the ground infrastructure required for VTOL operations, associated with Humberto Delgado airport. As vertiport implementations remain limited in scale and of an experimental nature, the public is sceptical and not necessarily receptive to VTOL operations in the urban environment. For that reason, assumptions such as an on board pilot were in place alongside special attention to public concerns, aiming for a more fluid first adoption.

This work starts with the Humberto Delgado Airport case chapter, exposing the context for the location where the vertiport is sought to be implemented. Additionally, the choice of eVTOL characteristics is made and public concerns of relevance are mentioned. The following chapter, Vertiport requirements, delves into current applicable documentation by EASA and elaborates on some initial considerations for the layout design process. The next chapter, Vertiport Recommendation, goes through the process of deciding the location and respective layout, alongside the many relevant ponderations. The simulation model is also introduced, as well as the simulation results. Ending this document Conclusions and Final Considerations are made.



## 2 HUMBERTO DELGADO AIRPORT CASE

Having achieved the limit of movements for its single runway but without the possibility of expansion, the only airport for Portugal's capital became a limiting factor. After years of discussions and studies, a decision was finally made by the government to follow the conclusions of an independent technical commission, declaring the intention to construct a new airport, named after Luis de Camões. The intention is to gradually decrease operations in Humberto Delgado as operations increase in Luis de Camões, eventually becoming the only operating airport. This choice came with various challenges such as increasing the transport capability between both sides of the Tejo river. A direct connection between airports is of interest to allow cooperative operations during the transitional phase, representing an opportunity for the introduction of AAM.

### 2.1 Air Taxi Vehicle Selection

Many eVTOL projects are currently underway, resulting in the most varied characteristics. Selecting a model to be considered in the next steps therefore requires establishing criteria to judge whether each pondered model is most suitable for this work's route, resulting in Table 1.

**Table 1 - eVTOL choice criteria**

Criteria	Considerations	Restrictions
Vehicle category	Catered for commercial passenger transport	Passenger oriented
Pilot	Autonomous operations not yet allowed by authorities	On board pilot
Range	Enough to connect both airports	At least 30 km (direct route)
Payload Capacity	At least one passenger in addition to the pilot	Seating capacity for at least 2
Certification	According to EASA	As close to certification as possible
Energy Resupply	Major impact on turnaround time and vertiport footprint	Preference for battery swapping

Based on the information presented above the decision was made to use Volocopter's VoloCity as a reference for this study, considering the published specifications (VOLOCOPTER, 2019). The expected range goes slightly beyond the required, leaving a safety margin. Seating capacity allows for only one passenger but the aim remains on fully autonomous operations, eventually allowing for conversion, doubling passenger capacity. Energy resupply by battery swapping contributes to minimizing the vertiport footprint by reducing turnaround times (VASCİK and HANSMAN, 2019), a significant restriction in already developed zones, such as around Humberto Delgado Airport. Lastly, extensive efforts have been made by Volocopter in the direction of certification and pilot training, establishing a track record expected to continue.

## **2.2 Public Concerns**

The envisioned future for AAM operations is still dependent on various technological improvements, meaning a first implementation of eVTOL and vertiports requires compromises to fit current capabilities. Examples of such cases are already seen in most eVTOL projects, forsaking autonomous operations in favour of an on board pilot operating under VFR, even if still aiming for future autonomous operations. Just as compromises are being made with eVTOLs, the same needs to be present in vertiports, putting aside design philosophies aiming for maximum throughput and revenue. Instead, building a user base and avoiding friction with surrounding communities requires focusing on minimising discomfort for passengers and other elements of the public impacted by operations. Failed initial implementations may significantly hinder further progress in AAM, reason why a good first impression is paramount for public adoption. Aiming to understand such concerns a survey was conducted under various assumptions such as proper regulations, inspections by authorities and an on board pilot. The scope was for any vertiport and not specifically with the proposed case, as such only the results of relevance were commented below.

Some points were consistent with helicopters, with answers showing concerns with high winds and other meteorological phenomena, high rates of climb / descent, noise and overflight of water. The lack of high surrounding buildings prevents cases of canyon effect or other conditions that may cause turbulence. For the same reason, requirements for significant purely vertical movement are not foreseen for obstacle avoidance purposes, even if they may be in place depending on noise impact on the closest habitational zones. The direct route between airports does require significant overflight of water. Answers displaying aversion to water overflight were noted to also highly value time savings brought by this new mean of transport, a pertinent relation as taking a detour that minimized this concern would increase the distance by a third, beyond the considered aircraft range and with a similar impact in travel time. For this case, between the water concerns and time benefits, the latter was considered of more relevance. Comfort was expressed with boarding operations in open pad, allowing the forsaking of margins for auxiliary buildings associated to specific gates. A major point against the use of air taxis, the last mile problem, is also covered by the ample means of access / egress, with a metro station, bus stops and car parking present in the immediate surroundings of terminal 1.

As the majority of identified concerns were seen as suitably addressed / minimized for a vertiport in airport Humberto Delgado, this location was judged as suitable for an initial implementation.

## **3 VERTIPORT REQUIREMENTS**

Many previous works on this subject were based on heliport documentation, considered an appropriate proxy for eventual guidelines

specific to eVTOLs. While possibly closer to the final documentation, prototype guidance for vertiport design has been released by both FAA (FAA, 2022) and EASA (EASA, 2022), under restrictions such as VFR. As this work studies a case in Portugal, a member of the European Union, the documentation being considered will be the one provided by EASA.

### **3.1 Prototype Technical Specifications**

In general, dimension specifications are expressed in relation to the diameter of the smallest circle capable of encompassing the aircraft ( $D$ ). Each component of the vertiport is to be designed for at least the biggest value of  $D$  of the aircraft intended to operate in the vertiport. The variety of factors and operational options can lead to the omission of certain information for lack of relevance to the specific choices made in this paper.

#### **3.1.1 Touchdown and Lift-off**

When operations of lift-off and touchdown take place, they do so at a suitable surface that provides all required safety conditions. Three areas are associated with these operations: TLOF, FATO and SA. All of these can be either circular, square or rectangular as long as they respect the minimum criteria expressed in the following paragraphs. They also share the same central point.

The TLOF represents a surface capable of bearing the strengths experienced during operations, being the section where the undercarriage of the aircraft touches the ground. The general minimum dimension is  $0.83 D$ , increased to  $1D$  in case of an elevated vertiport. Expanding outwards from the TLOF is the FATO, with a minimum length corresponding with the biggest between the rejected take-off distance or  $1.5 D$ . A similar criteria is applied for the width, being the biggest between the width required for the procedure, as expressed in the aircraft flight manual, and  $1.5 D$ . This section provides an area free of obstacles for the final phase of approach and the commence of take-off. The last section of the pad corresponds to the SA, representing an obstacle free zone that expands beyond the FATO, necessary to compensate for manoeuvring under more challenging conditions. Not required to be solid, it expands outward from the FATO by either  $3 \text{ m}$  or  $0.25 D$ , depending on which is greater.

No specific criteria were expressed to determine the separation between two FATOs when seeking the ability to perform simultaneous operations, only mentioning a separation distance is to be determined based on various factors such as downwash, operation performance alongside requirements of non-overlapping flight paths. That said, it was noted a  $60 \text{ m}$  separation between FATOs is recognised as a reference for helicopter operations, under an MTOW of  $3\,175 \text{ kg}$ .

### **3.1.2 Obstacle Environment**

Criteria for the establishment of obstacle-free surfaces and obstacle-free volumes is provided. It is, however, mostly dependent on aircraft performance, data not yet published for current eVTOL projects, reason why this section is not developed in detail.

The most strict obstacle limitation surface criteria corresponds to a 4.5% slope originated at the edge of a FATO's safety area. Exceptions for objects to penetrate it can be made under a favourable safety assessment. Vertiports are expected to have at least two take-off and climb and approach surfaces with a separation of at least 135°, however, when such conditions cannot be met only one surface can be in place after a favourable safety assessment.

### **3.1.3 Taxi Routes**

Taxiways intend to permit the ground movement of the aircraft be it under its own capabilities or other additional equipment. The minimum width can be determined as being the smallest between double the UCW or the dimension judged as sufficient to provide containment of the undercarriage for the most critical use cases, be it in terms of aircraft model or possible taxiing deviations. A distancing of 1.25 aircraft width needs to be ensured between parallel taxiways' centre lines.

A ground taxi route should be associated with a taxiway, based on which a minimum width of 1.5 the aircraft width should be centred. An air taxi route does not require a taxiway but has a bigger width of twice the aircraft width, being important to note this value was achieved considering a ground speed of no more than 37 km/h. If still associated with a taxiway to allow both air and ground taxi, the width of the route follows the air taxi route.

### **3.1.4 Stand**

The role of stands is to allow parking of the aircraft as well as its servicing. When loading and unloading operations are desired the stand may fulfil the role of a gate.

The variety of VTOL aircraft configurations translates itself into varying capabilities concerning turning (not in hover) or push-back that need to be considered during the design of the stand, among other factors. It is for this reason two options are presented for stand design, based on the D value especially if aimed for turning or associated with a TLOF, or based on the aircraft geometry.

For stands based on the D value, the minimum dimension is a circle of diameter of 1.2 D, with an associated protection area dependent on various operational choices. If designed for turning the protection area should extend outwards by 0.4 D or another dimension based on turning data present in the AFM, If taxi-through is intended the protection area should be at least as wide as the taxi route.

Geometry based stands are restricted to ground movement, allowing dimensioning in accordance with clearances dependent on the aircraft's width, tabled on page 39 (EASA, 2022). There are circumstances where, dependent on a safety assessment, some clearances may be reduced.

In both cases, either the protection area or clearances of immediately adjacent stands may overlap as long as only one of them is in use.

### 3.2 Initial Considerations

In order to design a layout, the characteristics of the aircraft it is designed to serve need to be taken into account. For that reason, certain operational metrics need to be established at this stage: time segments for turnaround, take-off and landings. Additionally, to represent the taxi component a taxi speed is to be determined, as rather than a fixed time, a distance – speed method is used for the simulation.

Said values, however, are yet to be released by the many eVTOL companies, reason why techniques such as consultation of subject matter experts and approximations with helicopters are applied. Examples obtained from other works are exposed in Table 2, based on which, the values considered on this work are fixated: take-off and landing time is established as 90s and taxi speed is considered as 1.2m/s. Contrary to the other values, a reference for the turnaround time is provided by Volocopter in the form of a battery swapping time of 5 min (VOLOCOPTER, 2019). However, considering this value a constant differs too much from reality, as it is impacted by many common delays, be it in the battery swapping in itself or the arrival of passengers to board, among others. Therefore, the turnaround time was considered to vary from 5 min to 10 min in accordance with a uniform distribution.

**Table 2 – Operational Metrics**

Work	Take-Off and Landing	Taxi	Source
(FELDHOFF and SOARES ROQUE, 2021)	3 min	1 min (assumed)	Conversations with Germany's air service provider
(VASICIK and HANSMAN, 2019)	15-90s	5-90s	Interviews and observation of heliport operations
(ZELINSKI, 2020)	60s (1)	2.7mph ≈ 1.2m/s (2)	Other works (1) and subject matter interviews (2)

Seeking to understand the sensitivity of vertiports to the many factors needing consideration during the development of one, Vascik and Hansman conducted various simulations under different conditions (VASICIK and HANSMAN, 2019). Using the results of said work, under the condition of no staging of aircraft for TLOF use, an equation was elaborated to obtain the number of stands required per TLOF to maximize throughput (Eq.(1)), an important parameter for vertiport design. Considering a turnaround time of 7.5 min (average of established

distribution) and a taxi time of 50 s a reference ratio of 5 gates per TLOF is obtained.

$$\begin{aligned} & \text{Gates Required} \\ & = \text{Ceiling} \left( \frac{\text{Turnaround Time}}{\max(\text{Arrival Time}, \text{Departure Time}) + \text{Taxi Time}} \right) + 1 \quad (1) \end{aligned}$$

**Source:** (VASCİK and HANSMAN, 2019)

## **4 VERTIPOINT RECOMMENDATION**

### **4.1 Location Choice**

When seeking candidate locations for a vertiport placement many factors need to be taken into account. The ones considered most determining are available area, accessibility (to terminal 1 and other means of travel), obstacle clearance and impact in the surroundings. An analysis of the area around Terminal 1, based on satellite imagery and a on-site visit, revealed three suitable candidates for consideration: Parking 6 (rooftop) (P6), Parking 3 (P3) and Parking 8 (P8).

In terms of area, all options could accommodate one TLOF, 5 gates (with no overlapping safety areas) and a suitable connecting taxiway. Additionally, even if outside the scope of the simulation, space was available for additional staging stands or supporting infrastructure. In terms of accessibility, P3 is the best option being the closest to terminal 1 alongside having a bus stop. P6 and P8 are about the same distance from terminal 1 but P6 stands above P8 as it also has a bus stop.

Obstacle clearance requires a more profound study, yet a more superficial analysis is of use under the current stage, considering only non-removable objects in favour of the vertiport implementation (ex: publicity billboards were considered removable). P3 and P8 do not present major obstacles in the immediate vicinity outside the airport itself and some hotels, however, both cases are below the level of the immediate surrounding roads for a significant portion of their perimeters. Additionally, P8 stands by a small hill, on which a two-story building is located. On the other hand, being right across the road from the above mentioned hotels they represent a bigger concern for P6, even if mitigated by the elevation of the rooftop. Still, outside the airport and said hotels, P6 has many options for approach and take-off surfaces.

Lastly, the impact the implementation of a vertiport would have and the friction created with the surroundings is commented. In the cases of P3 and P8 the biggest concern lies in the proximity with traffic on the surrounding roads and sidewalks. Noise concerns are also valid but factors such as downwash when overflying the roads represent the biggest obstacle for an implementation in such conditions. The rooftop of P6 may be subjected to the same observations but sees them mitigated by the increased height of the vertiport. In terms of noise, a study on Joby Aviation's eVTOL has confirmed acceptable noise levels (65 dBA) at a

ground distance of 100m during take-off (JOBY AVIATION, 2022), lending credibility to suitable noise levels from an implementation right by a hotel 90m away (assuming the TLOF is on the most distant side).

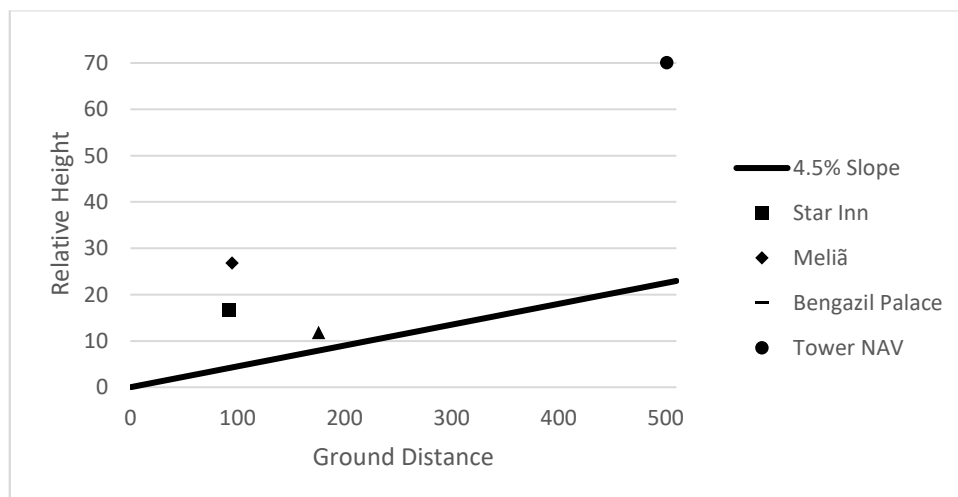
Seeking an appropriate first implementation the decision was made to consider P6 for the following steps. Being a balanced choice in terms of accessibility and surrounding obstacles a compromise was made over available area in favour of minimizing the impact on the surrounding elements. The other options may be revisited for expansion purposes if required.

#### 4.1.1 Obstacle Clearance

The planning of approach and take-off surfaces is largely limited by the obstacle environment which is in turn paramount for a layout proposal. An on-site visit resulted in a more precise identification of obstacles with a sensor tower from NAV and the Benagazil Palace being added to the list already containing the Star Inn Hotel and Meliã Hotel. Other identified obstacles are power and light posts, a publicity billboard, safety barriers for the stairs between floors and overhanging road signs. Considered either removable or movable in favour of the construction of the vertiport they were not considered for further analysis.

The heights of the obstacles, relative to the rooftop, were estimated and represented in Figure 1 alongside a slope of 4.5%, the strictest value in EASA guidelines (EASA, 2022).

**Figure 1 - Obstacle Analysis of P6**



The airport was not included as given the proximity, any operations in its direction would be disruptive and therefore not in consideration from the beginning.

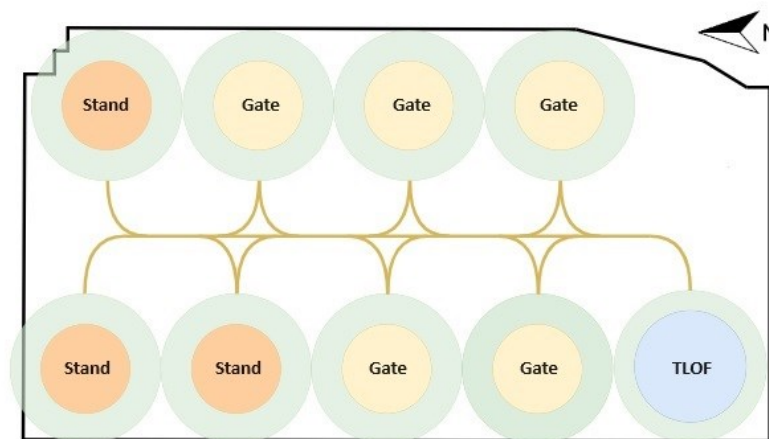
#### 4.2 Layout Recommendation

Considerations beyond the size of the elements mentioned in the Prototype Technical Specifications chapter need to be factored in during the design of a vertiport layout. The high use expected from the five main

stands makes the non-overlap of adjacent protection areas a requirement, to allow simultaneous use. Besides the five stands predicted to maximize the use of the TLOF additional ones are of benefit for normalization purposes, as arrivals and departures are not always balanced. In every aspect of the aeronautical industry, redundancies are always of benefit rather than wasted resources. The current study considers battery swapping as the energy resupply method, requiring a proper space for recharging and storing said batteries is required. Given the existence of lower floors this component can be considered located there alongside possible security screenings, not yet required. Additionally as verified by the results of the survey, exposed at the Public Concerns chapter, open pad boarding operations are acceptable to the public, reason why margins for auxiliary buildings can be minimized.

The TLOF position was chosen to be aligned with the SW corner. This decision is based on the presence of obstacles to the east (hotels), north (NAV tower and Bengazil palace) and the airport to the west. While there was a possible window for take-off and climb and approach surface to the north, with the TLOF at the NW corner, such an option was declined as low overflight of other vertiport components would make them susceptible to downwash interference. On the other hand, to the south, a bigger window is presented under the previous considerations, being also on the west side to maximize distance to the hotels. As a result of the previous considerations the layout shown in Figure 2 – was achieved.

**Figure 2 – Recommended Layout**



On the image above, the TLOF and FATO are represented under the colour blue, the stands that act as gates as yellow, while the staging stands as orange. Additionally, as a faded green is the corresponding safety areas or protection areas. The lines, connecting the previous components, represent the centre of the ground taxiways.

### **4.3 Simulation Model**

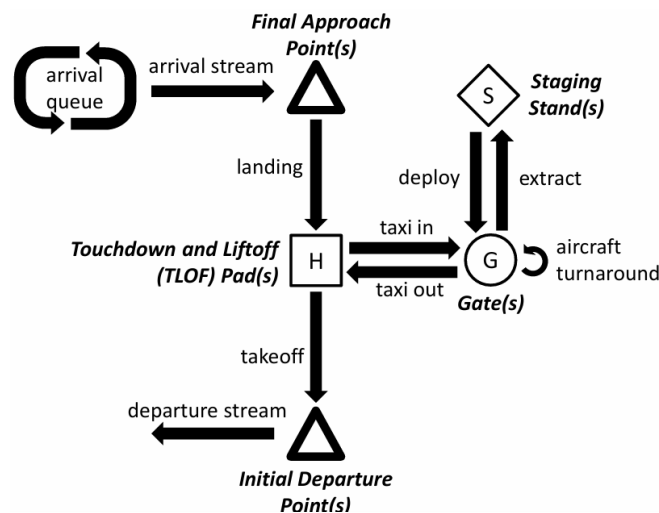
Under the various uncertainties and lack of real world data the method of discrete event simulation was adopted, implemented using the software



Anylogic (Anylogic 8.9.0, 2024). Abilities such as design of the layout, important for realism in the simulation of the taxi component, possibility of non-singular time values (ex: probability distribution related to a time interval), namely for depicting the impact of passenger delays in turnaround times and a resource dependency system were in the base of the software choice.

The first step was determining all the segments of a flight operation and the requirement for each in terms of resources. In the most simple combination, the segments correspond to landing / arrival, taxi to gate, turnaround, taxi to pad and take-off / departure (PREIS, 2021). For a vertiport with staging stands, the concept of operations is shown in Figure 3, also representing the connections between previously mentioned segments. As each step cannot be taken without the availability of the resources required for the next such dependencies were identified, corresponding to the vertiport elements. As an example, approach and landing can only be conducted with both, an available TLOF and free stand to not impede proper operations of the vertiport, needing to be reserved before starting the landing. Complementarily, for resources to be available to the next aircraft they need to be released when no longer required, just as the TLOF is released when starting the taxi to the gate while the gate itself continues seized. Following this process, the vertiport model was elaborated.

**Figure 3 - Vertiport Concept of Operations**



Source: (VASCİK and HANSMAN, 2019)

### 4.3.1 Considerations

Many factors, different from current helicopter or fixed wing operations, influence aircraft seeking to land / take off from a vertiport, complicating a correct depiction of scheduling and the processing of aircraft operational requests (SCHWEIGER, KNABE and KORN, 2022). In the absence of proper scheduling, both aircraft seeking to land and take-off are competing for the TLOF, eventually leading to a deadlock. To combat

this situation two measures were taken: Landing aircraft need to reserve both the TLOF and gate simultaneously, not one at a time, and in the case of all gates being occupied departing aircraft were given priority in reserving the TLOF.

Without any reference for the use of aircraft in this use case, any model for the arrival queue would be purely speculative, reason why the focus of the simulation lies on a saturated queue. The results are therefore indicative of the maximum capacity of this layout. For the same reasons, without a model for demand, the decision of when to park in a staging stand instead of departing or to use a parked aircraft rather than an arriving one are unable to be emulated. While they are present, staging stands fall outside the simulation, playing a role of normalization in case of unbalanced arrivals and departures while having a marginal impact on maximum throughput (VASIC and HANSMAN, 2019). Another operational decision not implemented, in line with the presented reasons, was the option of aircraft pre-taxiing to near the TLOF in case of successive take-offs.

### **4.3.2 Results**

The vertiport shown in the previous chapter, operating aircraft of the discussed characteristics, proved capable of slightly less than 31.9 movements (take-offs or landings) per hour, representing 15.97 arrivals and 15.97 departures. As the aircraft in consideration only has one passenger seat the passengers served are equal to the aircraft. Utilization parameters are measured as the percentage of simulated time the individual resources within the resource pool are attributed to an aircraft. The TLOF utilization was of 100% while for the gates was 88%, meaning the TLOF was the bottleneck. For that reason an additional wait time averaging 6.73 min was added after the end of turnaround procedures, as the TLOF is not available for departure.

Considering data from June 2024, one of the busiest months for air transport, Humberto Delgado Airport saw around 4310 passengers per hour. The vertiport is therefore capable of serving 0.74% of passenger traffic related to the airport. Such a value is only achievable, however, during his operating hours currently restricted by conditions that allow VFR.

Seeking validation of the 5 gates to one TLOF ratio the simulation was again conducted for only 4 gates. All controlled metrics but one showed a negligible difference, only the time waited after turnaround for the availability of the TLOF reduced to around half (2.93 min), a favourable evolution. The thesis that the recommended layout has one unrequired gate is backed by this second simulation, however, the recommendation for the layout is maintained based on the benefits brought by redundancy, a parameter not reflected in the model used.

## 5 CONCLUSIONS AND FINAL CONSIDERATIONS

The aim of this work was to judge the potential of a vertiport associated with Humberto Delgado airport, namely under the context of the future of air transport in Portugal's capital.

Of the identified candidates parking 6 was considered the most adequate for an initial implementation based on the various criteria applied, followed by a more precise analysis of the obstacle environment, a critical factor for air operations. Guidelines from EASA, requirements of auxiliary facilities and public concerns were respected during the development of the layout. An estimate of the required gates to TLOF ratio was made to guide initial designs, based on other works, alongside other exposed considerations that resulted in the recommended layout. Such layout was then tested under a simulation model that considers resource availability, distance-speed taxi representations and variable turnaround times. Results showed a demand of 31.9 passengers an hour to be enough to maximize the vertiport's capabilities. The relatively high space demands proved extremely restrictive for the largely developed environment around an airport in the centre of a capital city. With the continuous development of these aircraft, vertiport requirements may become less strict, allowing for other suitable locations to be identified. The current possible implementation at Humberto Delgado airport would fall behind the many expectations of AAM. However, a fully autonomous future, doubling passenger capacity would make it an interesting proposition.

As data from real world implementations starts being collected, infrastructure requirements and references for more precise models can be further developed, increasing the precision of simulations. Additionally, with the operation of vertiports, the capabilities of eVTOLs would be made public, improving the parameters inputted in the models, further increasing the credibility of the results. Beyond the technical requirements, legal requirements for a vertiport implementation also need to be clarified. Guidance is provided by aviation authorities to break the impasse in developing legislation. The same needs to be done by governments setting boundaries in accordance with the interests of all stakeholders, clearing the path for approval by the people.

After developments in the field, it is of interest to revisit Humberto Delgado's case, possibly considering a bigger scale implementation, made possible by then, or even a purpose build infrastructure at the announced Luís de Camões airport.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful for the Foundation for Science and Technology's support through funding UIDB/05703/2020 from the research unit CiTUA.

## REFERENCES

ANYLOGIC. **Anylogic 8.9.0**. mai. 2024 Disponível em: <<https://www.anylogic.com/>>. Acesso em: 15 jul. 2024.

EASA. **Vertiports Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN)**. 2022. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/prototype-technical-design-specifications-vertiports>>. Acesso em: 12 fev. 2024.

EASA. **Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe**. 2021. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/en/full-report-study-societal-acceptance-urban-air-mobility-europe>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

FAA. **Engineering Brief No. 105, Vertiport Design**. set 2022.

FELDHOFF, E.; SOARES ROQUE, G. Determining infrastructure requirements for an air taxi service at Cologne Bonn Airport. **CEAS Aeronautical Journal**, v. 12, n. 4, p. 821–833, 27 nov. 2021.

JOBY AVIATION. **Joby Confirms Revolutionary Low Noise Footprint Following NASA Testing**. mai. 2022. Disponível em: <<https://www.jobyaviation.com/news/joby-revolutionary-low-noise-footprint-nasa-testing/>>. Acesso em: 21 ago. 2024.

PREIS, L. **Quick Sizing, Throughput Estimating and Layout Planning for VTOL Aerodromes – A Methodology for Vertiport Design**. AIAA AVIATION 2021 FORUM. **Anais...**Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2 ago. 2021. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-2372>>. Acesso em: 6 abr. 2024

SCHWEIGER, K.; KNABE, F.; KORN, B. An exemplary definition of a vertidrome's airside concept of operations. **Aerospace Science and Technology**, v. 125, p. 107144, 1 jun. 2022.

UBER. **Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation**. out. 2016. Disponível em: <[https://evtol.news/\\_\\_media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf](https://evtol.news/__media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf)>. Acesso em: 20 mar. 2024.

VASCIK, P. D.; HANSMAN, R. J. **Development of Vertiport Capacity Envelopes and Analysis of Their Sensitivity to Topological and Operational Factors**. AIAA Scitech 2019 Forum. **Anais...**Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 7 jan. 2019. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-0526>>

VOLOCOPTER. **Volocity - Design Specifications**. 2019. Disponível em: <<https://www.volocopter.com/en/solutions/volocopter>>. Acesso em: 16 jul. 2024.

ZELINSKI, S. **Operational Analysis of Vertiport Surface Topology**. 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC). **Anais...IEEE**, 11 out. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9256794/>>



## ENHANCING SMART CITY CAPABILITIES WITH THE INTEGRATION OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS: THE CASE OF PORTO

BARATEIRO, JOÃO (1); SILVA, JORGE (2)

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, AEROSPACE SCIENCES DEPARTMENT, CONVENTO DE SANTO ANTÓNIO, 6201- 001 COVILHÃ, PORTUGAL

E-mail: [joao.barateiro@ubi.pt](mailto:joao.barateiro@ubi.pt)

(2) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, AEROSPACE SCIENCES DEPARTMENT, CONVENTO DE SANTO ANTÓNIO, 6201- 001 COVILHÃ, PORTUGAL

CITUA, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, AV. ROVISCO PAIS 1, 1049-001 LISBOA, PORTUGAL

E-mail: [jmrs@ubi.pt](mailto:jmrs@ubi.pt)

### ABSTRACT

*The increasing number of urban residents presents growing challenges that require innovative and efficient solutions. Cities are looking for smarter approaches, which involve the optimization of resource usage and the improvement of public services, with the aim of enhancing the quality of life and overall satisfaction of residents through sustainable practices. Current and emerging innovative technologies provide effective tools for addressing urban challenges. Unmanned Aircraft Systems (UAS) present a valuable solution, due to their versatility, flexibility, efficient data collection methods, and lower environmental impact compared to other technologies. UAS have been extensively studied as they offer a wide range of urban applications, such as monitoring, traffic management, and infrastructure inspection. In the near future, they are also expected to start carrying passengers and delivering goods in Europe, contributing to the development of Urban Air Mobility (UAM), a priority among the European Union's sustainable urban mobility initiatives. This work proposes the application of a Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats (SWOT) analysis to qualitatively evaluate the implementation of UAS in Porto, supported by the Fuzzy Analytical Hierarchical Process (FAHP) to prioritize strategies for implementation, with the primary goal of pinpointing initiatives that would position Porto closer to the leading smart cities in Europe.*

**Keywords:** Smart City, Unmanned Aircraft Systems (UAS), Urban Air Mobility (UAM), Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats (SWOT), Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

### RESUMO

O crescente número de cidadãos urbanos traduz-se em desafios que exigem soluções inovadoras e eficientes. As cidades encontram-se numa busca incessante por abordagens mais inteligentes que envolvem a otimização da utilização de recursos e a melhoria de serviços públicos, visando aumentar a qualidade de vida e satisfação geral dos residentes por meio de práticas sustentáveis. As tecnologias inovadoras

atuais e emergentes fornecem ferramentas eficazes para enfrentar desafios urbanos, constituindo os Sistemas Aéreos Não Tripulados (UAS) uma solução valiosa nesse contexto, devido à sua versatilidade, flexibilidade, métodos eficientes de recolha de dados e menor impacto ambiental comparativamente a outras tecnologias. Os UAS têm sido amplamente estudados, uma vez que oferecem uma vasta gama de aplicações urbanas, como monitorização, gestão de tráfego e inspeção de infraestruturas. Também se prevê que tenham um papel fundamental no transporte de passageiros e mercadorias, contribuindo para o desenvolvimento da Mobilidade Aérea Urbana (UAM), conhecida como uma prioridade entre as diversas iniciativas de mobilidade urbana sustentável da União Europeia. Este trabalho propõe a aplicação de uma análise SWOT (Forças-Oportunidades-Fraquezas-Ameaças) para avaliar qualitativamente a implementação de UAS no Porto, apoiada pelo Processo Analítico Hierárquico combinada com a lógica Fuzzy (FAHP) para investigar uma priorização de estratégias de implementação, com o objetivo principal de identificar iniciativas que posicionem o Porto mais próximo das principais cidades inteligentes europeias.

**Palavras-chave:** Cidade Inteligente, Sistemas Aéreos Não Tripulados (UAS), Mobilidade Aérea Urbana (UAM), Forças-Oportunidades-Fraquezas-Ameaças (SWOT), Processo Analítico Hierárquico e lógica Fuzzy (FAHP)

## 1 INTRODUCTION

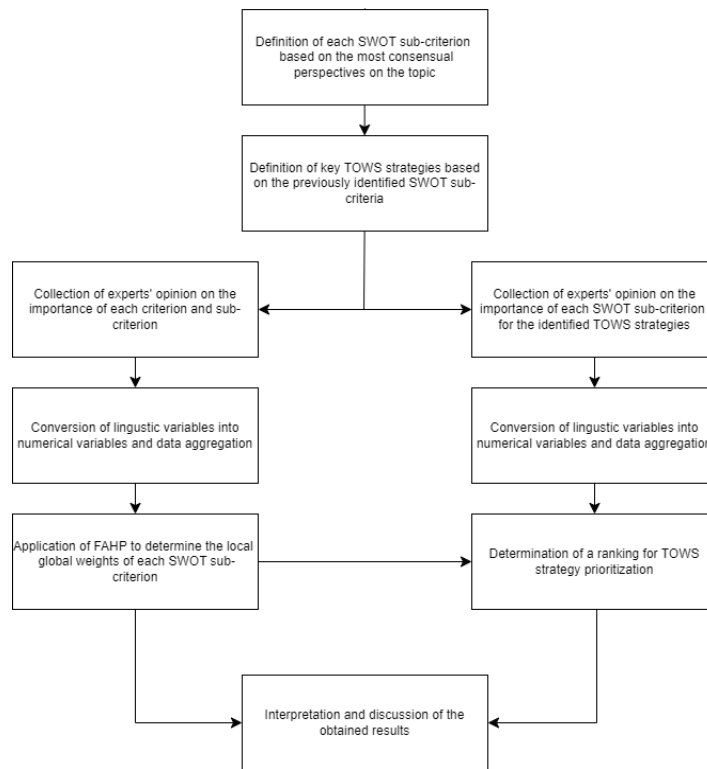
There has been a growing interest in the concept of smart cities. Considering the most widely accepted perspectives on the topic, there is a clear agreement that smart cities are characterized by the importance of using innovative technological approaches to improve efficiency in urban operations. There is also a consensus on the significance of economic, social and environmental sustainability as a key part of smart solutions, and that the primary objective of smart cities should be to improve the quality of life of all residents, which can only be accomplished by addressing a wide range of dimensions, such as health and transportation.

UAS's flexibility and environmental impact compared to traditional methods have positioned them as crucial tools to approach public urban challenges through smart initiatives. UAS applications in cities include monitoring and surveillance of locations, goods delivery, traffic management and infrastructure inspection. Since UAS have shown relevant potential within the smart city paradigm, it becomes relevant to evaluate the factors that influence their implementation and to develop strategies for a specific case from a multidisciplinary perspective. Porto was selected due to being one of the biggest urban centres in Portugal and its commitment to digital and green transformation.

## 2 METHODOLOGY FLOWCHART

Figure 1 illustrates the methodology flowchart used in this research.

**Figure 1 - Methodology flowchart**



Source: own elaboration

### 3 THEORETICAL CONCEPTS

#### 3.1 SWOT analysis

SWOT analysis is a simple but effective method of evaluating any process or project on four criteria: strengths, weaknesses, opportunities, and threats. A SWOT analysis is mostly used for planning and management, being a strategic tool that provides help to decision-makers in defining effective policies and improvements through the analysis of internal and external factors related to a specific project, aiming to assess its feasibility (TAHERDOOST AND MADANCHIAN, 2021; KUMAR C.R AND K.B, 2023). In strategic management, strategy development often follows the identification of SWOT factors, with a TOWS matrix being usually employed to identify various classes of strategies through the intersection of the above-mentioned criteria, as seen in Table 1.

**Table 1 - TOWS matrix framework**

	<b>Strengths (S)</b>	<b>Weaknesses (W)</b>
<b>Opportunities (O)</b>	SO strategy – Using strengths to take advantages of opportunities	WO strategy – Overcoming weaknesses by taking advantage of opportunities

<b>Threats (T)</b>	ST strategy – Using strengths to avoid threats	WT strategy – Minimize weaknesses and avoid threats
--------------------	--	---

**Source:** Adapted from SKINNER et al. (2012)

### 3.2 FAHP analysis

AHP is a multiple criteria decision-making (MCDM) method adequate for complex systems involving the selection of numerous alternatives, offering a comparative analysis of the considered options (NAGHADEHI, MIKAEIL, ATAEI, 2009). However, AHP lacks the ability to handle the ambiguity associated with human’s subjective judgement, influenced by factors like bias and incomplete information (BÜYÜKÖZKAN, ÇIFÇI, GÜLERYÜZ, 2011). The Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), which combines fuzzy logic and AHP, presents itself as a good solution for dealing with decision-making processes, as decision-makers express their judgments in the form of linguistic variables, later converted into fuzzy numbers, which reflects their subjective beliefs that are often related with uncertainty (BOŽIĆ, 2023). There are several sub-methods within the FAHP framework. The Method of Extent Analysis, proposed by Da-Yong Chang, will be applied for the case study (CHANG, 1996).

## 4 CASE STUDY – THE CITY OF PORTO

### 4.1 SWOT analysis

A SWOT analysis will be applied to qualitatively identify 20 key factors that could potentially influence the smart implementation of UAS in Porto, which will be complemented by a TOWS matrix with strategies elaborated based on the identified factors. Both analyses were performed based on a literature review that balances the most valuable insights from state-of-the-art general considerations on UAS and benefits/disadvantages specific to the city.

#### 4.1.1 Strengths

S1 - Porto as a dynamic, collaborative, digital and green ecosystem – The city has implemented various projects that fit into the concept of smart cities. “Porto Free Wi-Fi” offers wi-fi network in highly frequented areas, like parks, gardens, beaches, and buses since 2016 (DIRECTORATE-GENERAL FOR INTERNAL MARKET, accessed 8 October 2024). Other examples include “VisitPorto” – a tourism-focused platform that provides information about points of interest, “ShopInPorto” – a platform dedicated to traditional commerce, and “Explore.Porto” – a service that provides information on the specific locations the users are standing and its surroundings, real-time information on public transportation, and best routes to get anywhere at a certain time (CAMPOLARGO et al., 2021).

S2 – Highly educated, trained and experienced professionals in the field - Technologically, and even though the areas of expertise of the most



prominent drone enterprises differ to those of a smart city might typically require, Portugal is home to several drone companies composed of highly educated professionals, and the expertise of these people has consistently led the enterprises of the UAS to have the ability not only to keep up with international trends, but also innovate them (BEIRÃO, 2019). Furthermore, from a more local perspective, the University of Porto is highly regarded in several world rankings, particularly in key fields such as engineering, technology and management.

S3 - UAS lower environmental impact during operation compared to traditional methods – Studies have demonstrated that the energy consumption per package delivered by UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) can be 94% lower than traditional transportation methods, with only electric cargo bicycles generating lower greenhouse gases per package, and that drone-assisted delivery can reduce carbon emissions when compared with traditional truck delivery (MENG et al., 2023). Other studies reveal that drones are estimated to have an environmental impact that is one-twelfth of motorcycles (PARK, KIM, SUH, 2018).

S4 - UAS operational flexibility - A key advantage that can be divided in several dimensions: mission versatility – UAS can be used in urban environments in applications such as surveillance, mapping, environmental monitoring, infrastructure inspection; autonomy and control – various sensors and microprocessors enable autonomous and semi-autonomous operations; access to difficult areas – UAS can serve as a cost-effective alternative to traditional methods on several occasions, such as when road transportation is a challenge, like in areas of difficult or dangerous access.

S5 – Cost-effective and affordable operational approach – An economic assessment has shown that drones were significantly less expensive than electric and diesel trucks, while also outperforming both types of trucks in delivery time within a conceptualized delivery system established in the Swedish city of Norrköping (RAGHUNATHA et al., 2023). UAS have also been recognized as a cost-effective alternative for AED (Automated External Defibrillator) and biologic samples delivery compared to traditional transportation methods (JOHANNESSEN, 2022; RÖPER et al., 2023).

#### **4.1.2 Weaknesses**

W1 – Significant initial investment required for infrastructure – The cost-effectiveness of UAS for designated missions has been proved by several studies, though they only focus on operational contexts and ignore the funds required for infrastructure (i.e. vertiports). Vertiport costs include expenses related to land use, development and construction, large equipment, and staff acquisition (MENDONCA et al., 2022). While the size and purpose of the vertiport largely influence the effect of this factor, estimates indicate that ground infrastructure costs for a leading global city could range from USD 3.5 million to USD 12 million (SANTHA, WOODS, STREETING, 2021) – not including other infrastructure requirements.

Although this is a far more complex factor, for comparison purposes, Porto investments directly conducted by the Porto municipality in 2023 were below 15 million euros (NEVES, 2024).

W2 – Dependency on skilled operators and technicians - Most Urban Air Mobility (UAM) operations involving UAS are considered high-risk and fall under the 'certified category' defined by EASA (European Union Aviation Safety Agency). As a result, UAS operators are required to have an authorization issued by the relevant authority, and the remote pilot must hold a valid pilot license. For example, UAS operations in urban environments where U-space services are granted fall under this category. On the other hand, this weakness can be perceived as an opportunity that can be capitalized on, even though national and European authorities are currently prioritizing this issue for manned aviation, as the first UAM operations are expected to have a pilot on board.

W3 – Technical limitations related to weather dependency – The global flyability of a common drone (operational range of 0° to 40° C, maximum wind speed resistance of 10 m/s, and not suitable to fly in the rain) in Porto is expected to be around 30% in daytime only conditions (GAO et al., 2021). Strong winds are likely to be the most significant factor when evaluating weather factors that might compromise UAS operations in Porto, though further research is needed to fully understand the impact of weather in UAS operations;

W4 – Amount of time required for implementation - UAS are predicted to be integrated into the same airspace as manned aviation as soon as a multitude of requirements are met. A long and complicated process of preparation that spans across multiple dimensions is required: developing a regulatory framework, addressing potential technological limitations, developing infrastructure, obtaining certificates for aircraft, conducting training programs for operators, and improving public acceptance.

W5 – Inadequate and insufficient current legislative and regulatory landscape for UAS - The current regulations are inadequate for the anticipated scale of UAS implementation, as they are merely appropriate for low volume of UAS traffic. They do not address many essential elements required for public safety, with several entities alerting to the lack of international guidelines and regulatory frameworks. While European authorities, in collaboration with national authorities, are already working on UAS operation guidelines, conceptualizing ideas (e.g., U-space), and scheduling tests to evaluate the practicality of these initiatives, the process remains at a very early stage and urban environments are not ready for immediate UAS integration.

### **4.1.3 Opportunities**

O1 – European Union's efforts to be a pioneer in the implementation of UAS - EASA continues to issue several regulations and guidelines on UAS operations every month. EASA was also a pioneer in the publication of a

Special Condition to certify small VTOL (Vertical Take-Off and Landing) operations (EASA, 2022). A good example of European authorities' proactive approach to advancing UAM, and most specifically UAS operations, is the development of the U-Space concept, aiming at making drone operations like Beyond Visual Line-Of-Sight (BVLOS) possible and to ensure the coexistence between unmanned and manned aviation. The first real model of a U-Space within EASA's scope, which is also the first of its kind globally, is being developed in Hamburg (HAMBURG AVIATION, accessed 8 July 2024).

O2 – Integration of Porto in several European smart city initiatives – In the present, Porto is considered one of the eleven mentor cities in the Intelligent Cities Challenge, a European Commission initiative. The development of an environmental sustainability strategy, the conversion of all public lighting to LED technology, and the fact that 75% of the municipal fleet consists of electric vehicles are some of the features that contribute to Porto's high reputation (Porto - Intelligent Cities Challenge, accessed 22 May 2024). The city intends to build upon this reputation in the future, and UAS could prove to be a valuable tool in that context.

O3 – Experience acquired with UAS implementation in other contexts – Although the high-volume implementation of UAS in urban environments is still at a very early stage, the experience and knowledge gained in other contexts, both in Europe and beyond, can be crucial for an increased efficiency in this process. Even in cases where there has not yet been a practical application and only feasibility and cost-effectiveness have been tested - such as delivery systems in urban environments, which are among the most studied applications in terms of opportunities and challenges in cities - very valuable insights and knowledge can be acquired and further developed.

O4 – Job creation and business opportunities – The growth of the drone industry and the demand for pilots are drivers of job creation in this field. As the industry expands, a bigger number of professionals will be needed to design, build, maintain, and operate drones, leading to new opportunities for engineers, IT (Information Technology) professionals, and UAS operators. As a matter of fact, the Association for Unmanned Vehicle Systems International (AUVSI) states that at least 100 000 jobs for drone pilots will be created by 2025 (KA, 2023). Likewise, there is increased potential for business development not only in economic activities directly related to UAS applications, but also within the drone industry itself.

O5 – Economic growth as a door for the implementation of unmanned aviation - Porto stands as one of the leading technological and economic references in the country. While the tertiary sector remains the biggest contributor to Porto's economy, the municipality has shown commitment to diversify its economic entrepreneurial system by retaining and enhancing IT services and technological industries, aligning with one of the city's key goals: attracting investment while fostering greater

innovation and creativity within the city (CÂMARA MUNICIPAL DO PORTO, accessed 31 August 2024). The reality of economic growth and diversification, coupled with the municipality's permanent commitment to innovation, present significant opportunities for UAS integration.

#### **4.1.4 Threats**

T1 – Safety aspects and public concerns related to the application of UAS in cities – Along with infrastructure and noise, safety has been identified as a major challenge in the implementation of UAM initiatives. EASA's study on the societal acceptance of UAM (EASA, 2021) highlights safety as the leading factor mentioned in literature for unmanned aviation, aligning with the findings for UAM. When it comes to public perception on the topic, safety represents the major concern regarding the use of delivery drones, being ranked as a Top 3 concern by 44% of the respondents.

T2 – Security aspects and public concerns related to the application of UAS in cities – While security is not recognized as a major challenge in the development of UAM, the public perception on this factor is drastically different, with security being ranked as the second-biggest concern for respondents regarding drone deliveries – just behind safety (EASA, 2021). Although the literature identifies several security threats, there is a lack of countermeasures to address these threats in an effective way. Common security threats include GPS (Global Positioning System) spoofing/jamming attacks, UAV spoofing/jamming attacks, and control/data interceptions (MAJEED et al., 2021).

T3 – Privacy issues arising from UAS implementation – EASA's study and literature review on the societal acceptance of UAM highlights privacy as a significant concern regarding UAM and UAS, as it is considered the third-biggest concern among respondents regarding the use of delivery drones (EASA, 2021). Privacy concerns are often categorized in two main areas: issues related with individuals and with legislation. The former is associated with physical, location and behaviour privacy, while the latter is associated with data protection, policy and compliance issues (MEKDAD et al., 2023).

T4 – Complex and evolving legislative and regulatory landscape – While it is possible to identify similarities between T4 and W5, the present external factor is more forward-looking, as it involves potential issues related to planning and preparing for a regulatory landscape that will continue to evolve to respond to future challenges and realities, where a proactive approach is necessary and where the need to anticipate and adapt exists. Therefore, establishing a future regulatory framework that can give an efficient response to the evolving landscape of UAS technology and operations could prove to be a challenge in the future.

T5 – Potential shortage of necessary expertise due to migration of skilled talent – As of 2023, more than 25% of Portuguese individuals aged 15 to 39 years live abroad - over two-thirds of emigrants who have left Portugal

throughout the last decade fall within that age group. The proportion of qualified workers among emigrants is also increasing every year. (PENA PIRES et al., 2023). A study highlights that 81% of Portuguese employers report difficulties in filling roles, with engineering and information technology being identified as the most affected areas (MATEUS, 2024). The lack of expertise in every field related to UAS implementation can be a challenge, especially as the process reaches more advanced stages.

#### 4.1.5 TOWS matrix

Table 2 contains a proposal of a TOWS matrix for the present case of study, elaborated based on the intersection of internal and external factors identified before.

**Table 2 - Proposal of a TOWS matrix for the case study**

	<b>Strengths (S)</b>	<b>Weaknesses (W)</b>
<b>Opportunities (O)</b>	SO - Develop partnerships with existing smart city initiatives in Porto to integrate UAS operations	WO - Collaborate with European partners to secure funding and reduce investment costs
<b>Threats (T)</b>	ST - Establish a comprehensive safety and security framework to address the complexity and the evolving legislation of urban UAS operations	WT – Use the time to engage with the community and educate and inform about the benefits and safety measures of UAS operations

**Source:** own elaboration

## 4.2 FAHP analysis

### 4.2.1 Criteria and sub-criteria comparison

After the definition of SWOT criteria and sub-criteria, several respondents from different fields of knowledge have provided their opinion on the importance of each criterion and sub-criterion through comparison. Linguistic variables were then converted into triangular fuzzy numbers, as presented in Table 3.

**Table 3 - Linguistic variables for criteria comparison**

<b>Linguistic variables</b>	<b>Triangular fuzzy number</b>
Equally important	(1/2, 1, 3/2)
Slightly more important	(1, 3/2, 2)
More important	(3/2, 2, 5/2)
Much more important	(2, 5/2, 3)

**Source:** own elaboration based on GÜRBÜZ AND YALÇIN (2013)

For aggregation purposes, the weighted geometric mean was used. The geometric mean is often chosen due to its effectiveness in providing a balanced representation of the respondents' opinions while minimizing the impact of extreme values (LIU, ECKERT, EARL, 2020). A weighted version was used since the SWOT analysis was a multidisciplinary process involving various fields, and it was not possible to collect the same number of respondents for each pre-defined field - technology, urban planning, governance, legislation/regulation. The unnormalized weight ( $W$ ) assigned to each respondent ( $N$ ) was calculated by

$$W_N = \frac{f + 0.1q}{q}, \quad (1)$$

where  $f = 0.5$  for respondents from pre-defined fields and  $f = 0.15$  for respondents from fields added by respondents themselves.  $q$  represents the number of experts from a specific field.  $0,1q$  aims at adjusting the weights based on the number of experts, as some fields had a higher number of respondents. Each value of  $W$  was then normalized.

Table 4 presents the ordered list of global weights for each sub-criterion, after the process of aggregation, application of Chang's method, and multiplication of local weights calculated for each sub-criterion by the local weights associated with the corresponding criterion.

**Table 4 - Global weights for each sub-criterion**

Subcriteria	Local weight (subcriteria)	Local weight (criteria)	Global weight (subcriteria)
<b>S1</b>	0.2268	0.2507 (S)	0.0569
<b>W2</b>	0.2275	0.2421 (W)	0.0551
<b>T1</b>	0.2135	0.2519 (T)	0.0538
<b>T2</b>	0.2126	0.2519 (T)	0.0535
<b>O1</b>	0.2060	0.2554 (O)	0.0526
<b>O4</b>	0.2048	0.2554 (O)	0.0523
<b>S2</b>	0.2081	0.2507 (S)	0.0522
<b>S3</b>	0.2077	0.2507 (S)	0.0521
<b>O2</b>	0.2007	0.2554 (O)	0.0513
<b>T3</b>	0.1990	0.2519 (T)	0.0501
<b>O5</b>	0.1945	0.2554 (O)	0.0497
<b>O3</b>	0.1941	0.2554 (O)	0.0496
<b>W5</b>	0.2046	0.2421 (W)	0.0495
<b>T4</b>	0.1962	0.2519 (T)	0.0494
<b>W1</b>	0.2008	0.2421 (W)	0.0486
<b>S4</b>	0.1837	0.2507 (S)	0.0460
<b>W3</b>	0.1868	0.2421 (W)	0.0452
<b>T5</b>	0.1788	0.2519 (T)	0.0450
<b>W4</b>	0.1803	0.2421 (W)	0.0437
<b>S5</b>	0.1737	0.2507 (S)	0.0435

**Source:** Own elaboration

### 4.2.2 Strategy prioritization

Respondents have provided their opinions on the significance of each SWOT sub-criterion for the identified TOWS strategies using linguistic variables, as shown in Table 5.

**Table 5 - Significance of Each Sub-Criterion for Each TOWS Strategy**

Linguistic variables	Triangular fuzzy number
Very Low (VL)	(0, 0, 0.25)
Low (L)	(0, 0.25, 0.5)
Medium (M)	(0.25, 0.5, 0.75)
High (H)	(0.5, 0.75, 1)
Very High (VH)	(0.75, 1, 1)

**Source:** own elaboration based on Li et al. (2017)

In terms of aggregation, the weighted arithmetic mean was used instead, as the presence of a 0 would nullify the calculation. The weights used for each respondent are the same for criteria and sub-criteria comparison. After data aggregation, the Best Non-fuzzy Performance (BNP) for each case was calculated. Given a triangular fuzzy number  $M(l, m, u)$ , the associated BNP (Best Non-fuzzy Performance) is given by (RAHIMDEL; NOFERESTI, 2020):

$$BNP = l + \frac{(u - l) + (m - l)}{3} \quad (2)$$

Table 6 presents the results necessary to elaborate a ranking of strategy prioritization.

**Table 6 – BNP calculation for strategy prioritization**

Subcriteria	Global weight	BNP				Global weight × BNP			
		SO	ST	WO	WT	SO	ST	WO	WT
<b>S1</b>	0.0569	0.7275	0.6293	0.6321	0.7131	0.0414	0.0358	0.0359	0.0405
<b>S2</b>	0.0522	0.6679	0.6906	0.6239	0.7520	0.0348	0.0360	0.0325	0.0392
<b>S3</b>	0.0521	0.5843	0.5724	0.6272	0.6453	0.0304	0.0298	0.0327	0.0336
<b>S4</b>	0.0460	0.6143	0.5913	0.6300	0.5967	0.0283	0.0272	0.0290	0.0275
<b>S5</b>	0.0435	0.7283	0.5555	0.6747	0.5287	0.0317	0.0242	0.0294	0.0230
<b>W1</b>	0.0486	0.6079	0.6004	0.7325	0.5079	0.0295	0.0292	0.0356	0.0247
<b>W2</b>	0.0551	0.6074	0.6412	0.5827	0.4847	0.0335	0.0353	0.0321	0.0267
<b>W3</b>	0.0452	0.5385	0.5523	0.5214	0.4819	0.0243	0.0250	0.0237	0.0218
<b>W4</b>	0.0437	0.5847	0.6378	0.6441	0.5888	0.0256	0.0279	0.0281	0.0257
<b>W5</b>	0.0495	0.5487	0.7302	0.6432	0.5264	0.0272	0.0361	0.0318	0.0261
<b>O1</b>	0.0526	0.7509	0.6652	0.7001	0.6603	0.0395	0.0350	0.0368	0.0347
<b>O2</b>	0.0513	0.7683	0.7042	0.7080	0.6862	0.0394	0.0361	0.0363	0.0352
<b>O3</b>	0.0496	0.7018	0.7217	0.6494	0.6596	0.0348	0.0358	0.0322	0.0327
<b>O4</b>	0.0523	0.6653	0.6069	0.6817	0.6756	0.0348	0.0317	0.0357	0.0353

<b>O5</b>	0.0497	0.6754	0.6187	0.6212	0.6472	0.0336	0.0307	0.0309	0.0322
<b>T1</b>	0.0538	0.6724	0.7384	0.6296	0.6608	0.0362	0.0397	0.0339	0.0355
<b>T2</b>	0.0535	0.6886	0.6976	0.5942	0.6579	0.0369	0.0373	0.0318	0.0352
<b>T3</b>	0.0501	0.5868	0.6145	0.5659	0.6325	0.0294	0.0308	0.0284	0.0317
<b>T4</b>	0.0494	0.6419	0.6956	0.6524	0.4965	0.0317	0.0344	0.0322	0.0245
<b>T5</b>	0.0450	0.6204	0.5821	0.5805	0.5355	0.0279	0.0262	0.0261	0.0241
<b>Σ</b>	-	-	-	-	-	<b>0.6494</b>	<b>0.6438</b>	<b>0.6347</b>	<b>0.6086</b>
						<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(4)</b>

Source: Own elaboration

## 5 RESULTS ANALYSIS

### 5.1 Criteria and sub-criteria comparison

Porto's attributes as a dynamic, collaborative, digital and green ecosystem, the posture of European authorities toward UAM initiatives and UAS, and the job creation and business opportunities offered by the full-scale implementation of UAS in Porto highlight the city's potential. The technological proactivity and commitment to sustainable practices the city has demonstrated over the years, along with the efforts European authorities have been putting on the preparation of an urban environment composed of high-volume implementation operations, and the economic opportunities provided by the growth of the drone industry and by direct applications of drones have proved to be the most significant internal or external positive factors within this context.

The most relevant setbacks identified were the dependence on skilled operators, safety, security and associated public concerns. It is also noteworthy that the order of concerns regarding safety, security and privacy aligns with previous studies on these subjects, where safety consistently appears as the top challenge for public acceptance.

### 5.2 Strategy prioritization

An ordered list regarding strategy prioritization can be elaborated based on the global weights associated with each strategy:

1 – SO – Develop partnerships with existing smart city initiatives in Porto to integrate UAS operations – Promote the inclusion of a UAS implementation framework and deepen the role of UAS in the improvement of smart city capabilities. There is evidence that UAS align with Porto's path towards a dynamic and sustainable ecosystem and with the goals of a smart city due to factors like their technological features, lower environmental impact, and higher cost-effectiveness than traditional methods, consequently representing a valuable tool for increased quality of life for all citizens.

2 – ST – Establish a comprehensive safety and security framework to address the complexity and the evolving legislation of urban UAS operations – EASA is already working on a robust set of guidelines for Member States to adopt or adapt according to each reality, with the



aim of guaranteeing the safe and secure integration of UAS in cities. National authorities, in collaboration with municipal governments, must give the appropriate emphasis to the safety and security components within their jurisdiction, as the sources of safety and security risks in the world of aviation are consistently changing, making it crucial to assure these factors are effectively addressed through up-to-date regulations.

3 – WO – Collaborate with European partners to secure funding and reduce investment costs – As demonstrated in a wide range of contexts and fields, European partnerships have proved to be crucial for enhancing knowledge and providing funds. While some respondents generally do not view the significant investment in necessary infrastructure as a major setback, some have expressed some concerns towards that. As a result, establishing new collaborations between the city and European entities, as well as strengthening existing ones, can help secure funding and mitigate the effect of this internal factor.

4 – WT – Use the time to engage with the community and educate and inform about the benefits and safety measures of UAS operations – Despite being ranked last out of the four strategies identified, safety risks and the lack of openness some Europeans have shown towards UAS, as observed in EASA's studies, can be significant obstacles. The amount of time required for the full-scale implementation of UAS in urban environments can be viewed as an opportunity to raise awareness and improve public acceptance of UAS through effective communication strategies, rather than simply as a challenge.

## **6 CONCLUSION**

The findings have shown that, despite the challenges that require an efficient approach, Porto's commitment to technology, innovation and sustainability are key factors for successful UAS implementation within the smart city paradigm. This is complemented by other factors, where Europe's proactive posture towards UAM and UAS in various dimensions, such as operational regulations and ensuring a safe coexistence between UAS and manned aviation, can also play a crucial role.

However, some limitations can be identified. The degree of expertise was not considered in the aggregation process and the internal and external factors in the SWOT analysis were based solely on a literature review. Ideally, a more robust approach would involve a diversified panel of experts to first qualitatively evaluate these factors, and then proceed to a quantitative process in which the degree of expertise of respondents would be incorporated in the aggregation process.

In summary, this study aimed at providing diverse insights considering the multidisciplinary associated with the efficient implementation of UAS within a smart city framework, as numerous factors and fields of expertise need to be taken into consideration. It seeks to open the door for more research on the topic, either through similar analyses adapted to other urban environments – recognizing this is a specific case and the analyses

and strategies vary depending on social, economic, and geopolitical contexts – or through further particularization within each field.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful for the Foundation for Science and Technology's support through funding UIDB/05703/2020 from the research unit CiTUA.

## REFERENCES

- BEIRÃO, B. M. B. **O panorama dos drones em Portugal**. 2019.
- BOŽIĆ, V. **Fuzzy AHP method**. 2023. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/368576230\\_Fuzzy\\_AHP\\_method](https://www.researchgate.net/publication/368576230_Fuzzy_AHP_method)>. Accessed on: 24 June 2024.
- BÜYÜKÖZKAN, G.; ÇIĞCI, G.; GÜLERYÜZ, S. Strategic analysis of healthcare service quality using fuzzy AHP methodology. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 8, p. 9407–9424, August 2011.
- CÂMARA MUNICIPAL DO PORTO. **Economia**. Available at: <<https://www.cm-porto.pt/economia/economia>>. Accessed on: 31 August 2024.
- CAMPOLARGO, M.. Chechul al. **Supply chains, logistics, and the economics of mobility - Thematic workshop**. 3 December 2021.
- CHANG, D.-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 95, p. 649–655, 1996.
- DIRECTORATE-GENERAL FOR INTERNAL MARKET, I. E. AND SME. **European Capital and Green Pioneer of Smart Tourism**. Available at: <[https://smart-tourism-capital.ec.europa.eu/porto-2023-shortlisted-city\\_en](https://smart-tourism-capital.ec.europa.eu/porto-2023-shortlisted-city_en)>. Accessed on: 8 October 2024
- EASA. **Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe**. 2021.
- EASA. **Frequently Asked Questions on UAM**. 2022. <Available at: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam\\_-\\_faqs.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam_-_faqs.pdf)> Accessed on: 30 April 2024
- GAO, M.; HUGENHOLTZ, C. H.; FOX, T.; KUCHARCZYK, M.; BARCHYN, T.; NESBIT, P. Weather constraints on global drone flyability. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 1 December 2021.
- GÜRBÜZ, F.; YALÇIN, N. A SWOT-FAHP application for a textile firm in Turkey. Em: **Enterprise Business Modeling, Optimization Techniques, and Flexible Information Systems**. IGI Global, 2013. p. 45–57.
- HAMBURG AVIATION. **BLU-Space**. Available at: <<https://www.hamburg-aviation.de/en/uam-atlas-en/uam-atlas-projekte/blu-space-eng.html>>. Accessed on: 8 July 2024.
- JOHANNESSEN, K. A. A Conceptual Approach to Time Savings and Cost Competitiveness Assessments for Drone Transport of Biologic Samples with Unmanned Aerial Systems (Drones). **Drones**, v. 6, n. 3, 1 March 2022.
- KA, H. STUDY ON FUTURE EMPLOYMENT OPPORTUNITY AND LUCRATIVE PROFESSIONS IN VIEW OF TECHNOLOGICAL INNOVATION. **Scientific Research Journal (SCIRJ)**, v. XI, 2023.
- KUMAR C.R, S.; K.B, P. SWOT ANALYSIS. **International Journal of Advanced Research**, v. 11, n. 09, p. 744–748, 30 September 2023.
- LI, W.; YU, S.; PEI, H.; ZHAO, C.; TIAN, B. A hybrid approach based on fuzzy AHP and 2-tuple fuzzy linguistic method for evaluation in-flight service quality. **Journal of Air Transport Management**, v. 60, p. 49–64, 1 May 2017.

- LIU, Y.; ECKERT, C. M.; EARL, C. **A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements.** *Expert Systems with Applications*. Elsevier Ltd, 15 December 2020.
- MAJEED, R.; ABDULLAH, N.; MUSHTAQ, M.; KAZMI, R. Drone Security: Issues and Challenges. **IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, v. 12, n. 5, 2021.
- MATEUS, C. **Engenheiros, profissionais de saúde e técnicos da construção e indústria estão entre as profissões mais penalizadas pela emigração nacional.** 6 fev. 2024. Available at: <https://expresso.pt/economia/trabalho/2024-02-06-Engenheiros-profissionais-de-saude-e-tecnicos-da-construcao-e-industria-estao-entre-as-profissoes-mais-penalizadas-pela-emigracao-nacional-d867f399>. Accessed on: 23 August 2024
- MEKIDAD, Y.; ARIS, A.; BABUN, L.; FERGOGUI, A.; CONTI, M.; LAZZERETTI, R.; ULUAGAC, A. **A survey on security and privacy issues of UAVs.** *Computer Networks*, Elsevier B.V., 1 April 2023.
- MENDONCA, N.; MURPHY, J.; PATTERSON, M.; ALEXANDER, R.; JUÁREZ, G.; HARPER, C. **Advanced Air Mobility Vertiport Considerations: A List and Overview.** 2022.
- MENG, Z.; ZHOU Y.; LI E.; PENG, X.; QIU, R. Environmental and economic impacts of drone-assisted truck delivery under the carbon market price. **Journal of Cleaner Production**, v. 401, 15 May 2023.
- NAGHADEHI, M. Z.; MIKAEIL, R.; ATAEI, M. The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 4, p. 8218–8226, May 2009.
- NEVES, P. A. **Contas de 2023 do Município do Porto aprovadas por maioria.** Available at: <https://www.porto.pt/pt/noticia/contas-de-2023-do-municipio-do-porto-aprovadas-por-maioria>. Accessed on: 16 August 2024.
- PARK, J.; KIM, S.; SUH, K. A comparative analysis of the environmental benefits of drone-based delivery services in urban and rural areas. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 3, 20 March 2018.
- PENA PIRES, R.; VIDIGAL, I.; PEREIRA, C.; AZEVEDO, J.; MOURA VEIGA, C. **Atlas da Emigração Portuguesa.** October 2023.
- Porto - Intelligent Cities Challenge.** Available at: <https://www.intelligentcitieschallenge.eu/cities/porto-0>. Accessed on: 22 May 2024.
- RAGHUNATHA, A; LINDKVIST, E.; THOLLANDER, P.; HANSSON, E.; JONSSON, G.; Critical assessment of emissions, costs, and time for last-mile goods delivery by drones versus trucks. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, 1 December 2023.
- RAHIMDEL, M. J.; NOFERESTI, H. Investment preferences of Iran’s mineral extraction sector with a focus on the productivity of the energy consumption, water and labor force. **Resources Policy**, v. 67, 1 August 2020.
- RÖPER, J. W. A.; FISCHER, K.; BAUMGARTEN, M.; THIES, K.; HAHNENKAMP, K.; FLEßA, S. Can drones save lives and money? An economic evaluation of airborne delivery of automated external defibrillators. **European Journal of Health Economics**, v. 24, n. 7, p. 1141–1150, 1 September 2023.
- SANTHA, N.; WOODS, G.; STREETING, M. **Advanced Air Mobility — Cost Economics and Potential.** 2021.
- SKINNER, K.; HANNING, R.; SUTHERLAND, C.; EDWARDS-WHEESK, R., TSUJI, L. Using a SWOT analysis to inform healthy eating and physical activity strategies for a remote first nations community in Canada. **American Journal of Health Promotion**, v. 26, n. 6, 2012.
- TAHERDOOST, H.; MADANCHIAN, M. Determination of Business Strategies Using SWOT Analysis; Planning and Managing the Organizational Resources to Enhance Growth and Profitability. **Macro Management & Public Policies**, v. 3, n. 1, p. 19–22, 9 April 2021.



## **THE ECONOMIC IMPACT OF AN AIRPORT ON AN INSULAR REGION**

PATRÍCIO, MARIA (1); SILVA, JORGE (2); BRITO, ELIANE (3)

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR – UBI, FACULTY OF ENGINEERING / DEPARTMENT OF AEROSPACE SCIENCES, E-mail: [leonor.patricio@ubi.pt](mailto:leonor.patricio@ubi.pt)

(2) UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR – UBI, FACULTY OF ENGINEERING / DEPARTMENT OF AEROSPACE SCIENCES; CERIS-CIVIL ENGINEERING, RESEARCH AND INNOVATION FOR SUSTAINABILITY, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, E-mail: [jmrs@ubi.pt](mailto:jmrs@ubi.pt)

(3) UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR – UBI, FACULTY OF ENGINEERING / DEPARTMENT OF AEROSPACE SCIENCES, E-mail: [eliane.brito@ubi.pt](mailto:eliane.brito@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [leonor.patricio@ubi.pt](mailto:leonor.patricio@ubi.pt)

### **RESUMO**

Os aeroportos e aeródromos são infra-estruturas essenciais que contribuem significativamente para o crescimento económico regional. Estas contribuições manifestam-se através do aumento do turismo, do reforço das atividades de importação e exportação e da criação de oportunidades de emprego direta e indiretamente ligadas às operações aeroportuárias. Este estudo explora o impacto económico e de empregabilidade de um aeroporto em regiões insulares, abordando questões críticas sobre a perda de postos de trabalho e a recessão económica, no caso de um aeroporto cessar as suas operações. Os resultados desta investigação são vitais para que as partes interessadas, os investidores, o governo e empresas locais compreendam a influência do aeroporto e tomem decisões informadas sobre o desenvolvimento e investimento em infra-estruturas. Existe uma falta de informação sobre os efeitos socioeconómicos de um aeroporto nas ilhas. No entanto, este artigo fará uma revisão da literatura de estudos relacionados com o impacto económico e a empregabilidade em regiões remotas, até mesmo em determinados países, para que este efeito nas ilhas possa ser melhor compreendido. Este estudo conclui que um aeroporto tem uma influência positiva na economia e na empregabilidade de uma ilha. Uma vez que esta região não pode ter transações de bens e pessoas por meio terrestre, todos os empregos que existam por conta do aeroporto e todas as empresas relacionadas com o turismo, por exemplo, são uma grande parte do número de empregos numa ilha, e uma parte indispensável para manter o estado económico da mesma.

**Palavras-chave:** Aeroporto, Empregabilidade, Economia Insular, Impacto Económico, Desenvolvimento Aeroportuário, Âmbito Aeroportuário, Desenvolvimento Socioeconomico.

## **ABSTRACT**

*Airports and aerodromes are essential infrastructures that significantly contribute to the regional economy. These contributions manifest through increased tourism, enhanced import and export activities, and the creation of job opportunities directly and indirectly linked to airport operations. This study explores an airport's economic and employment implications in insular regions, addressing critical questions about job loss and economic downturns if an airport were to cease operations. Insights from this research are vital for stakeholders, investors, government agencies, and local businesses to comprehend the broader economic impacts of airports and make informed decisions regarding infrastructure development and investment. There is a lack of information about the socioeconomic effects of an airport on islands, however, a literature review of studies related to the economic impact and employability in remote regions will be done in this article, so this effect on islands can be better understood. This study concludes that an airport does indeed have a positive influence on the economy and employment of an island. Because this region cannot have transactions of goods and people by land, all jobs that exist in account to the airport, and all the tourism companies, for example, are a large part of the number of jobs on an island, and one of the most necessary to keep the economic status.*

**Keywords:** Airport, Employment, Insular Economy, Economic Impact, Airport's Development, Airport Scope, Socioeconomic Development.

## **1 INTRODUCTION**

Airports are essential infrastructures when it comes to transporting passengers and cargo around the world, connecting different points of the globe quickly, easily, and safely. Since air transport is usually the preferred method for this type of exchange, the airport often becomes the epicenter of the existence of people, businesses, and entities, among others.

Since the airport is usually a very important and large infrastructure, it ends up being a major (or main) employer in the region where it is located, playing an important role in the economic and social development of the locality.

It is important to understand how an airport can influence a region as a whole so that it is possible to predict what interference there would be if the airport were to expand both in terms of area and operations or even if it were to cease operations. This way, it is possible to see whether or not the region in question can be considered an *aerotropolis*.

The main objective of this article is to find a relationship between the employability of an island and the existence of an airport in the insular region, as well as to understand which factors contribute to its development.

There is no in-depth, detailed research into the impact of an airport on islands in general, be they countries, autonomous regions, or non-autonomous regions, compared to studies in continental countries and cities. It is therefore pertinent to find out if it is possible to infer whether an airport on an island is a necessity for the economy.

To this end, the methodology used in this article is based on a review of existing literature on the impact of various airports in different case studies. The studies that contributed to this review were selected by searching the keywords used for this article on search tools (for example, *Google Scholar*), and the *Web of Science* database. After gathering studies based on keywords and titles, inclusion and exclusion criteria were applied to select them. Including criteria involved selecting studies that stated employment, job creation, airport's impact on economic development in general (regionally and internationally), and studies that have case studies. The exclusion criteria were mainly focused on removing studies that consider other transport means (such as trains, buses, or others). After this selection, all studies were carefully read and identified as relevant or not for this article.

Based on this bibliography, it is possible to draw conclusions about which factors influence the regional economy in the airport sphere and infer what kind of importance an airport has on an island. The conclusions were synthesized by categorizing the different economic or social factors that can change due to the existence of an airport, such as employment, investment, tourism, and others, concluding what they have in common and how relatable they are for island cases.

This article is made up of a second chapter which gives an overview of the impact of airports and airfields on the region where they are located, the employment that this infrastructure generates in the region, and whether or not it attracts more investment to the region; chapter three presents some of the factors that have encouraged the development of this region based off case studies; chapter four presents a summary of what these factors and characteristics can be generalized and applied to island cases; followed by a fifth chapter that concludes the study.

## **2 ECONOMIC IMPACTS OF THE AIRPORTS**

### **2.1 Development of Tourism**

It is known that the existence of an airport contributes to the regional economy, by creating new jobs, putting a region "on the map" by airlines and their itineraries, and attracting more tourists as well as new businesses.

The authors BUTTON, Kenneth; TAYLOR, Samantha (2000) presented a system where the impact of a service (the airport, in this case) can be

considered depending on the type of effect that it has on the region: primary effects, secondary effects, tertiary effects, and perpetuity effects. The primary effects are those that have a direct effect on the local community by creating that new service or changing it, these effects immediately impact the regional economy – these are associated with companies and employment; the secondary effects, compared to the last case, are longer-term effects for the economy because they do not affect the economy immediately, being the more continuous flow of income and depending on the airport's operations; the tertiary effects are the result of companies, firms, and other businesses and individuals taking advantage of international air transport, as they are mostly geographically mobile; the perpetuity effects are mainly about the acceleration of economic growth and self-sustaining economy of a region, due to investment, migration of businesses to that location, and new economy activities, making this effects the longer term effects. Understanding these different types of effects that a service may have on a region is important when analyzing the impact of an airport on its area.

As the authors ELBURZ, Zeynep; NIJKAMP, Peter; PELS, Eric (2020) state, airports are crucial in facilitating tourism and trade activities. The existence of an airport that is not only for cargo trade is immediately associated with tourism, since it contributes to the mobility for residents, promoting cultural exchange and tourism for the locality (HAKFOORT, Jacco; POOT, Tom; RIETVELD, Piet. 2001).

The air transport industry is essential in a global economy, as said by BUTTON, Kenneth; TAYLOR, Samantha (2000) in the iconic phrase "International air transport is an essential ingredient for the success of tourism in many countries and regions". The influx of tourists contributes to the regional economy by increasing the demand of services and stimulating job creation (SONNENBURG, Fabian; BRAUN, Boris. 2017). With this logic and definitions, not only is tourism a direct consequence of having an airport, especially if it is an international airport, but is also a cause for long-term effects on the local economy. HAKFOORT, Jacco; POOT, Tom; RIETVELD, Piet (2001) defend that the tourism and the economic impacts that the airport provides to a city may also affect nearby cities, so bigger airports, with international services and more offers of services can affect the whole country's economy, for example.

On the whole, tourism is an inevitable consequence of having an airport, being a positive influence on the economy by demanding particular services that will boost the local economy in various ways.

## **2.2 Direct and indirect employability**

It is important to quantify the employment generated by a service or infrastructure and how that activity impacts the regional economy, to understand how significant it is for a region where that service exists.

It is impossible to project, build, maintain, and operate an airport without massive job creation. Either one of these steps implies a significant creation of job positions for successful management and operations.

Airports can be considered big infrastructures where there are the most diverse businesses and companies. As long as airports exist, there are a lot of companies that only exist because of it, not only in the airport facilities but also outside the airport area. Many companies and businesses can exist without an airport, but its presence is the key to developing these businesses and expanding their operations. Therewith, air transport is a pivotal determinant of employment in a country (ELBURZ, Zeynep; NIJKAMP, Peter; PELS, Eric. 2020).

Regarding employment, efficient air transport and better connectivity can reduce regional disparities since they provide more employment opportunities in peripheral areas, contributing to economic development with more balance traversing regions (NEDEVA, Keranka; GENCHEV, Evgeni. 2018). In addition, some studies believe that around 30% of airport-generated jobs can be filled by citizens who were unemployed before (ROBERTSON, John. 1995), and those job positions contribute to and promote long-term employment stability (NEDEVA, Keranka; GENCHEV, Evgeni. 2018).

Airports contribute significantly to employment in many sectors, often these infrastructures are the larger single employer in a region (ROBERTSON, John. 1995). A key factor in boosting employability is the increased flow of tourism, described before, as it leads to a higher demand for particular services (NEDEVA, Keranka; GENCHEV, Evgeni. 2018). The authors GADGIN, Matha; GOLDSTEIN, Patricio; LU, Jessie (2020) presented some pertinent points explaining different implications for job creation and how the volume of passengers would affect the distribution of employees by sector and distance from the airport. They concluded that there are urban centers next to airports that can be a cluster of employment opportunities, and those contribute to a significant part of the total country's employment, considering airports job centers and economic hubs (GADGIN, Matha; GOLDSTEIN, Patricio; LU, Jessie. 2020). Other than that, the whole region benefits from the airport to increase the number of businesses and job positions.

With that information is simple to gather that there are different types of employment originated or promoted by the airport, and can be divided into two major definitions: direct employment and indirect employment. Direct and indirect employment are very common definitions when talking about the impact of a service on a local economy, especially when issuing an airport, where there are so many strings attached to its services.

Beginning with direct employment, direct employment is a job position that exists strictly because of the existence of the airport itself, meaning all jobs that would not exist at all if the airport ceased operations. Direct jobs can be found inside the building of the airport, in the terminals, retail services, food and beverages, ground handling, airlines staff, security staff,



customer service, administration (ELBURZ, Zeynep; NIJKAMP, Peter; PELS, Eric. 2020), air traffic management, jobs created when expanding the runways, for example (NEDEVA, Keranka; GENCHEV, Evgeni. 2018), maintenance technicians, engineers, information technology support staff, financial and accounting sectors, among many others (ROBERTSON, John. 1995).

Issuing indirect employment, any job that prevails in sectors and services connected to the airport, that grows because of the airport and is considered necessary as a consequence of the existence of the airport, but does not remain directly inside the airport's infrastructure is considered indirect job positions. Examples of this type of job can be any position or role present in the following businesses: hospitality services, logistics companies (ELBURZ, Zeynep; NIJKAMP, Peter; PELS, Eric. 2020), car rental, parking services, local businesses, warehousing, travel agencies, tour operators, restaurants and bars (ROBERTSON, John. 1995), producers and manufacturers, and logistics parks (GADGIN, Matha; GOLDSTEIN, Patricio; LU, Jessie. 2020).

In summary, when analyzing the impact of an airport on a region regarding employment, it is important to consider that there are predominantly two types of employment, being them directly or indirectly linked to the airport's infrastructure. Being direct or indirect jobs does not change the fact that the airport is a massive job center in a region, and can be considered a main employer there.

### **2.3 Attraction of Investments and Economic Projects**

There are different types of investment when it comes to breaking down the investment attracted by an airport. These investments can be in the airport itself or in other businesses that may exist or expand because of the existence of the airport. Any investment inside or outside of the airport area can count as a perpetual effect on the economy since it contributes for economic growth and goes towards expanding businesses and capital (BUTTON, Kenneth; TAYLOR, Samantha, 2001). Some studies in this matter consider the attraction of investment the Spillover Effect (ELBURZ, Zeynep; NIJKAMP, Peter; PELS, Eric. 2020), being positive when investment is successfully attracted.

Many investors are interested in finding businesses and areas to invest in, near an airport. There are several studies defending that when an airport is built in some area, it automatically impacts the real estate appreciation and stimulates the development – investment - of services and other infrastructures like hotels, restaurants, leisure areas, health-care centers, and many others (ROMANÍ FERNÁNDEZ, J.; SURINACH CARALT, J.; VAYÁ VALCARCE, E. 2023), which impacts directly the regional economy.

A visible example of the attraction of investment and economic projects is the *Aerotropolis*. In the definition, "an *Aerotropolis* is an airport-centered urban economic region that rapidly connects high-end manufacturers and business services to their global suppliers, marketplaces and

enterprise partners." (KASARDA, John. 2021), these airports are usually characterized by being an international hub, attracting all different kinds of investment for the metropolitan area. Zhengzhou Airport in China is a perfect example of how a modest area with an airport focused primarily on domestic services could switch to a seven-terminal airport, in a region with investment from high-tech companies like smartphones and innovative vehicles, biomedicine, aviation schools, among others (KASARDA, John. 2021).

A different approach to investment is presented by the authors JUDIANTONO, Tonny; SARASWATI, Wahyu Budiyono. 2021, where they study how the investment directly applied on the airport's infrastructure can also influence the economy of a locality. The study proposes that when an airport's infrastructure is invested in, it leads to job creation in airport-related services because it relates more investment with more operations in the airport (JUDIANTONO, Tonny; SARASWATI, Wahyu Budiyono. 2021). This research is followed up by a practical case on small islands in Indonesia to support the conclusions.

On the other hand, investing in the aviation sector can be tricky for policymakers, stakeholders, and investors. BREIDENBACH, Philipp (2019) concluded that policymakers and investors must be careful when investing in airport facilities because it does not necessarily impact the economy of that area positively when we consider regional airports, as his study.

It is also interesting to analyze that an airport can be a cause of restructuring the economy of the metropolitan area around it, essentially because the growth in high-tech and modern industries can result in a massive shutdown or decline of traditional jobs (SONNENBURG, Fabian; BRAUN, Boris. 2017).

Summarizing, the presence of an airport is something some companies seek when finding a place to start or invest in, especially in sectors like the tourism sector, logistics, and technologies that benefit connectivity and internationalization; it also can boost the development of the local structure such as improving access roads, public transportation, and others (ROMANÍ FERNÁNDEZ, J.; SURIÑACH CARALT, J.; VAYÁ VALCARCE, E. 2023).

### **3 STUDY CASES: WHAT ARE THE VARIABLES THAT AFFECT THE REGION?**

Some studies have already been published regarding analyzing and acknowledging an airport in a city, county, country, or island. Some of those studies are done based on an employment impact, others count on other types of variables, such as community development, local business growth, investments, and tourism development. Following in this chapter there will be presented some examples of what aspects – that exist because of the existence of an airport - would impact the region regarding employment or other important socio-economic characteristics, based on different study cases.

Evidence from Turkey on regional development (ELBURZ, Zeynep; NIJKAMP, Peter; PELS, Eric. 2020) states that the air passenger volume impacts significantly regional employment in the country. The significant and positive influence of air passenger volume on regional employment in Turkey shows the importance of air transportation infrastructure for stimulating economic activity and job creation across various regions in the country (ELBURZ, Zeynep; NIJKAMP, Peter; PELS, Eric. 2020).

It is interesting to acknowledge that the existence of an airport in a certain region also impacts the population. A study done on regional accessibility and social development in Norway (HALPERT, BRATHEN, 2011) proves that there is a strong connection between the presence of an airport with the decision of residents to continue living in that region, as 70% of the participants of that study said they agree that they are more likely to continue living in the region as a result of having a local airport (HALPERT, BRATHEN, 2011, p. 1152).

Other factors directly impact the local economy creating a more objective and equational relation between itself and employment: a study done by BILOTKACH, Volodymyr (2015) reveals that passenger traffic volume can be a variable for the economy. This study shows that passenger traffic volume affects employment and the average wage, but does not affect the number of establishments that exist in that location (BILOTKACH, Volodymyr. 2015). This author also concludes that the number of destinations served by non-stop flights impacts the economy, since this increases the number of job positions, the number of businesses, and the average wage in general. Like that, the regional economy is predictable by the number of non-stop destinations offered by the local airport. In conclusion, the study of BILOTKACH, Volodymyr (2015) shows that attracting services to new destinations can have a larger impact on the local economy than expanding services to existing destinations.

Unfortunately, as stated before, there is a lack of studies on insular regions regarding the impact that aviation has on them, so there is not much relevant information on the topic. Therefore, since there are not many case studies specifically on islands, it is very hard to define what the variables that contribute to this research are.

#### **4 ANALYSIS AND DISCUSSIONS**

Islands are regions where the importance of air transportation is very straightforward. Being maritime transport and air transport are the only options to exchange cargo and people, air transport quickly becomes a preference for people exchange since it is faster, and sometimes the only option. That way, air transport automatically turns out to be a very significant portion of an island's economy.

After understanding what causes may impact the economy of certain areas in general, it is possible to deduce what factors can be considered in cases when that area is specifically an island.

Attracting private investment is a very important factor for the island's development, so there is investment in the development of new and better services to attract more tourism and help residents settle on the islands. Attracting public investment in airports' infrastructure and related businesses is also important for meeting the needs of the population and help fixing the population in the insular region. Not only residents would experience more quality of life – by taking advantage of new and different services – but also by having more opportunities for job positions across many different sectors, and higher average wages (BILOTKACH, Volodymyr. 2015).

Investment in the aeronautical sector is also an incentive to promote the self-sustainability of the island, a self-sustainability that results from a good local economy, which can be increased positively by the development of tourism and employability. Investing in the airport's infrastructure guarantees that there are more employment opportunities for citizens, as stated before, directly in the airport, leading to even more job creation in indirect employment (JUDIANTONO, Tonny; SARASWATI, Wahyu Budiyo. 2021).

It is pertinent to understand that in some cases there is a likelihood that the demand for services and job positions will be so high that the airport will become the main employer on an island (directly or indirectly), and it may be necessary to obtain foreign labor to meet the demand since islands can have limited resources in one way or another.

Considering and stipulating that airports on islands are usually regional and smaller than international airports in capital cities, for example, small airports definitely do not have the same level of impact as large hubs, when taking into consideration absolute data; but they play a crucial role in the development and support of a local economy (BUTTON, Kenneth; DOH, Soogwan; YUAN, Junyang. 2019). International hubs also exist most of the time in large metropolitan areas, where airports do contribute to urban growth but their influence on that area is very variable and can be considered weak (APPOLD, Stephen J. 2015). APPOLD, Stephen J. 2015 claims that the more populous a metropolitan area is, the weaker the impact that an airport there has on the employment of that area.

## **5 CONCLUSION**

In conclusion to this article, airports play a huge part in a region's economy. Being economic hubs, air transport has a positive impact on any region's socio-economic balance, contributing massively to employment and the creation of new businesses.

Using the analyses carried out in other case studies is a good way of characterizing what type of airport investment should be made for each case, using the causes and consequences addressed by different studies as a basis for what might happen in the desired practical case. For example, increasing the supply of non-stop flights to different destinations might increase the number of job positions, but if the aim is to increase the

number of businesses established, increasing passenger volume may not be the best choice (BILOTKACH, Volodymyr. 2015).

Realizing that an island may depend more exclusively on tourism and the investment that comes with it, compared to a mainland town, is crucial to the development of its economy so the insular region, since it could not have the means and conditions to support itself and its population without air transport. The employment generated by airports on an island is so significant that if it were to cease operations, an island could face an immediate shutdown in its economy. Although airports play a huge part in the development of an insular region, it is up to the political and urbanistic sectors to guarantee a development plan that positively affects the sustainable development of an island, ensuring a balance between environmental regulations and economic growth.

It is very interesting to further study the impact of an airport on islands in different issues, for example, exploring the relationship between airports and the environmental impacts they might have on islands, the relationship between airports and people's quality of life, and relevant differences that an island economy may face when comparing the cases of it having a private airport versus a public airport, could be pertinent future researches.

### **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors are grateful for the Foundation for Science and Technology's support through funding UIDB/05703/2020 from the research unit CiTUA.

### **REFERENCES**

APPOLD, Stephen J. The impact of airports on US urban employment distribution. **Environment and Planning A**, V. 47, p. 412-429. 2015.

BILOTKACH, Volodymyr. Are airports engines of economic development? A dynamic panel data approach. **Urban Studies Journal**, Vol. 52(9), p. 1577-1593. 2015.

BREIDENBACH, Philipp. Ready for take-off) The economic effects of regional airport expansions in Germany. **Regional Studies**, 2019.

BUTTON, Kenneth; DOH, Soogwan; YUAN, Junyang. **The role of small airports in economic development**. 2019.

BUTTON, Kenneth; TAYLOR, Samantha. International Air Transportation and Economic Development. **Journal of Air Transport Management** 6 (2000), p.209-222. 2000.

ELBURZ, Zeynep; NIJKAMP, Peter; PELS, Eric. **Air Transport and Regional Development: Evidence from Turkey**. January, 2020.

GADGIN, Matha; GOLDSTEIN, Patricio; LU, Jessie. **Air Transportation and Regional Economic Development: A Case Study for the New Airport in South Albania**. Working Papers, Center for International Development at Harvard University. 2020.

HAKFOORT, Jacco; POOT, Tom; RIETVELD, Piet. The Regional Economic Impact of an Airport: The Case of Amsterdam Schiphol Airport. **Regional Studies**, 35:7, p.596-604. 2001.

HALPERN, Nigel; BRATHEN, Svein. Impact of airports on regional accessibility and social development. **Journal of Transport Geography** 19 (2011), p. 1145-1154. Molde University College, 6402 Molde, Norway.

JUDIANTONO, Tonny; SARASWATI, Wahyu Budiyo. ANALYSIS OF AEROTROPOLIS IN SMALL ISLANDS. **Journal of Engineering Science and Technology** Vol. 16, No. 5, p. 3651-3668. 2021.

KASARDA, John. **The making of an Aerotropolis – China's Zhengzhou Airport**. Cargo Airports & Airline Services, Winter 2021.

NEDEVA, Keranka; GENCHEV, Evgeni. Air Transport – A Source of Competitive Advantages of the Region. **Marketing and Branding Research** 5, p. 206-216. 2018.

ROBERTSON, John. Airports and economic regeneration. **Journal of Air Transport Management**, Vol. 2, Issue 2, p. 81-88. 1995.

ROMANÍ FERNÁNDEZ, J.; SURIÑACH CARALT, J.; VAYÁ VALCARCE, E. Efectos económicos asociados a las ciudades aeroportuarias. El caso del aeropuerto Josep tarradellas – Barcelona – El Prat. **Investigaciones Regionales – Journal of Regional Research**. P. 51-68, 2023.

SONNENBURG, Fabian; BRAUN, Boris. Impact of airports on spatial patterns of metropolitan employment: The case of Australia. **ERDKUNDE** Vol. 71, No. 4, p. 287-300. 2017.



## **A NOVEL CONCEPT FOR AIRFOIL MORPHING WITH A COMPOSITE MATERIAL SKIN**

UKOLOV, EGOR (1); GAMBOA, PEDRO (2)

(1) C-MAST-UBI, E-MAIL: [EGOR.UKOLOV@UBI.PT](mailto:EGOR.UKOLOV@UBI.PT)

(2) C-MAST-UBI, E-MAIL: [PGAMBOA@UBI.PT](mailto:PGAMBOA@UBI.PT)

### **ABSTRACT**

The conventional aircraft design process results in a compromise solution for wings geometry, achieving compliance with all design requirements and ensuring satisfactory performance across its entire envelope of operation. Consequently, the aircraft may operate under sub-optimal conditions in its performance in various flight regimes. This work presents a novel concept to execute airfoil camber and wing spar to trailing-edge section thickness morphing, which has the potential to be applied in small-to-medium size UAVs, utilizing two servomotors and a composite material skin. A case study using the "NACA 4418" airfoil was conducted with XFOIL to evaluate the potential aerodynamic benefits of implementing the mechanism. The results show that it is possible to increase the lift-to-drag ratio of the original airfoil over a considerable range of lift coefficients. Additionally, the concept was compared with equivalent deflections of conventional hinged surfaces, such as ailerons and plain flaps, and the results indicate that the concept achieves an 88% superior maximum lift-to-drag ratio and a 12% superior maximum lift coefficient.

**Keywords:** Morphing, Airfoil, Camber, Trailing-edge Thickness.

### **1 INTRODUCTION**

The conventional aircraft design process typically prioritizes optimizing wings geometry for a specific flight condition which dominates its operational envelope. However, achieving compliance with all design requirements and ensuring satisfactory performance across the entire envelope of operation often necessitates compromises. Consequently, while a compromise solution is obtained, the aircraft may operate under sub-optimal conditions in some flight regimes. This challenge has led to the development of morphing wing technologies.

The term "morphing" derives from "metamorphosis" and is associated with enhancing systems by providing them with additional capabilities to adapt to external changes [1]. Wing morphing specifically refers to the continuous and smooth alteration of the wings' geometrical shape during operation, enhancing the control authority, flight performance, and multi-mission capability of an aircraft [2-5]. It can be categorized based on the

morphing's degree-of-freedom [4,6]: wing planform geometry, out-of-plane deformation, and airfoil morphing.

Focusing on airfoil morphing applied to small-to-medium size Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), studies have concluded that it could have a big impact and enhance UAV's performance across its different flight phases, such as cruise, loiter, turn and take-off [3,9]; reduce the installed power requirement, thus offering greater operational flexibility, an expanded operational envelope, and sustained manoeuvrability at low speeds [7]; and could achieve larger lift-to-drag ratios than the conventional hinged mechanisms, such as ailerons [8]. However, these benefits are limited by the associated weight increase, which can outweigh the advantages, as well as by the added complexity, cost, and potential reliability issues, which are the primary reasons for its limited implementation.

Barbarino et al. [4], Sofla et al. [6] and Majid et al. [10] conducted a state-of-the-art review on airfoil morphing concepts and mechanisms for UAVs. Some approaches use elastomer skins to enable airfoil camber and thickness variations [11-14], while others employ compliant mechanisms [15-17], mechanical systems [13, 23-31], smart materials-based systems [14, 18-22], or a combination of these. Using elastomer materials in the skin requires a pre-tensioned configuration to withstand aerodynamic loads, which introduces creep phenomenon and reduces the skin's structural life as it deforms. Compliant mechanisms typically suffer from stress concentration effects in the compliant regions [32]. Mechanical systems are far from being optimized for lightweight applications, can create surface discontinuities, and are complex to implement, often necessitating additional systems such as hydraulic or pneumatic actuators. Similarly, smart materials-based concepts also have limitations: shape memory alloys require additional heating and cooling systems, leading to slower actuation, and the implementation of piezoelectric materials can significantly increase structural weight, nearly doubling it in some cases [21]. Despite these challenges, these solutions hold potential for implementation in UAVs, provided their limitations are adequately addressed.

For the given reasons associated with airfoil morphing implementation, a new solution may be proposed to overcome them. The primary objective of this work is to present a novel airfoil morphing concept suitable for small-to-medium size UAVs. This concept aims to feature a simple and fast actuation system, a composite material non-elastomer skin, and a fail-safe behaviour, effectively addressing some of the limitations of existing mechanisms.

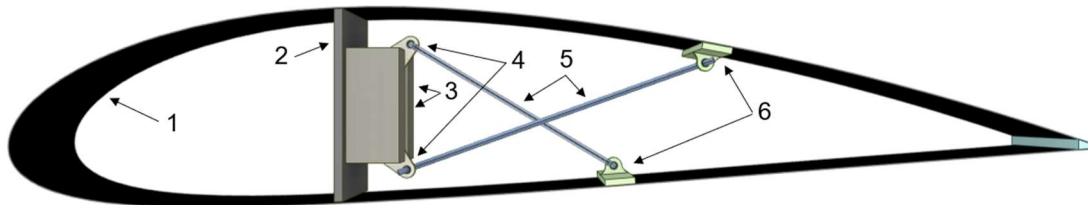
The methodology for evaluating the proposed concept involves a numerical simulation using the Finite Element Method (FEM) in Ansys. Different actuation forces are applied to the wing structure, and the resulting airfoil geometries produced by morphing are analysed in XFOIL to assess the potential aerodynamic benefits.



## 2 PROPOSED AIRFOIL MORPHING CONCEPT

The proposed airfoil morphing concept, illustrated in Figure 1, consists of a wingbox and a morphing extension of the wing structure. The wingbox comprises the wing spar and the skin extending from it to the leading-edge, forming the fixed geometry of the airfoil. The morphing portion of the airfoil features a composite material skin actuated by two servomotors – one controlling the upper surface and one the lower surface. The trailing-edge allows for constrained relative movement between the upper and lower skins, permitting the variations of the surfaces' slopes relative to each other at the trailing-edge. The control horns of the servomotors and the stringers have a hinged connection to the control rods, transmitting the rotational movement of the control horns into translational motion of the stringers.

**Figure 1 – Proposed airfoil morphing concept: 1 – skin, 2 – wing spar, 3 – servomotors, 4 – control horns, 5 – control rods, 6 - stringers**



In this concept, the position of the wing spar along the wing's chord, the placement of the stringers, and the thicknesses of the upper and lower surface skins can all be adjusted. Consequently, this concept allows for the adaptation of these parameters to achieve the desired aerodynamic and structural characteristics of the wing. It is also important to note that the actuators can vary; for example, linear actuators may serve as suitable alternatives to servomotors.

The position of the wing spar determines the extent of morphing possible for the airfoil. The placement of the stringers controls the specific actuation points, resulting in different airfoil geometries and associated aerodynamic benefits. Each servomotor's torque enables either independent or coordinated actuation. The thickness of the skin, particularly on the upper surface, influences its ability to maintain its shape when actuated and affects how the lower surface skin actuation impacts its shape. When designing the skin thickness to withstand aerodynamic loads, it is essential to consider the position of the wing spar and the connections of the control rods, as these rods, together with the servomotors, can function as structural elements, thereby reducing the overall wing weight. Additionally, the potential for actuator failure must be considered; the skin should be designed to withstand aerodynamic loads in such scenarios. The number of actuators per unit wing span also requires careful consideration during the design process.

### 3 CASE STUDY

To demonstrate the potential aerodynamic benefits of the proposed airfoil morphing concept, a case study is presented and discussed in this chapter.

#### 3.1 Characteristics

The characteristics of the case study are detailed in Table 1, which shows the positions of the wing structural elements relative to the airfoil's chord.

**Table 1 – Case study characteristics**

Airfoil	"NACA 4418"
Wing spar placement	30.0 %
Upper surface stringer placement	65.0 %
Lower surface stringer placement	55.0 %
Upper surface skin thickness	0.45 mm
Lower surface skin thickness	0.30 mm
Airfoil chord	250.0 mm
Wing panel span	200.0 mm

#### 3.2 Materials

The materials used in the computational model of the structure are as follows:

- Skin: Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) – epoxy resin "L" with "W300" hardener and unidirectional carbon fibre with a weight of  $100 \text{ g/m}^2$ ;
- Upper and lower surface skins connection at the trailing-edge: condensation-cure silicone rubber "CS25".

The wing spar and stringers are modelled as rigid bodies in the numerical computations, while the other components (servomotors, control horns, and control rods) are excluded from the model. This approach focuses primarily on investigating the structural displacements of the concept's skin and the resulting airfoil geometries.

The material properties for the CFRP (manufactured with a 60% fibre volume and cured in a vacuum chamber) were obtained following the recommendations of the "ASTM D 790" standard [33] and are presented in Table 2. The properties of the silicone rubber are detailed in Table 3.

**Table 2 – CFRP properties**

Property	Unit	Value
Flexural strength	MPa	388.1
Flexural modulus	GPa	48.9

**Table 3 – Silicone rubber properties**

Property	Unit	Value
Young's modulus	MPa	0.505
Tensile strength	MPa	4.0
Elongation at break	%	525.0
Poisson's ratio	–	0.35

Source: [34,35]

### 3.3 Methodology Description

#### 3.3.1 Ansys FEM Analysis

The FEM computations of the wing panel structure are conducted using Ansys [36]. Different actuation forces are applied to the stringers, with forces distributed along the span. The skin is modelled using regular shell-type finite elements. Mesh refinement studies are performed to ensure that the mesh does not significantly affect the structural displacements. Specifically, the maximum trailing-edge deflection is used as a reference; the mesh is considered adequate when the result varies by less than 1.0 % compared to the deflection obtained with the previous mesh, as the consequent new mesh has an increased number of finite elements. Once the computations for each case are completed, the resulting airfoil geometries are determined from the centre-panel nodal displacements.

Regarding actuation forces, these are directed from the stringer connections to the opposite skin connections at the wingbox. A study was conducted to determine the maximum applicable distributed forces on the stringers for the present case study. The findings indicate that a maximum distributed force along the wing span is 90 N/m for simultaneous actuation of both skins, and 100 N/m when only one skin is actuated.

The FEM computations apply a boundary condition that fixes all six degrees-of-freedom (three linear displacements and three rotational movements in a 3D space) at the wing spar and the non-actuated stringer. Additionally, the option for large deflections is enabled.

#### 3.3.2 XFOIL Analysis

The airfoil geometries obtained from the FEM analysis are evaluated using XFOIL [37]. This analysis focuses on key aerodynamic parameters: lift coefficient,  $C_l$ , lift-to-drag ratio,  $C_l/C_d$ , and pitching moment coefficient,  $C_m$ . Evaluations are conducted for Reynolds numbers,  $Re$ , of  $250 \times 10^3$ ,  $500 \times 10^3$ , and  $1 \times 10^6$ .

A comparison of the aerodynamic performance of the presented morphing concept with conventional hinged surfaces (CHSs), such as ailerons and plain flaps, is conducted. The comparison uses the morphing configuration with maximum actuation forces applied to both stringers. Two equivalent deflections for the CHSs,  $\delta_{HS}$ , are considered: one corresponding to an equal trailing-edge perpendicular-to-chord

displacement value relative to the airfoil's chord,  $d_{TE}$ , and the other corresponding to an equal increase in lift coefficient at zero angle-of-attack ( $\alpha$ ),  $\Delta C_{l,\alpha_0}$ . For the CHSs, two cases are examined: one with a chord ratio of 15.0 % and another with a chord ratio of 30.0 %.

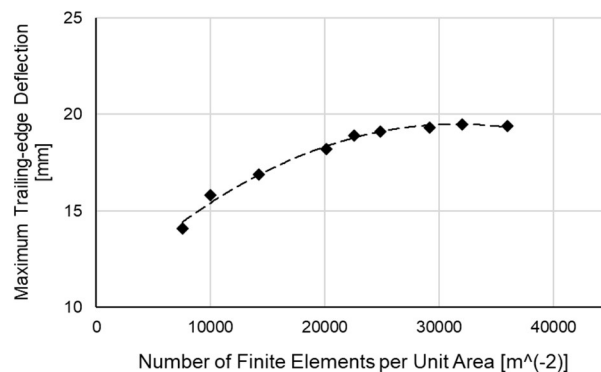
## 4 RESULTS

### 4.1 Mesh Analysis

The maximum trailing-edge deflection, considering the maximum applied distributed forces, was determined for various numbers of finite elements per unit area in the morphing skin. Figure 2 illustrates the trailing-edge deflections obtained for different finite element distributions.

Consequently, the value of  $24.9 \times 10^3$  finite elements per unit area is used for the FEM computations.

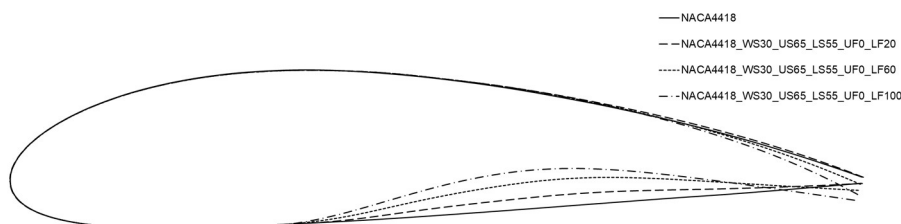
**Figure 2 – Maximum trailing-edge deflection as a function of the number of finite elements per unit area**



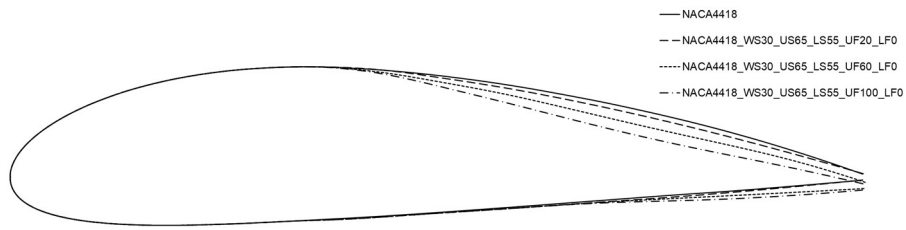
### 4.2 Morphing Airfoil Geometries

The airfoil geometries resulting from morphing are presented in Figures 3 to 5. The nomenclature used for these geometries follows this template: "OriginalAirfoil\_WS\_US\_LS\_UF\_LF". This naming convention starts with the original (before morphing) airfoil's name, followed by the wing spar placement (WS), upper surface stringer placement (US), and lower surface stringer placement (LS), all expressed as percentages of the airfoil's chord. It also includes the upper (UF) and lower (LF) surfaces distributed forces (given in N/m).

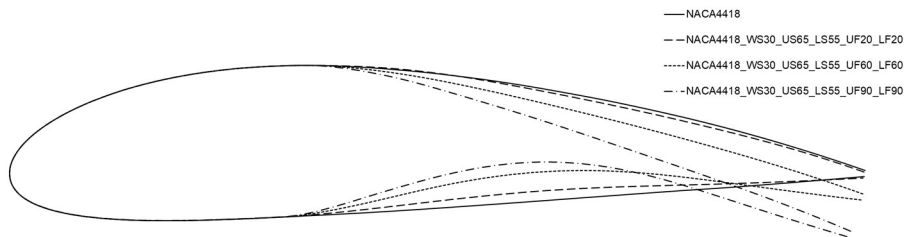
**Figure 3 – Airfoil geometries for lower surface actuation**



**Figure 4 – Airfoil geometries for upper surface actuation**



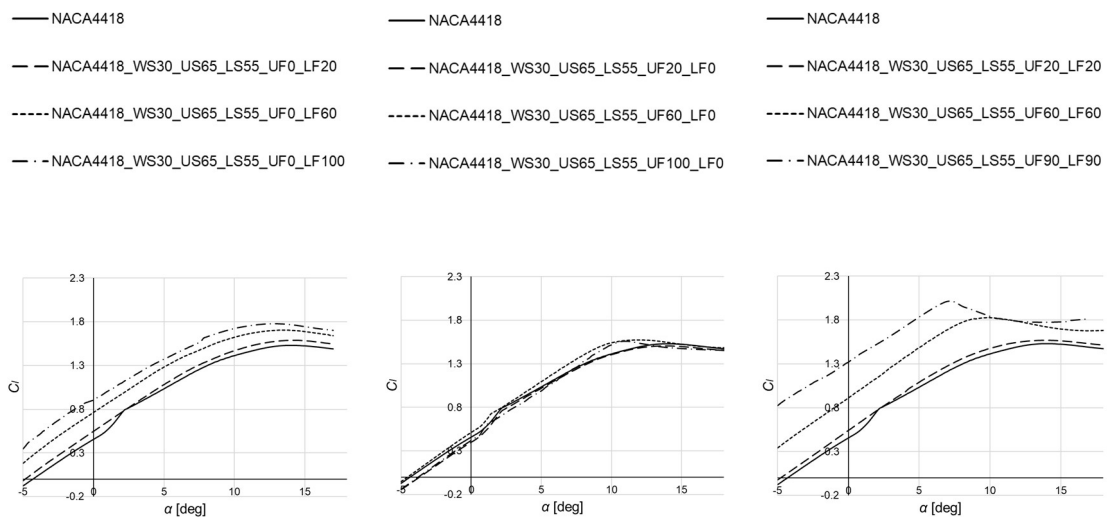
**Figure 5 – Airfoil geometries for lower and upper surfaces simultaneous actuation**



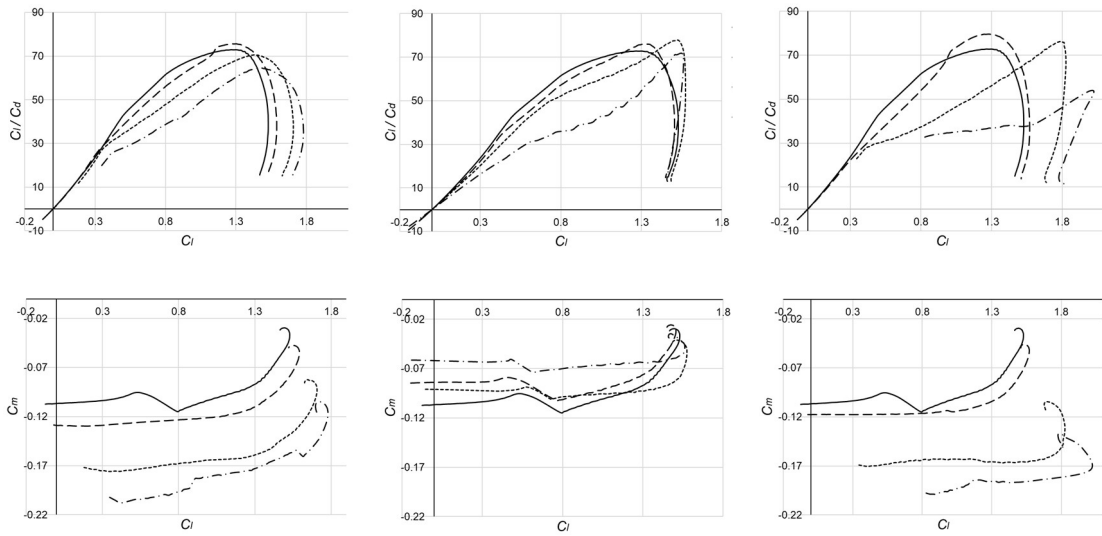
### 4.3 Aerodynamic Coefficients

Figures 6 to 8 illustrate the airfoils' aerodynamic performance metrics. Specifically, they show the lift coefficient as a function of the angle-of-attack, lift-to-drag ratio as a function of the lift coefficient, and pitching moment coefficient as a function of the lift coefficient, for the analysed Reynolds numbers.

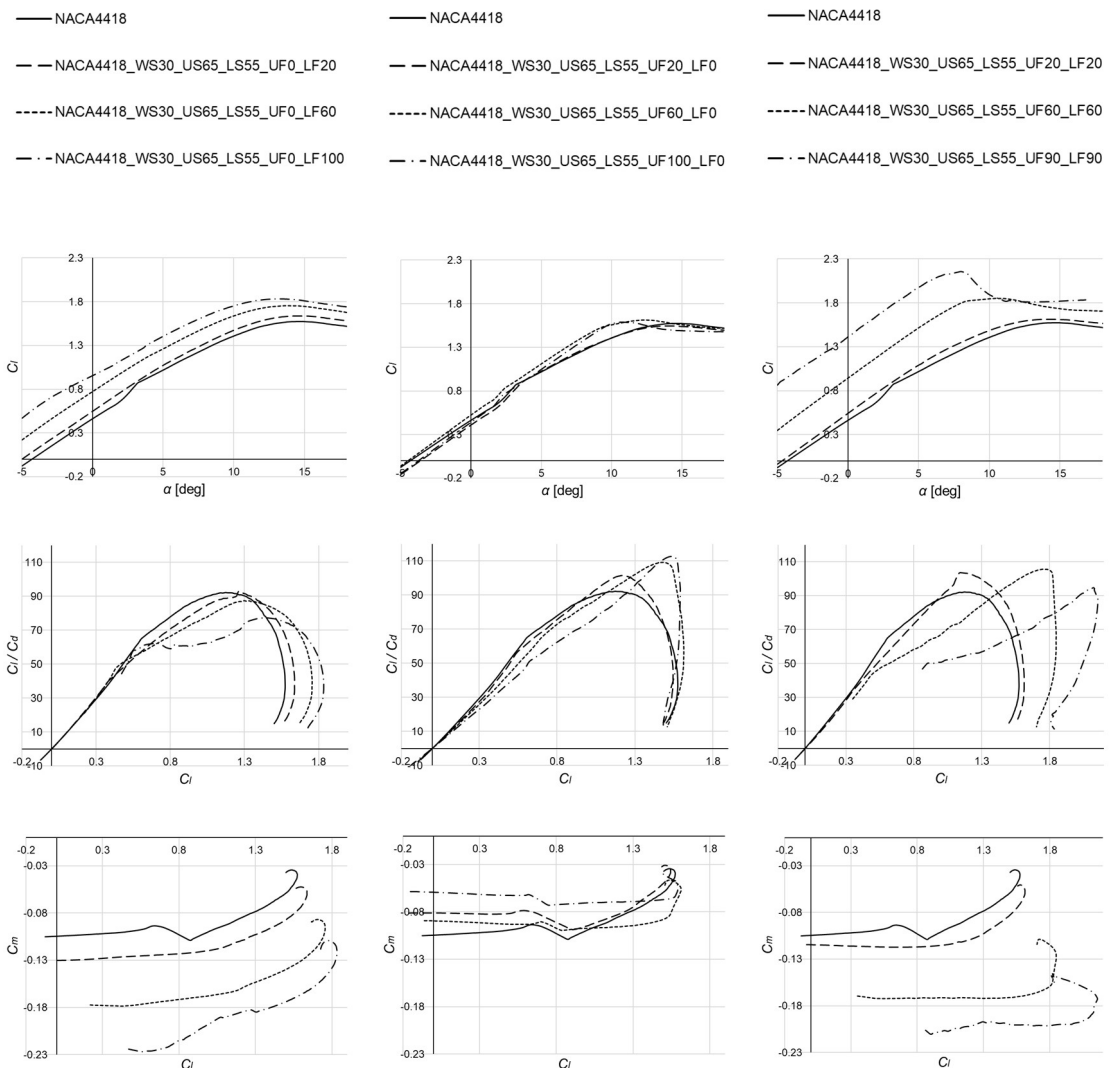
**Figure 6a – Airfoils' aerodynamic performance metrics for  $Re = 250 \times 10^3$**



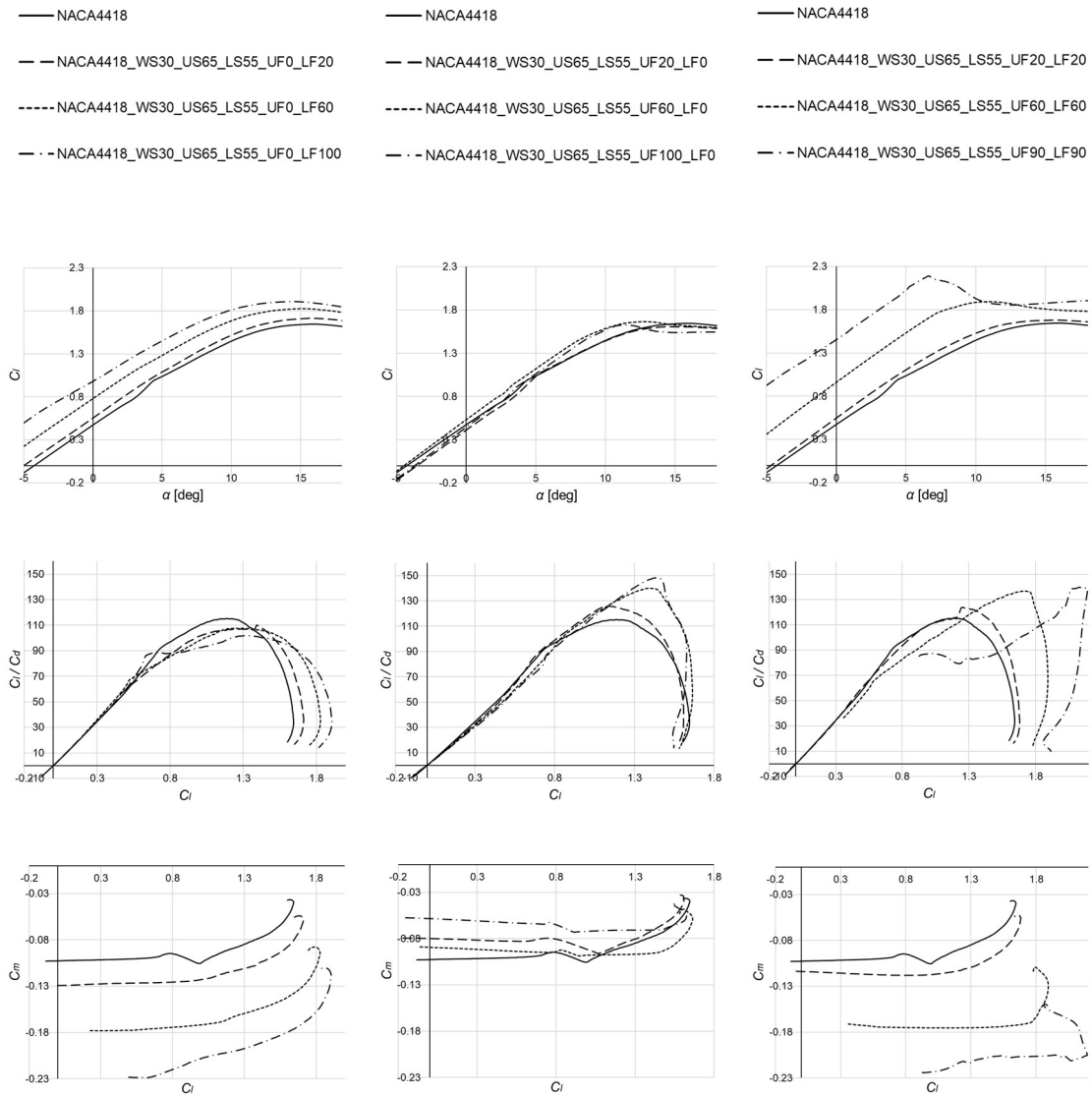
**Figure 6b – Airfoils' aerodynamic performance metrics for  $Re = 250 \times 10^3$**



**Figure 7 – Airfoils' aerodynamic performance metrics for  $Re = 500 \times 10^3$**



**Figure 8 – Airfoils' aerodynamic performance metrics for  $Re = 1 \times 10^6$**



#### 4.4 Conventional Hinged Surfaces

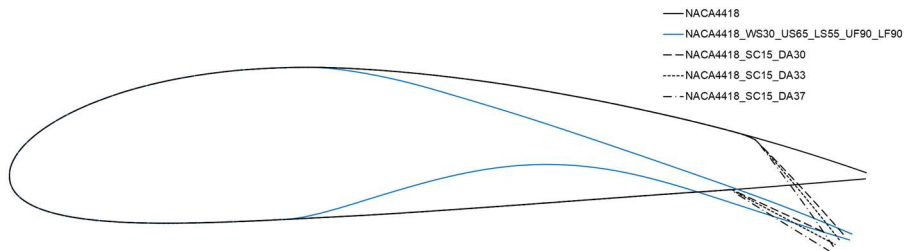
Table 4 presents the equivalent CHSs deflections required to match the trailing-edge perpendicular-to-chord displacement value relative to the airfoil's chord and an equal increase in lift coefficient at zero angle-of-attack of the morphing case with maximum applied distributed forces on both the upper and lower skins.

**Table 4 – Equivalent CHSs deflections**

Case	Equivalent $\Delta C_{l,\alpha_0}$			Equivalent $d_{TE}$		
	$\Delta C_{l,\alpha_0}$	$\delta_{HS} [deg]$		$d_{TE} [\%]$	$\delta_{HS} [deg]$	
$c_{HS} = 15\%$		$c_{HS} = 30\%$	$c_{HS} = 15\%$		$c_{HS} = 30\%$	
$Re$						
$250 \times 10^3$	0.88	33.0	23.0	7.7	30.0	14.0
$500 \times 10^3$	0.96	37.0	26.0			
$1 \times 10^6$	1.00	37.0	27.0			

Figures 9 and 10 show the airfoils with the obtained equivalent CHSs deflections for surfaces with chord ratios of 15.0 % and 30.0 %, respectively. The nomenclature for these airfoils follows this template: “OriginalAirfoil\_SC\_DA”, where the name begins with the original airfoil’s designation, followed by the CHS chord percentage (SC) and its deflection angle (DA) in degrees.

**Figure 9 – Airfoil geometries for CHSs with a 15.0 % chord ratio**



**Figure 10 - Airfoil geometries for CHSs with a 30.0 % chord ratio**

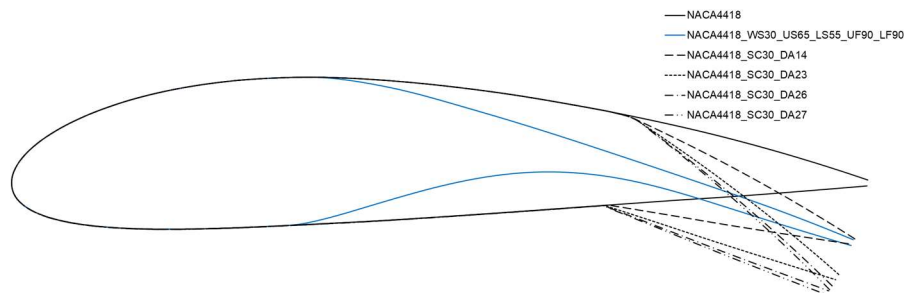


Figure 11 shows the analysed aerodynamic coefficients for both the CHSs case and the morphing airfoil.

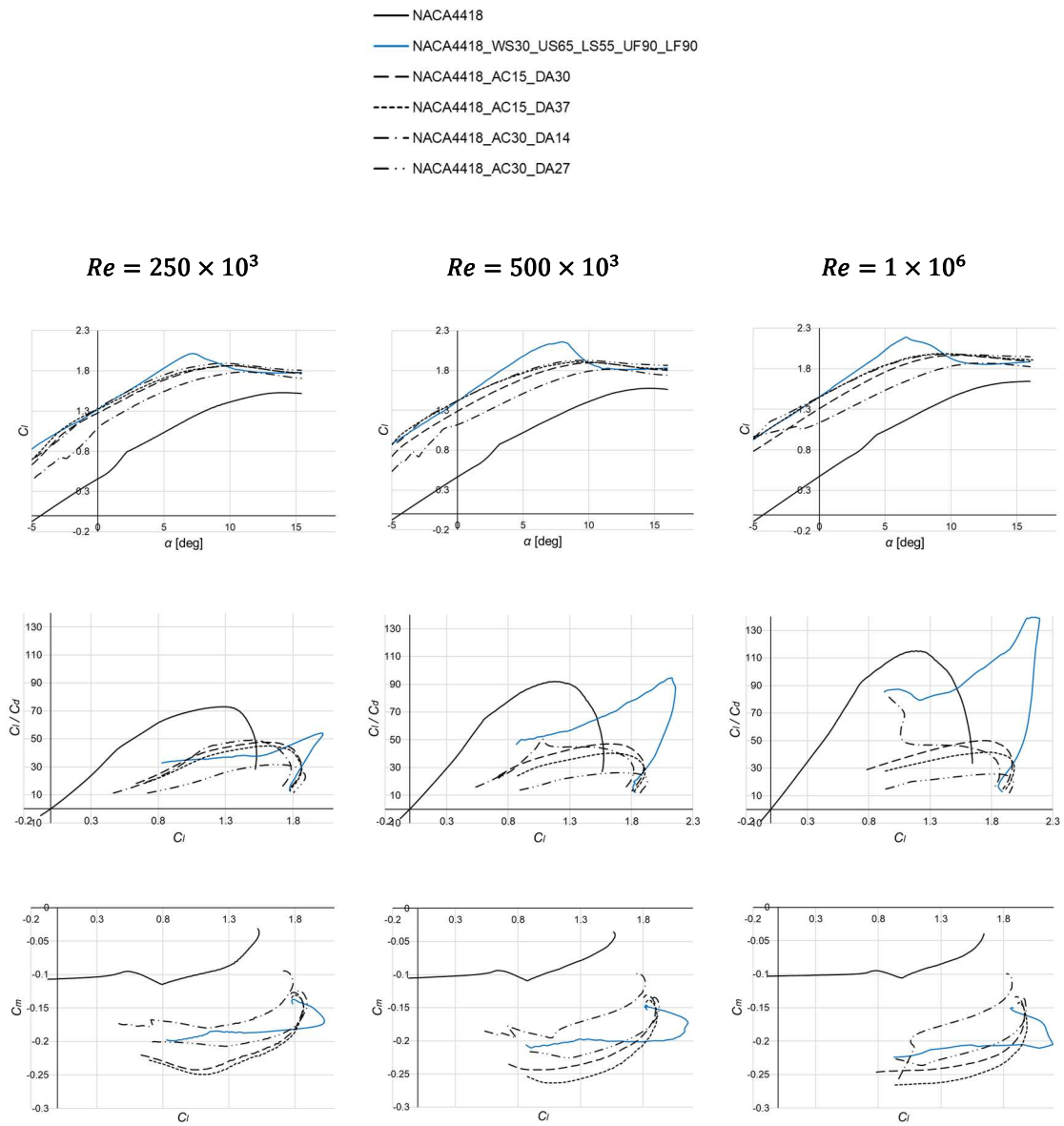
Finally, Table 5 presents the maximum values of the lift coefficient, lift-to-drag ratio, and the corresponding pitching moment coefficient at the lift coefficient that maximizes lift-to-drag ratio for the “NACA 4418” airfoil. Table 6 provides a comparison of these parameters between the morphing airfoil and the CHS case (selecting the case that maximizes each parameter), along with the relative increase or decrease (in absolute value) compared to the “NACA 4418” values.

**Table 5 – “NACA 4418” aerodynamic coefficients**

$Re$	NACA 4418		
	$250 \times 10^3$	$500 \times 10^3$	$1 \times 10^6$
Maximum $C_l/C_d$	72.8	92.1	115.2
Maximum $C_l$	1.53	1.57	1.64
$C_m$ at maximum $C_l/C_d$	-0.0875	-0.0880	-0.0912



**Figure 11 – Morphing and CHSs airfoils' aerodynamic performance metrics**



**Table 6 – Morphing and CHS airfoil aerodynamic coefficients**

<i>Re</i>	<i>Morphing</i>			<i>Conventional Hinged Surface</i>		
	$250 \times 10^3$	$500 \times 10^3$	$1 \times 10^6$	$250 \times 10^3$	$500 \times 10^3$	$1 \times 10^6$
<i>Maximum <math>C_l/C_d</math></i>	54.0 (-25.8 %)	94.6 (+2.7 %)	139.7 (+21.3 %)	49.5 (-32.0 %)	50.4 (-45.3 %)	81.5 (-29.3 %)
<i>Maximum <math>C_l</math></i>	2.00 (+30.7 %)	2.16 (+37.6 %)	2.19 (+33.5 %)	1.89 (+23.5 %)	1.93 (+22.9 %)	1.99 (+21.3 %)
<i><math>C_m</math> for maximum <math>C_l/C_d</math></i>	-0.1748 (+99.8 %)	-0.1855 (+110.8 %)	-0.2073 (+127.3 %)	-0.1636 (+87.0 %)	-0.1948 (+121.4 %)	-0.2561 (+180.8 %)

## 4.5 Results Discussion

The results show that actuating the lower surface increases the lift coefficient of the original airfoil across the operational range of angles-of-attack at all studied Reynolds numbers. While this actuation slightly reduces the lift-to-drag ratio, it allows for maintaining high lift-to-drag ratios at larger lift coefficients. Additionally, this actuation results in an increase (in absolute value) in the pitching moment coefficient.

Actuating the upper surface allows for a small increase in the maximum lift coefficient and maintains it approximately equal to the original airfoil's at lower lift coefficients. This actuation also increases the maximum lift-to-drag ratio of the airfoil while simultaneously reducing the pitching moment coefficient.

Simultaneous actuation of both surfaces combines and amplifies the effects described for each separate actuation, resulting in a larger maximum lift coefficient and a larger maximum lift-to-drag ratio. However, the pitching moment coefficient remains similar to that observed with the lower surface actuation alone. As the Reynolds number increases, both the maximum lift coefficient and maximum lift-to-drag ratio improvements become more pronounced, also allowing the original lift-to-drag ratio to be maintained at lower lift coefficients when the upper surface is actuated independently.

Comparing the morphing concept with CHSs with equivalent deflections, the morphing concept achieves larger maximum lift coefficients and greater lift-to-drag ratios across the operational range of angles-of-attack, except at the lowest Reynolds number. Additionally, the morphing concept results in lower pitching moment coefficients for intermediate lift coefficients. This demonstrates that the morphing concept offers superior performance compared to CHSs at higher Reynolds numbers, with the performance advantage increasing as the Reynolds number rises. Importantly, the use of CHSs would generate more drag due to the need for external components, whereas the morphing concept is fully integrated within the structure of an UAV, maintaining a smooth wing surface without discontinuities.

## 5 CONCLUSIONS

The present work introduced a novel concept for wing morphing in the airfoil component and demonstrated its potential aerodynamic benefits using the "NACA 4418" airfoil in a case study.

In summary, the concept achieves a 28.8 % increase in maximum lift-to-drag ratio compared to the original airfoil, resulting in a 22.5 % decrease in the corresponding pitching moment coefficient. Additionally, it enables a 37.6 % larger maximum lift coefficient. Practical applications of this concept could include reducing the take-off distance of a UAV and potentially lowering the installed power requirements. The concept could also enhance UAV's performance during flights in turn and allow efficient

flight at lower airspeeds. This morphing capability would enable the UAV to expand its operational envelope by adapting the airfoil geometry to suit different flight conditions. While implementing this morphing concept may increase the UAV's weight, it could be integrated without a significant weight penalty since conventional UAVs already use electrical systems and servomotors for control.

Future work on the morphing concept should involve studying its application to other airfoils, particularly those with lower relative thicknesses, to understand its influence on aerodynamic coefficients. Additionally, practical implementation should be explored to assess the concept's manufacturability and real-world functionality.

## REFERENCES

- [1] CONCILIO, A. et al. **Morphing wing technologies: large commercial aircraft and civil helicopters**. Oxford; Cambridge, Ma: Butterworth-Heinemann, An Imprint Of Elsevier, 2018.
- [2] WEISSHAAR, T. A. **Morphing Aircraft Technology - New Shapes for Aircraft Design**. 2006.
- [3] JOSHI, S. et al. Comparison of Morphing Wing Strategies Based upon Aircraft Performance Impacts. **45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference**, 2004.
- [4] BARBARINO, Silvestro et al. A Review of Morphing Aircraft. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 22, no. 9, p. 823-877, 2011.
- [5] AJAJ, Rafic M.; BEAVERSTOCK, Christopher S.; FRISWELL, Michael I. Morphing aircraft: The need for a new design philosophy. **Aerospace Science and Technology**, vol. 49, p. 154-166, 2016.
- [6] SOFLA, A. Y. N. et al. Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges. **Materials & Design**, vol. 31, no. 3, p. 1284-1292, 2010.
- [7] SECANELL, M.; SULEMAN, A.; GAMBOA, P. Design of a Morphing Airfoil Using Aerodynamic Shape Optimization. **AIAA Journal**, vol. 44, no. 7, p. 1550-1562, 2006.
- [8] MAJID, Tuba; JO, Bruce W. Comparative Aerodynamic Performance Analysis of Camber Morphing and Conventional Airfoils. **Applied Sciences**, vol. 11, no. 22, 2021.
- [9] JO, Bruce W.; MAJID, Tuba. Enhanced Range and Endurance Evaluation of a Camber Morphing Wing Aircraft. **Biomimetics**, vol. 8, no. 1, p. 34, 2023.
- [10] MAJID, Tuba; JO, Bruce W. Status and Challenges on Design and Implementation of Camber Morphing Mechanisms. **International Journal of Aerospace Engineering**, vol. 2021, p. 1-14, 2021.
- [11] BARTLEY-CHO, Jonathan D. et al. Development of High-rate, Adaptive Trailing Edge Control Surface for the Smart Wing Phase 2 Wind

- Tunnel Model. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 15, no. 4, p. 279-291, 2004.
- [12] WOODS, Benjamin KS; BILGEN, Onur; FRISWELL, Michael I. Wind tunnel testing of the fish bone active camber morphing concept. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 25, no. 7, p. 772-785, 2014.
- [13] AUSTIN, Fred et al. Static shape control for adaptive wings. **AIAA Journal**, vol. 32, no. 9, p. 1895-1901, 1994.
- [14] BARBARINO, Silvestro; DETTMER, Wulf; FRISWELL, Michael. Morphing trailing edges with shape memory alloy rods. **21<sup>st</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADAPTIVE STRUCTURES AND TECHNOLOGIES (ICAST)**. Pennsylvania, 2010.
- [15] SHILI, Liu; WENJIE, Ge; SHUJUN, Li. Optimal Design of Compliant Trailing Edge for Shape Changing. **Chinese Journal of Aeronautics**, vol. 21, no. 2, p. 187-192, 2008.
- [16] ZHANG, Yaqing et al. Design of compliant mechanism-based variable camber morphing wing with nonlinear large deformation. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, vol. 16, no. 6, 2019.
- [17] JENSEN, Peter Dørffler Ladegaard et al. Topology Optimization of Large-Scale 3D Morphing Wing Structures. **Actuators**, vol. 10, no. 9, p. 217, 2021.
- [18] CADOGAN, David; SMITH, Tim. Morphing inflatable wing development for compact package unmanned aerial vehicles. **AIAA SDM ADAPTIVE STRUCTURES FORUM**. Dover, 2004.
- [19] LIM, Sahng Min et al. Design and demonstration of a biomimetic wing section using a lightweight piezo-composite actuator (LIPCA). **Smart Materials and Structures**, vol. 14, no. 4, p. 496-503, 2005.
- [20] PARADIES, Rolf; CIRESA, Paolo. Active wing design with integrated flight control using piezoelectric macro fiber composites. **Smart Materials and Structures**, vol. 18, no. 3, p. 035010, 2009.
- [21] BILGEN, Onur et al. A novel unmanned aircraft with solid-state control surfaces: Analysis and flight demonstration. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 24, no. 2, p. 147-167, 2012.
- [22] GRIGORIE, T. L.; BOTEZ, R. M.; POPOV, A. V. How the Airfoil Shape of a Morphing Wing Is Actuated and Controlled in a Smart Way. **Journal of Aerospace Engineering**, vol. 28, no. 1, 2015.
- [23] COUTU, D. et al. Experimental validation of the 3D numerical model for an adaptive laminar wing with flexible extradados. **18<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE OF ADAPTIVE STRUCTURES AND TECHNOLOGIES**. Ottawa, 2007.

- [24] CAMPANILE, L. F.; SACHAU, D. The Belt-Rib Concept: A Structronic Approach to Variable Camber. **Journal of Intelligent Materials Systems and Structures**, vol. 11, no. 3, p. 215-224, 2000.
- [25] WU, R. et al. A morphing aerofoil with highly controllable aerodynamic performance. **The Aeronautical Journal**, vol. 121, no. 1235, p. 54-72, 2016.
- [26] MEGUID, S. A.; SU, Y.; WANG, Y. Complete morphing wing design using flexible-rib system. **International Journal of Mechanics and Materials in Design**, v. 13, n. 1, p. 159–171, 2015.
- [27] ZHAO, A. et al. Structural design and verification of an innovative whole adaptive variable camber wing. **Aerospace Science and Technology**, v. 89, p. 11–18, 2019.
- [28] SUN, X. et al. Design and validation of a variable camber wing structure. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 37, n. 2, p. 1–11, 2024.
- [29] FASEL, U. et al. Composite additive manufacturing of morphing aerospace structures. **Manufacturing Letters**, v. 23, p. 85–88, 2020.
- [30] MOULTON, B.; HUNSAKER, D. F. 3D-Printed Wings with Morphing Trailing-Edge Technology. **AIAA Scitech 2021 Forum**, 2021.
- [31] JIA, S. et al. Wind Tunnel Tests of 3D-Printed Variable Camber Morphing Wing. **Aerospace**, v. 9, n. 11, p. 699, 2022.
- [32] WAGG, D. et al. **Adaptive Structures: Engineering Applications**. John Wiley & Sons, 2008.
- [33] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D790-17 – Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International, 2017.
- [34] SOARES, R. M. V. Design of a Variable Camber Flap for Air Cargo Challenge Aircraft. 2020. Thesis (Master's in Aeronautical Engineering) – Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- [35] EASYCOMPOSITES. **CS25 Condensation Cure Silicone Rubber**. Available at: <https://www.easycomposites.co.uk/cs25-condensation-cure-rtv-silicone-rubber>. Accessed: 12 July 2024.
- [36] ANSYS. **Ansys**. Available at: <https://www.ansys.com/>. Accessed: 19 Aug. 2024.
- [37] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. XFOIL: Subsonic Airfoil Development System. Available at: <https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>. Accessed: 19 Aug. 2024.



## **ANÁLISE DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO LEO / MEO PARA OPTIMIZAR A TRANSMISSÃO DE DADOS NA AVIAÇÃO**

RODRIGUES, TAYNA G. (1); REIS, ANTONIO D. (2); VELEZ, FERNANDO J. (3)

(1) Instituto de Telecomunicações e UBI, E-mail: [gurupy.rodriques@ubi.pt](mailto:gurupy.rodriques@ubi.pt)

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: [adreis@ubi.pt](mailto:adreis@ubi.pt)

(3) Instituto de Telecomunicações e UBI, E-mail: [fjv@ubi.pt](mailto:fjv@ubi.pt)

### **RESUMO**

Este trabalho consiste em estudar e analisar um conjunto de modelos de comunicação entre satélites e aviões, explorando novas tecnologias LEO (Low Earth Orbit)/ MEO (Medium Earth Orbit). Por muitas décadas, os aviões dependiam só de sistemas de comunicações no solo, como o NDB (Non-Directional Beacon), cujas estações terrestres transmitem numa só direcção, e o VOR (Very high frequency Omnidirectional radio Range), cujas estações transmitem em todas as direcções. Estes sistemas, operam na banda dos 118 MHz – 137 MHz, estão a ficar obsoletos e, sobretudo nos vãos transcontinentais, têm vindo a ser substituídos por comunicações via satélite. Estas comunicações já possibilitam que os passageiros possam utilizar telemóveis a bordo. A órbita terrestre é a rota de movimento dos satélites naturais ou artificiais em volta da Terra. Há quatro tipos de órbitas para satélites de comunicação que são: GEO (Geostationary Earth Orbit), com uma altitude de 36000 km da Terra, LEO, com uma altitude de 500km a 1500 km, MEO, com uma altitude de 10400 km e a HEO (Highly Elliptical Orbit), com uma altitude elíptica, entre 1000 km (próximo) e 39000 km. Esta investigação foca-se nas comunicações de satélites LEO / MEO, assim como na integração com as futuras redes 5G. Através de uma simulação com a ferramenta Ansys STK, cujo objectivo é analisar os parâmetros críticos da ligação ascendente (UL) e também ligação descendente (DL), num contexto de comunicação de satélite para avião e de avião para satélite, respetivamente, estudou-se como diferentes condições meteorológicas afetam a comunicação. Verificou-se que a degradação na qualidade da comunicação apenas ocorreu logo após o satélite começar a comunicação com o avião e imediatamente antes de ocorrer o handover. Foram sugeridas também técnicas de mitigação, como a utilização de satélites redundantes, técnicas de modulação adaptativa, diversidade de frequência.

**Palavras-chave:** Comunicação, Órbitas, Satélites LEO, Aviões.

## ABSTRACT

*This work consists of studying and analyzing some models of communications between satellites and aircraft by exploring new LEO (Low Earth Orbit) / MEO (Medium Earth Orbit) technologies. For many decades, aircraft have relied solely on ground-based communications systems, such as the NDB (Non-Directional Beacon), whose ground stations transmit in only one direction, and the VOR (Very high frequency Omnidirectional radio Range), whose stations transmit in all directions. These systems, which operate in the 118 MHz - 137 MHz band, are becoming obsolete and, especially on transcontinental flights, have been replaced by satellite communications. These communications already allow passengers to use cell phones on board. Earth orbit is the route of movement of natural or artificial satellites around the Earth. There are four types of orbits for communication satellites: GEO (Geostationary Earth Orbit) with an altitude of 36000 km from Earth, LEO with an altitude of 500km to 1500 km, MEO with an altitude of 10400 km and HEO (Highly Elliptical Orbit) with an elliptical altitude between 1000 km (near) and 39000 km. This research focuses on LEO / MEO satellite communications, as well as integration with future 5G networks. Through a simulation with the Ansys STK tool, the aim has been to analyze the critical parameters of the uplink (UL) and downlink (DL), in a context of satellite-to-airplane and airplane-to-satellite communication affected by different weather conditions. It was found that the degradation in communication quality only occurred shortly after the satellite began communicating with the plane and just before the handover occurred. Mitigation techniques such as redundant satellites, adaptive modulation techniques and frequency diversity have been suggested.*

**Keywords:** Communication, Orbits, LEO Satellites, Airplanes.

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho pretende analisar e estudar os sistemas de comunicação para transmissão de dados entre satélites e aeronaves. As tentativas de voar começaram na antiguidade, com a observação dos pássaros, sendo difícil determinar quem exatamente descobriu o avião. No entanto, dois grandes marcos na história da aviação foram fundamentais: em 1903, os irmãos Wright construíram um protótipo controlado, motorizado, mais pesado que o ar e capaz de voar com piloto a bordo; e em 1906, Santos Dumont, um dos pioneiros da aviação, fez o primeiro voo público de um avião, o 14-Bis, que decolou por seus próprios meios, o primeiro com motor a gasolina, e portanto sem auxílio externo no Campo de Bagatelle, em Paris. Em 1922, Gago Coutinho e Sacadura Cabral, num hidroavião, realizaram a primeira travessia aérea do Atlântico Sul, de Portugal para o Brasil.

A necessidade de estabelecer orientações, com rotas dirigidas para o destino, surgiu logo no início da navegação aérea. As rotas iniciais

tinham desvios em zigzag consideráveis, para permitirem pousos intermédios de abastecimento, entre a origem e o destino.

Na década de 1940, surgiu a navegação orientada por radiofrequência, começou pela NDB (Non Directional Beacon), que é uma rádio AM no solo que, em vez de AM, transmite sinais de grau em grau entre 0° e 360°. Depois foi inventada a VOR (VHF Omnidirectional Range) que é omnidirecional, de maior alcance e de maior precisão que a anterior. Ela permite que o piloto escolha um rumo. Baseia-se em torres terrestres estrategicamente colocadas nas rotas desejadas. Foi criado o HFDL (High Frequency Data Link) que é um protocolo de ligação de dados entre estações terrestres e aeronaves. A banda VHF de Telecomunicações Aeronáuticas (118-137 MHz) tem 760 canais, cada um ocupando 25 kHz, ou seja,  $118 + 760 \times 0.025 = 137$  MHz. A banda FM (87.5-108 MHz) pode criar espúrias e interferir. Apresenta-se uma torre terrestre, ou de solo, de controlo de tráfego aéreo na Figura 1 [1].



**Figura 1 Estação de solo VOR na Alemanha, extraída de [44]**

As estações de solo não podem ser colocadas nos mares profundos. Então nos anos 1950 surgiu a navegação inercial, que usava a direção de rotação da Terra e o giroscópio. Depois foi usada a navegação inercial e auxílio do GPS principiante. Só depois, surgiu o GPS (Global Position Satellite) que foi desenvolvido após a guerra do Golfo, como se apresenta na Figura 2 [2].

Posteriormente, surgiu o PBN (Performance Base Navegation) que é um aperfeiçoamento do GPS. As aeronaves foram tendo cada vez mais autonomia de voo, percorrendo longas distâncias sem abastecimento. Simultaneamente, surgiram mais variedades de satélites para além dos GEO (Geostationary Earth Orbit), por exemplo, LEO (Low Earth Orbit) e MEO (Medium Earth Orbit).

Neste trabalho, para além de se abordarem as torres terrestres, dá-se uma atenção adicional às comunicações por satélite LEO, com especial destaque para a constelação Starlink de Elon Musk. Aborda-se como as condições atmosféricas afetam a comunicação de canal descendente (*downlink*) e canal ascendente (*uplink*). Finalmente, discutem-se os resultados e apresentam-se as conclusões.





**Figura 2 Comunicação de estações de solo e aeronaves, através de satélite**

## **2. COMUNICAÇÕES, CAMADAS ATMOSFÉRICAS E CLIMA**

Os satélites recebem e transmitem em frequências da banda L (1.530 GHz a 1.6605 GHz), quando se comunicam com as aeronaves, e em frequências da banda C (3.76 GHz a 6.425 GHz) quando se comunicam com estações de solo. A UIT (União Internacional de Telecomunicações) está preocupada com a possível interferência do 5G.

Há vários tipos de interferências, tais como as ondas electromagnéticas do sol, interferência de outros satélites, e terrestres, casuais e intencionais. Destacamos as interferências das camadas atmosféricas e do clima. Mais recentemente, na banda intermédia (acima de 7 GHz), que é também utilizada para comunicações via satélite, por exemplo, a banda Ku, também se começam a suportar comunicações celulares.

### **2.1. As camadas atmosféricas afectam as comunicações**

As ondas em radiofrequência quando atravessam as camadas atmosféricas, apresentadas na Figura 3 [3], sofrem perturbações, nomeadamente interferências. A ionosfera é transparente para estas frequências, mas pode reflectir ondas de rádio.

Os satélites LEO estão em órbita a uma altura entre 500 km a 1500 km e um período de revolução de 1h 30m a 2h. Os MEO estão a uma altura de 10400 km e um período de revolução de 6h. Os GEO estão a uma altura de 36000 km e um período de revolução de 23h 56m, ou seja, fixo em relação à Terra.

### **2.2. As condições meteorológicas afectam as comunicações**

As condições climáticas podem interferir tanto no sinal terra – satélite como no sinal satélite - aeronave. A maioria das aeronaves civis voa na troposfera, onde na parte mais baixa podem haver nuvens, como se apresenta na Figura 4 [4]. A chuva intensa pode interferir nas comunicações entre a estação terrestre, o satélite e a aeronave.



Figura 3 As ondas em radiofrequência atravessam diversas camadas até ao satélite [47]

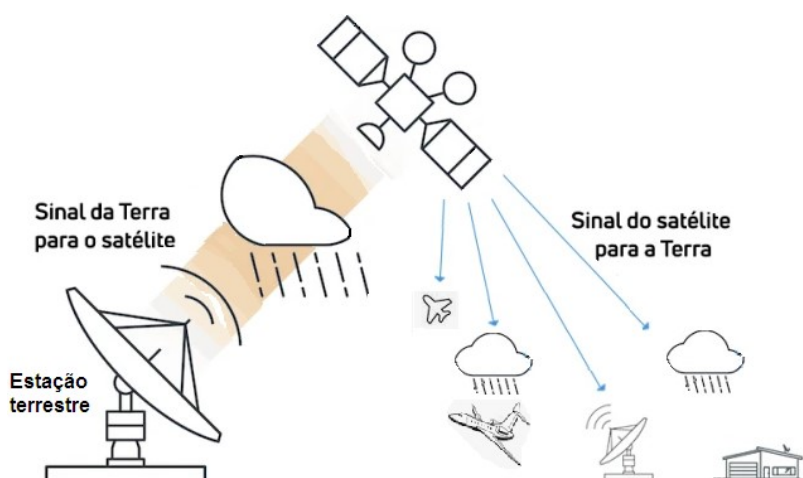


Figura 4 O clima, nomeadamente a chuva, pode afectar as comunicações

### 3. IMPACTO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS NAS COMUNICAÇÕES

As comunicações entre satélites e aeronaves são directamente influenciadas pelas condições atmosféricas. Diversos fenómenos, como chuva, nuvens densas, neblina e distúrbios ionosféricos, afectam a propagação das ondas de rádio, comprometendo a integridade dos links de comunicação. Em especial, em frequências mais altas como as bandas Ku e Ka (entre 27 e 40 GHz), os efeitos das condições atmosféricas podem ser significativos e imprevisíveis [5], [6], [7]. A Figura 5 representa as camadas da atmosfera, os fenómenos atmosféricos que tem impacto na comunicação ocorrem maioritariamente na troposfera, a exceção do fenómeno da cintilação ionosférica [5]. Estes fenómenos serão explicados ao longo desta secção.

#### 3.1. Atenuação pela chuva

A chuva é um dos maiores desafios enfrentados pelas comunicações via satélite, causando uma severa atenuação do sinal, particularmente nas bandas de frequência mais elevadas. Esse fenómeno ocorre quando as gotas de chuva absorvem e dispersam as ondas de rádio, resultando em uma perda substancial de potência do sinal quando se propaga entre o satélite e a aeronave [7], [8], [9], [10].

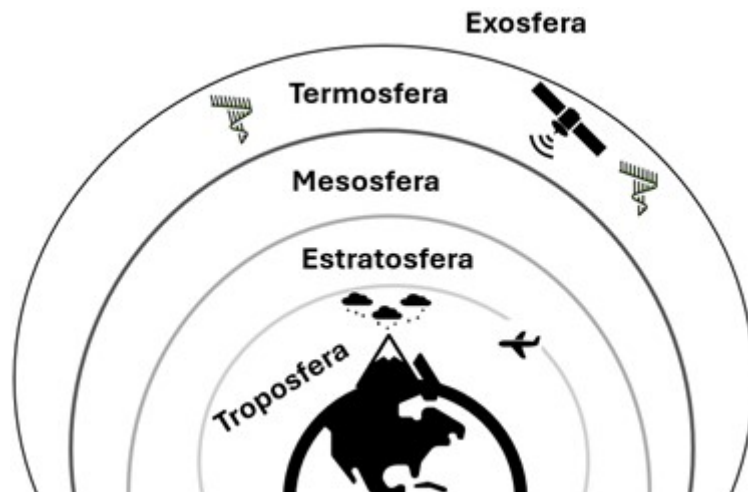


Figura 5 Impacto das condições atmosféricas nas comunicações

Regiões tropicais, que experimentam chuvas intensas e frequentes, sofrem os maiores impactos. Nesses locais, as comunicações por satélite podem ser significativamente interrompidas, com a atenuação causada pela chuva levando a longos períodos de desvanecimento do sinal [8]. Em regiões temperadas, embora a intensidade das chuvas seja menor, ainda podem ocorrer interferências, especialmente durante tempestades ou chuvas persistentes ao longo do voo, o que resulta em degradação da qualidade da ligação (link) de comunicação entre satélites e aeronaves [10].

A atenuação causada pela chuva pode ser calculada utilizando a lei de Beer-Lambert para a absorção de ondas electromagnéticas, adaptada para a propagação de ondas de rádio. A fórmula da atenuação específica da chuva (em dB/km) é dada por:

$$A_{\text{chuva}} (\text{dB}) = kR^a d \quad (1)$$

onde  $A_{\text{chuva}}$  é a atenuação total, em dB;  $k$  é um coeficiente que depende da frequência e do tipo de chuva;  $R$  é a taxa de precipitação, em mm/h;  $a$  é um expoente que varia com a frequência;  $d$  é a distância do percurso do sinal na chuva, em km.

### 3.2. Cobertura por nuvens e neblina

A cobertura por nuvens e a neblina também têm impacto na qualidade das comunicações satélite-aeronave, especialmente em frequências mais altas, como as bandas Ka e Ku [11]. Nuvens densas, particularmente em altitudes elevadas, absorvem e dispersam as ondas de rádio, reduzindo a intensidade do sinal que chega à aeronave [12]. A neblina, semelhante às nuvens densas, pode aumentar a dispersão das ondas de rádio e, em situações extremas, levar a perdas notáveis de sinal [13].

### **3.3. Distúrbios ionosféricos**

A ionosfera, que fica entre 60 e 1000 km de altitude, contém partículas carregadas que afetam a propagação das ondas de rádio, especialmente em frequências mais baixas, como as bandas L e UHF, mas também impacta frequências mais altas em certas condições [14]. Durante períodos de intensa atividade solar, ou em regiões de baixa latitude, a ionosfera pode sofrer distúrbios que resultam em degradação severa dos sinais de comunicação entre satélites e aeronaves [15], [16].

### **3.4. Efeitos troposféricos e cintilação**

A troposfera, a camada mais baixa da atmosfera, afeta diretamente as comunicações via satélite, especialmente as que operam em frequências mais altas, como as bandas Ku e Ka [17]. O vapor d'água, gases atmosféricos e partículas em suspensão na troposfera podem causar a absorção e dispersão do sinal, resultando em degradação significativa da comunicação entre satélites e aeronaves [6].

## **4. TECNOLOGIAS PARA MINIMIZAR OS IMPACTOS METEOROLÓGICOS**

À medida que a dependência da comunicação via satélite na aviação aumenta, diversas tecnologias e estratégias de mitigação foram desenvolvidas para enfrentar os impactos adversos das condições atmosféricas. Com base nas técnicas abordadas para mitigar os impactos das condições meteorológicas na comunicação satélite-aeronave, é possível fazer uma análise comparativa das principais soluções desenvolvidas. Essa comparação baseia-se em parâmetros como eficiência, robustez, complexidade de implementação e custos, com foco em garantir a continuidade e a qualidade da comunicação, mesmo em condições adversas. A seguir, discutimos as principais abordagens tecnológicas aplicadas.

### **4.1. Diversidade de frequências**

A diversidade de frequência é essencial para mitigar a atenuação causada por fenômenos como chuva, nuvens e distúrbios atmosféricos. A transmissão simultânea de sinais em diferentes bandas de frequência permite que, se uma banda for severamente degradada por condições meteorológicas, outra banda pode continuar a transmissão [18].

### **4.2. Técnicas de correção de erros**

As técnicas de correção de erros são fundamentais para garantir a integridade dos dados transmitidos, especialmente em condições atmosféricas adversas. Dois métodos amplamente utilizados na comunicação satélite-aeronave são os códigos Reed-Solomon (RSCC) e os algoritmos de correção antecipada de erros (Forward Error Correction, FEC).

O código Reed-Solomon (RSCC) adiciona bits redundantes ao fluxo de dados, permitindo que o receptor detecte e corrija erros sem a

necessidade de retransmissão. Esse método é altamente eficaz para mitigar os efeitos da chuva e da cintilação ionosférica, garantindo que a comunicação continue mesmo com degradações temporárias no sinal. A capacidade de correção de erros aumenta a robustez da comunicação, mas ao custo de maior complexidade computacional [19].

#### **4.3. Algoritmos de controlo de potência**

Os algoritmos de controlo de potência ajustam dinamicamente a potência de emissão com base nas condições atmosféricas, como chuva intensa ou cintilação ionosférica [18], sendo fundamentais para compensar a atenuação da chuva, ajustando a potência de emissão em tempo real para garantir que a qualidade do sinal [10].

#### **4.4. Ligações de satélites redundantes**

A utilização de ligações de satélite redundantes é uma estratégia eficaz para garantir a continuidade da comunicação em condições meteorológicas adversas [20]. Em sistemas críticos, como os utilizados na aviação, é comum ter várias ligações de satélite disponíveis, permitindo que o sistema realize *handover* para uma ligação de recurso (backup) quando o principal for severamente degradado por atenuação, cintilação ou distúrbios ionosféricos [20].

### **5. DESAFIOS EM ABERTO E TENDÊNCIAS FUTURAS**

Com base na análise anterior, é possível identificar desafios ainda não resolvidos e áreas promissoras para futuras pesquisas e inovações tecnológicas na comunicação satélite-aeronave. À medida que a dependência de satélites cresce, surgem novas exigências para garantir a continuidade da comunicação, especialmente sob condições meteorológicas adversas. Além disso, a utilização de, por exemplo, Inteligência Artificial (IA) ou redes híbridas oferece soluções potenciais para superar esses desafios.

#### **5.1. Equilíbrio entre eficiência energética e intensidade do sinal**

Um dos maiores desafios enfrentados pelos sistemas de comunicação via satélite é o equilíbrio entre a eficiência energética e a intensidade do sinal, especialmente em frequências altas, como Ku e Ka, onde a atenuação pela chuva é significativa [21]. Em situações meteorológicas adversas, há a necessidade de aumentar a potência de transmissão para compensar as perdas de sinal, o que, por sua vez, pode elevar o consumo de energia de forma considerável [22].

#### **5.2. Redes híbridas de satélites e terrestres**

As redes híbridas, que combinam componentes de satélite e terrestres, são outra tendência emergente para expandir a cobertura global, especialmente em regiões remotas e oceânicas, onde a infraestrutura terrestre é limitada [13], [23].

Este tipo de rede oferece flexibilidade para alternar entre ligações de Frequência de Rádio (Radio Frequency, RF) e óptica de espaço livre (Free Space Optics, FSO), dependendo das condições atmosféricas, o que melhora a confiabilidade e a eficiência energética dos sistemas [13], [23], [24].

Estas redes também permitirão uma conectividade contínua, reduzindo as lacunas de comunicação e suportando aplicações de mobilidade aérea urbana (UAM) e veículos aéreos não tripulados (UAVs) [13].

### 5.3. Inteligência artificial e otimização preditiva

O uso de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) está emergindo como uma solução chave para otimizar o desempenho dos sistemas de comunicação satélite-aeronave. Modelos preditivos de IA podem ser usados para prever as condições atmosféricas e ajustar preventivamente os parâmetros da ligação, como potência de emissão, modulação e codificação [9], [25], [26]. Isso é particularmente útil em regiões tropicais, onde a atenuação pela chuva e cintilação troposférica são frequentes e imprevisíveis.

### 5.4. Expansão da cobertura global com constelações LEO

As constelações de satélites LEO desempenharão um papel central na expansão da conectividade global, oferecendo uma combinação de baixa latência e ampla cobertura. Isso é especialmente relevante para a comunicação satélite-aeronave em regiões oceânicas e polares, onde os satélites geoestacionários (GEO) têm limitações [27], [28]. A *Figura 6* apresenta a distinção entre as diferentes camadas de satélites.

Essas constelações enfrentam desafios relevantes, como a necessidade de handover frequente entre satélites e estações terrestres [29].

### 5.5. Desafios e oportunidades em ambientes remotos

Um desafio persistente é garantir uma comunicação ininterrupta em espaços aéreos remotos e oceânicos, onde a infraestrutura terrestre é limitada ou inexistente. A integração de redes híbridas satélite-terrestre e a expansão de constelações LEO são soluções promissoras para cobrir essas áreas [13], [23].

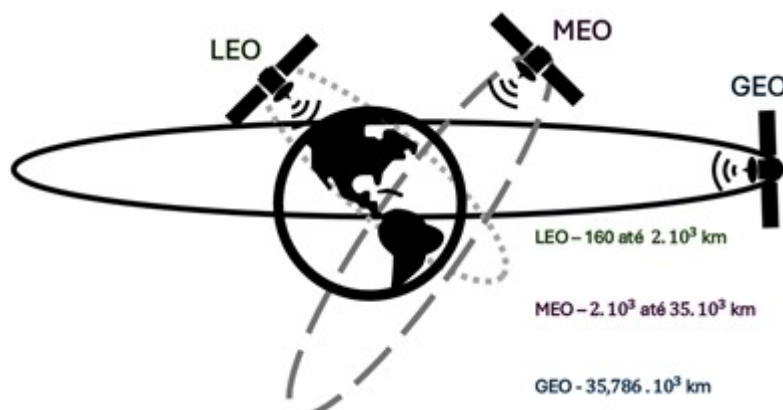


Figura 6 Diferentes satélites: LEO, MEO e GEO

No entanto, a manutenção de handovers confiáveis entre satélites e a otimização da rede para minimizar a latência e a perda de pacotes são áreas críticas de investigação futura [29].

## 6. RESULTADOS

Foram feitas simulações com o Ansys STK integrando parâmetros da tecnologia 5G-NR, que usa orbitas LEO para analisar desempenho métricos de ligação ascendente e descendente. Os satélites LEO estão mais próximos das aeronaves, então os sinais podem ser mais fracos (potência de emissão inferior), exigem menor direcionalidade, mas precisam duma constelação com um número mais levado de satélites. Os GEO estão mais distantes das aeronaves, então precisam de sinais mais fortes, exigem maior direcionalidade, mas necessitam de poucos satélites. Os MEO estão numa situação intermédia.

A simulação foi desenvolvida para simular um ambiente dinâmico, onde a interação entre o satélite e a aeronave lida com variações climáticas comuns e desfavoráveis, representando as circunstâncias reais que acontecem em voos de longa distância.

### 6.1 Comunicação de canal descendente

Na Tabela 1, foram estabelecidos os parâmetros do downlink entre o satélite e a aeronave, utilizando uma frequência de 12.5 GHz na banda Ku. O satélite foi configurado com um emissor de EIRP de 35 dBW, assegurando que o sinal alcance a aeronave com a potência correta, mesmo após atenuações decorrentes da distância e do clima. A velocidade de transmissão foi mantida em 16 Mb/s e a modulação selecionada foi QPSK. Foi selecionada uma largura de banda de 20 MHz para assegurar uma transmissão eficiente e livre de congestionamento. Com um G/T de 20 dB/K, o receptor da aeronave funciona em um ambiente com menos ruído devido à temperatura mais baixa do céu, o que aumenta a sensibilidade e eficácia na recepção do sinal. A análise da comunicação de canal descendente entre o satélite e a aeronave foi realizada com a aplicação de filtros de condições meteorológicas utilizando modulação QPSK.

Na Figura 7, num cenário que levou em conta o efeito de condições meteorológicas como chuva e neblina e empregou modulação QPSK, a EIRP manteve-se estável em 35 dBW, enquanto a frequência recebida exibiu oscilações suaves decorrentes do efeito Doppler. A potência recebida foi consideravelmente reduzida pelas condições meteorológicas adversas, levando a uma queda na qualidade do sinal, especialmente nos estágios iniciais da simulação.

**Tabela 1 Parâmetros usados na simulação da ligação descendente**

<b>Emissor</b>	<b>Frequência = 12.5 GHz</b>	<b>Recetor</b>	<b>Frequência = 12.5 GHz</b>
	<b>EIRP = 35 dBW</b>		<b>G/T = 20 dB/K</b>
	<b>Data rate = 16Mb/s</b>		<b>Modulação – QPSK</b>
	<b>Largura de Banda = 20MHz</b>		

10 Oct 2024 19:55:58

Aircraft-Aircraft1-Sensor-Sensor1-Receiver-Receiver1-To-Satellite-STARLINK-1183\_45088-Transmitter-Transmitter1: Link Budget

Time (UTC)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m <sup>2</sup> )	g/T (dB/K)	C/No (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	Eb/No (dB)	BER
23 Sep 2024 19:39:55.134	35.000	12.500207	-239.248	-195.854477	20.000000	9.350777	16000.000	-62.6904	-62.6904	4.945861e-01
23 Sep 2024 19:40:55.000	35.000	12.500188	-148.271	-104.876867	20.000000	100.328387	16000.000	28.2872	28.2872	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:41:55.000	35.000	12.500163	-147.428	-104.033820	20.000000	101.171434	16000.000	29.1302	29.1302	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:42:55.000	35.000	12.500129	-146.657	-103.262634	20.000000	101.942620	16000.000	29.9014	29.9014	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:43:55.000	35.000	12.500084	-146.041	-102.846871	20.000000	102.558383	16000.000	30.5172	30.5172	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:44:55.000	35.000	12.500027	-145.689	-102.294806	20.000000	102.910448	16000.000	30.8692	30.8692	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:45:55.000	35.000	12.499966	-145.711	-102.317036	20.000000	102.888218	16000.000	30.8470	30.8470	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:46:55.000	35.000	12.499915	-146.081	-102.687462	20.000000	102.517792	16000.000	30.4766	30.4766	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:47:55.000	35.000	12.499874	-146.687	-103.293321	20.000000	101.911933	16000.000	29.8707	29.8707	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:48:55.000	35.000	12.499843	-147.435	-104.040901	20.000000	101.164353	16000.000	29.1232	29.1232	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:49:55.000	35.000	12.499816	-148.254	-104.860215	20.000000	100.345039	16000.000	28.3038	28.3038	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:50:55.000	35.000	12.499797	-232.817	-189.423066	20.000000	15.782188	16000.000	-56.2590	-56.2590	4.991321e-01
23 Sep 2024 19:50:59.601	35.000	12.499796	-234.786	-191.391940	20.000000	13.813314	16000.000	-58.2279	-58.2279	4.993081e-01
23 Sep 2024 21:23:03.111	35.000	12.500114	-228.221	-184.826964	20.000000	20.378290	16000.000	-51.6629	-51.6629	4.985267e-01
23 Sep 2024 21:24:03.000	35.000	12.500083	-148.781	-105.386831	20.000000	99.818423	16000.000	27.7772	27.7772	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:25:03.000	35.000	12.500047	-148.489	-105.095125	20.000000	100.110129	16000.000	28.0689	28.0689	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:26:03.000	35.000	12.500009	-148.354	-104.959997	20.000000	100.245257	16000.000	28.2041	28.2041	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:27:03.000	35.000	12.499970	-148.406	-105.012377	20.000000	100.192877	16000.000	28.1517	28.1517	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:28:03.000	35.000	12.499933	-148.629	-105.234814	20.000000	99.970440	16000.000	27.9292	27.9292	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:29:03.000	35.000	12.499900	-221.370	-177.976312	20.000000	27.228742	16000.000	-44.8125	-44.8125	4.967981e-01
23 Sep 2024 21:29:28.718	35.000	12.499887	-217.559	-174.205281	20.000000	30.999973	16000.000	-41.0412	-41.0412	4.949956e-01

**Figura 7 Relatório do link budget da ligação descendente com filtro de condições meteorológicas e com modulação QPSK**

No entanto, os valores médios de C/No e Eb/No, mesmo oscilando, apontaram para períodos de aprimoramento na qualidade do sinal. A BER oscilou bastante, apresentando valores bastante altos em circunstâncias desfavoráveis, mas também alcançando valores próximos a zero em circunstâncias mais favoráveis, evidenciando que a comunicação oscilou entre níveis de desempenho insatisfatórios e quase perfeitos.

## 6.2 Comunicação de canal ascendente

Conforme apresentado na Tabela 2, foram estabelecidos os parâmetros para a conexão entre a aeronave e o satélite, levando em conta uma frequência de 14 GHz, comum na banda Ku, que possibilita a transmissão de grandes volumes de dados. A aeronave teve sua Potência Isotrópica Efetiva Radiada (EIRP) ajustada para 45 dBW, assegurando um sinal apropriado, e a velocidade de transmissão foi estabelecida em 16 Mb/s. No satélite, o quociente entre o Ganho e a Temperatura do Ruído (G/T) foi definido em 14.4 dB/K, espelhando a elevada temperatura do ruído relacionada com a observação da Terra. A capacidade do receptor de processar o sinal sem congestionamentos foi garantida pela largura de banda de 20 MHz.

**Tabela 2 Parâmetros usados na simulação da ligação ascendente**

<b>Emissor</b>	<b>Frequência = 14 GHz</b>	<b>Recetor</b>	<b>Frequência = 14 GHz</b>
	<b>EIRP = 45dBW</b>		<b>G/T = 14.4 dB/K</b>
	<b>Data rate = 16Mb/s</b>		<b>Modulação – QPSK</b>
			<b>Largura de Banda - 20MHz</b>

Analisou-se a comunicação de canal ascendente entre a aeronave e o satélite com filtro para condições desfavoráveis, como a chuva e interferências troposféricas, empregando modulação QPSK. O desempenho da ligação é crucial para avaliar a viabilidade da comunicação, levando em conta a potência emitida, a atenuação no espaço livre e o efeito das condições climáticas.

Na Figura 8, considerou-se o filtro para condições meteorológicas desfavoráveis e modulação QPSK.



10 Oct 2024 20:37:37

Aircraft-Aircraft-Transmitter-Transmitter1-To-Satellite-STARLINK-11111\_DTC\_59764-Receiver-Receiver1: Link Budget

Time (UTC)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m <sup>2</sup> )	g/T (dB/K)	C/N <sub>0</sub> (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub> (dB)	BER
23 Sep 2024 23:54:40.029	45.000	14.000128	-312.793	-268.414574	14.400000	-69.793681	16000.000	-141.8349	-141.8349	5.000000e-01
23 Sep 2024 23:55:40.000	45.000	14.000072	-137.357	-92.979002	14.400000	105.641892	16000.000	33.6007	33.6007	1.000000e-30
23 Sep 2024 23:56:40.000	45.000	14.000008	-137.135	-92.756482	14.400000	105.864412	16000.000	33.8232	33.8232	1.000000e-30
23 Sep 2024 23:57:40.000	45.000	13.999944	-137.271	-92.893088	14.400000	105.727806	16000.000	33.6866	33.6866	1.000000e-30
23 Sep 2024 23:58:40.000	45.000	13.999885	-299.231	-294.872330	14.400000	-56.293836	16000.000	-128.2930	-128.2930	4.999999e-01
23 Sep 2024 23:58:55.743	45.000	13.999871	-310.701	-266.323031	14.400000	-67.702138	16000.000	-139.7433	-139.7433	4.999999e-01
24 Sep 2024 01:24:25.744	45.000	14.000335	-292.701	-248.323230	14.400000	-49.702337	16000.000	-121.7435	-121.7435	4.999999e-01
24 Sep 2024 01:25:25.000	45.000	14.000335	-136.224	-91.845651	14.400000	106.775243	16000.000	34.7340	34.7340	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:26:25.000	45.000	14.000334	-134.046	-89.667837	14.400000	108.953057	16000.000	36.9119	36.9119	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:27:25.000	45.000	14.000329	-131.163	-86.784487	14.400000	111.836406	16000.000	39.7952	39.7952	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:28:25.000	45.000	14.000306	-127.022	-82.633411	14.400000	115.987483	16000.000	43.9463	43.9463	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:29:25.000	45.000	14.000160	-121.104	-76.725685	14.400000	121.895208	16000.000	49.8540	49.8540	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:30:25.000	45.000	13.999766	-122.762	-78.383523	14.400000	120.237370	16000.000	48.1962	48.1962	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:31:25.000	45.000	13.999684	-128.335	-83.957090	14.400000	114.663804	16000.000	42.6226	42.6226	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:32:25.000	45.000	13.999669	-132.054	-87.675837	14.400000	110.945056	16000.000	38.9039	38.9039	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:33:25.000	45.000	13.999665	-134.704	-90.326019	14.400000	108.294875	16000.000	36.2537	36.2537	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:34:25.000	45.000	13.999664	-136.742	-92.364237	14.400000	106.256657	16000.000	34.2155	34.2155	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:35:07.216	45.000	13.999665	-302.364	-257.985760	14.400000	-59.364866	16000.000	-131.4061	-131.4061	4.999999e-01

**Figura 8 Link budget da ligação ascendente com filtro de condições atmosféricas e com modulação QPSK**

O sistema apresentou um desempenho mais estável em relação a C/N<sub>0</sub>, C/N e E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub>, apesar dos valores negativos iniciais, e imediatamente antes do handover, indicarem uma deterioração do sinal. Novamente, a BER variou entre valores altos, indicando uma comunicação insatisfatória em determinados momentos, e valores quase nulos, sinalizando uma transmissão quase impecável.

## 7. CONCLUSÕES

Esta pesquisa estudou minuciosamente a interação entre satélites e avião, concentrando-se principalmente nas constelações de satélites LEO, como a Starlink, e como as condições climáticas afetam a qualidade do sinal tanto no uplink quanto no downlink. A simulação que integrou a tecnologia 5G-NR possibilitou uma análise completa de indicadores de desempenho em várias circunstâncias.

Os achados demonstram como as condições meteorológicas afetam a qualidade do link em ambas as direções de comunicação, a modulação QPSK apresentou variações significativas na flutuações iniciais e antes do handover, quando houve deterioração no sinal na BER, C/N<sub>0</sub> e E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub>.

A análise das altitudes dos satélites LEO, MEO e GEO destaca a vantagem da proximidade dos satélites LEO na comunicação com aeronaves, apesar da necessidade de maior número de satélites e menor potência de emissão. Constelações LEO, como a Starlink, reduzem a latência, mas exigem infraestrutura robusta para garantir cobertura contínua. Já os satélites GEO, com menor necessidade de unidades para cobrir grandes áreas, enfrentam desafios de latência e demandam maior potência de emissão.

A diversidade de frequência é um método eficiente para minimizar interrupções de sinal, particularmente em bandas suscetíveis à atenuação pela chuva, como Ku e Ka. Ao transmitir em várias frequências ao mesmo tempo, os sistemas asseguram uma comunicação estável em situações meteorológicas desfavoráveis. Porém, essa estratégia requer um planejamento metuculoso e pode elevar a complexidade e os gastos com infraestrutura [18].

Os algoritmos de controle de potência são essenciais para ajustar a emissão de sinal em resposta a condições atmosféricas adversas, como chuva intensa ou cintilação ionosférica. Embora eficazes para manter a qualidade da comunicação, o aumento da potência pode elevar o consumo de energia, especialmente em satélites de órbita baixa, onde os recursos são limitados [18], [20].

As técnicas de correção de erros, como RSCC, FEC e AMC, são essenciais para mitigar erros de transmissão causados por condições atmosféricas. O AMC se destaca por ajustar a modulação e codificação em tempo real, otimizando a comunicação conforme as condições do canal. No entanto, essas técnicas demandam maior capacidade computacional e podem enfrentar limitações em cenários de rápidas mudanças climáticas [19], [20].

Por fim, a implementação de conexões de satélite redundantes proporciona maior confiabilidade, particularmente em sistemas vitais como o gerenciamento do tráfego aéreo. Essas conexões de backup asseguram a continuidade da comunicação, mesmo em circunstâncias meteorológicas desfavoráveis [20].

Portanto, através da simulação, conclui-se que a seleção do tipo de modulação e a configuração do sistema de comunicação são fortemente influenciadas pelo ambiente atmosférico. O uso de modulação mais sofisticada, como o QPSK, aliado ao planejamento meticuloso da constelação de satélites, a utilização de links redundantes e modulação adaptativa, é crucial para garantir uma comunicação estável e eficiente, mesmo em condições climáticas desfavoráveis. Esta pesquisa auxilia no entendimento das variáveis que impactam as comunicações satélite-aeronave, estabelecendo uma base para futuras linhas de melhorias e progressos neste campo.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a AGI pela licença concedida para uso do Ansys STK e pela autorização do uso das imagens geradas no software, ao Instituto de Telecomunicações, a Universidade da Beira Interior e à FCT/MCTES que financiou este trabalho através de fundos nacionais e quando aplicável cofinanciado por fundos comunitários no âmbito do projeto com referência UIDB/EEA/50008/2020 e identificador DOI <https://doi.org/10.54499/UIDB/50008/2020>.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Estações terrestres, [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/93/VORTAC\\_TGO\\_Aichtal\\_Germany\\_01.JPG/1280px-VORTAC\\_TGO\\_Aichtal\\_Germany\\_01.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/93/VORTAC_TGO_Aichtal_Germany_01.JPG/1280px-VORTAC_TGO_Aichtal_Germany_01.JPG)
- [2] Satélites, <https://resource.stratus.com/wp-content/uploads/civil-aviation-administration-of-chinas-air-traffic-management-bureau-01.jpg>
- [3] Camadas atmosféricas, <https://s4.static.brasilecola.uol.com.br/be/2024/01/mesofera-camadas-atmosfera.jpg>
- [4] Clima, <https://news.viasat.com/pt-br/blog/como-o-clima-pode-afetar-as-comunicacoes-por-satelite>

- [5] M. Biscarini et al., « Weather-forecast based RMOP link-budget approach experimentation: data-transfer optimization at Ka-band with Hayabusa-2 satellite mission support », in 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany: IEEE, mars 2021, p. 1-5. doi: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411369.
- [6] E. Martini, A. Freni, L. Facheris, et F. Cuccoli, « Impact of tropospheric scintillation in the Ku/K bands on the communications between two LEO satellites in a radio occultation geometry », IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 44, no 8, p. 2063-2071, août 2006, doi: 10.1109/TGRS.2006.872143.
- [7] D. A. Ogunsona, J. S. Ojo, A. G. Ashidi, et M. O. Ajewole, « Characterization of rain fade dynamics for Ku band satellite communication systems in a tropical location », J. Phys. Conf. Ser., vol. 2034, no 1, p. 012006, oct. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2034/1/012006.
- [8] A. A. Gözütok, « Assessment of Rain Attenuation in Satellite Telecommand Signals Using Numerical Weather Prediction Model and Artificial Neural Networks », in 2024 32nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mersin, Turquie: IEEE, mai 2024, p. 1-4. doi: 10.1109/SIU61531.2024.10600755.
- [9] A. Ferdowsi et D. Whitefield, « Deep Learning for Rain Fade Prediction in Satellite Communications », 2021, arXiv. doi: 10.48550/ARXIV.2110.00695.
- [10] R. Li, J. Ning, et S. Wang, « Uplink Power Compensation of Rain Attenuation on Satellite Communication », in 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Harbin, China: IEEE, janv. 2019, p. 742-743. doi: 10.1109/ICEICT.2019.8846393.
- [11] Usha. A, « Simulation of Different Cloud Attenuation Methods », in 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), Trichirappalli, India: IEEE, avr. 2023, p. 1-5. doi: 10.1109/ICEEICT56924.2023.10157966.
- [12] T. E. Arijaje, T. V. Omotosho, A. P. Aizebeokhai, et S. O. Akinwumi, « Tropospheric attenuation on Satellite-aircraft propagation: A concise review », IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 665, no 1, p. 012067, mars 2021, doi: 10.1088/1755-1315/665/1/012067.
- [13] M. Nafees, S. Huang, J. Thompson, et M. Safari, « Leveraging Hybrid UAV Relays in Adverse Weather for FSO Link Capacity Maximization », in 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Austin, TX, USA: IEEE, avr. 2022, p. 178-183. doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771966.
- [14] K. Davies et E. K. Smith, « Ionospheric effects on satellite land mobile systems », IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 44, no 6, p. 24-31, déc. 2002, doi: 10.1109/MAP.2002.1167260.
- [15] V. P. Pashintsev, M. V. Peskov, N. V. Kiselev, D. A. Mikhailov, et D. V. Dukhovnyi, « Analysis of noise immunity of satellite communications under small-scale ionospheric disturbances and time-selective fading of received signals », Egypt. J. Remote Sens. Space Sci., vol. 26, no 4, p. 1036-1045, déc. 2023, doi: 10.1016/j.ejrs.2023.11.002.
- [16] S. Raghunath et D. V. Ratnam, « Detection of Low-Latitude Ionospheric Irregularities From GNSS Observations », IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., vol. 8, no 11, p. 5171-5176, nov. 2015, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2496201.
- [17] C. Y. Chen et M. J. Singh, « Comparison of tropospheric scintillation prediction models of the Indonesian climate », Earth Planets Space, vol. 66, no 1, p. 64, déc. 2014, doi: 10.1186/1880-5981-66-64.
- [18] F. Zhang, Y. Zuo, et H. Sun, « Techniques of rain fade countermeasures in Ka-band satellite communication on ships », in 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen: IEEE, août 2017, p. 1-3. doi: 10.1109/ICOON.2017.8121382.
- [19] R. Samy et A. Mahran, « Efficient Decoding of RSCC over Ka-band Satellite Channel in Severe Weather Conditions », in 2020 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG), Cairo, Egypt: IEEE, juill. 2020, p. 203-207. doi: 10.1109/ICEENG45378.2020.9171745.

- [20] H. Liu, Y. You, L. Shi, et H. Zhang, « Multi-domain united link adaptation technique in high-throughput satellite communication system », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2469, no 1, p. 012027, mars 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2469/1/012027.
- [21] S. Chatzinotas, G. Zheng, et B. Ottersten, « Energy-efficient MMSE beamforming and power allocation in multibeam satellite systems », in *2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, Pacific Grove, CA, USA: IEEE, nov. 2011, p. 1081-1085. doi: 10.1109/ACSSC.2011.6190179.
- [22] M. Khalil, « Power Optimization in Satellite Communication Using Multi-Intelligent Reflecting Surfaces », 25 octobre 2023. doi: 10.36227/techrxiv.24418207.v1.
- [23] O. B. Yahia, E. Erdogan, G. K. Kurt, I. Altunbas, et H. Yanikomeroglu, « A Weather-Dependent Hybrid RF/FSO Satellite Communication for Improved Power Efficiency », *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 11, no 3, p. 573-577, mars 2022, doi: 10.1109/LWC.2021.3136444.
- [24] T. Chaloun et al., « Electronically Steerable Antennas for Future Heterogeneous Communication Networks: Review and Perspectives », *IEEE J. Microw.*, vol. 2, no 4, p. 545-581, oct. 2022, doi: 10.1109/JMW.2022.3202626.
- [25] A. Smith, E. W. Brown, A. Gannon, et F. Merat, « Enhancing Autonomous Satellite Communication Systems with Weather-Aware Scheduling and Reconfiguration », in *2023 IEEE Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop (CCAAW)*, Cleveland, OH, USA: IEEE, juin 2023, p. 1-7. doi: 10.1109/CCA AW57883.2023.10219327.
- [26] A. Wrona, E. D. Santis, F. D. Priscoli, et F. G. Lavacca, « An Intelligent Ground Station Selection Algorithm in Satellite Optical Communications via Deep Learning », in *2023 31st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Limassol, Cyprus: IEEE, juin 2023, p. 493-499. doi: 10.1109/MED59994.2023.10185908.
- [27] K. A. Farrea, Z. Baig, R. Doss, et D. Liu, « Low Earth Orbit (LEO) Satellites Role in Shaping 6G Networks Amidst Emerging Threats », in *2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*, Baltimore, MD, USA: IEEE, nov. 2023, p. 1-8. doi: 10.1109/FNWF58287.2023.10520636.
- [28] E. S. Maddy et S. A. Boukabara, « MIIDAPS-AI: An Explainable Machine-Learning Algorithm for Infrared and Microwave Remote Sensing and Data Assimilation Preprocessing - Application to LEO and GEO Sensors », *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 14, p. 8566-8576, 2021, doi: 10.1109/JSTARS.2021.3104389.
- [29] X. Cao et X. Zhang, « SaTCP: Link-Layer Informed TCP Adaptation for Highly Dynamic LEO Satellite Networks », in *IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications*, New York City, NY, USA: IEEE, mai 2023, p. 1-10. doi: 10.1109/INFOCOM53939.2023.10228914.



## MAXIMIZING UAV RANGE THROUGH WING AEROSTRUCTURAL OPTIMIZATION: A STUDY ON CHORD, SHAPE, SPAN AND COMPOSITE MATERIAL PROPERTIES

CARDOSO, PEDRO M. (1); MARTA, ANDRÉ C.(2); MATOS, NUNO M. (3)

(1) IDMEC, IST, U.LISBOA, E-mail: [pedro.marques.cardoso@tecnico.ulisboa.pt](mailto:pedro.marques.cardoso@tecnico.ulisboa.pt)

(2) IDMEC, IST, U.LISBOA, E-mail: [andre.marta@tecnico.ulisboa.pt](mailto:andre.marta@tecnico.ulisboa.pt)

(3) TEKEVER UAS, E-mail: [nuno.matos@tekever.pt](mailto:nuno.matos@tekever.pt)

### RESUMO

No mercado competitivo de UAV, os fabricantes esforçam-se por melhorar o desempenho através de tecnologias de design avançadas. Este estudo centra-se na maximização do alcance de um UAV através da utilização de otimização baseada em gradientes que acopla alta fidelidade de Dinâmica de Fluido e Estrutural Computacional. O processo de otimização considera variáveis aerodinâmicas e estruturais de projeto, nomeadamente a corda, perfil alar, envergadura, espessura da estrutura e orientação da fibra do material composto. O método adjunto discreto é utilizado para calcular os derivados de forma eficiente para um grande número de variáveis permitindo otimização baseada em gradientes. Os resultados demonstram um aumento de até 9,9% no intervalo, uma melhoria de 32% na eficiência aerodinâmica, apesar de um aumento de 114% no peso da asa. A abordagem de disciplinas aerodinâmicas e estruturais oferece, simultaneamente, informações valiosas sobre os compromissos entre diferentes variáveis de design e leva a projetos de UAV mais eficientes.

**Palavras-chave:** otimização multidisciplinar, design de aeronaves, método adjunto, deformação de forma livre, materiais compósitos.

### ABSTRACT

*In the competitive UAV market, manufacturers strive to enhance performance through advanced design technologies. This study focuses on maximizing the range of a UAV through the use of a gradient-based optimization framework that couples high-fidelity Computational Fluid Dynamics and Computational Structural Dynamics models. The optimization process considers aerodynamic and structural wing design variables (DV), namely chord, airfoil shape and span, panel thickness and fiber orientation of the constitutive composite material. The discrete adjoint method is used to compute derivatives efficiently for a large number of DV and gradient-based optimization. The results demonstrate up to 9.9% increase in range, a 32% improvement in aerodynamic*

*efficiency, despite a 114% increase in wing weight. Addressing both aerodynamic and structural disciplines concurrently offers valuable insights into the trade-offs among different design variables and leads to more efficient UAV designs.*

**Keywords:** *multidisciplinary optimization, aircraft design, adjoint method, free-form deformation, composite materials.*

## 1 INTRODUCTION

In recent years, the landscape of unmanned aerial vehicles (UAVs) has evolved rapidly, with the global fixed wing drone market, estimated at \$8.3 billion USD in 2023. With an expected Compound Annual Growth Rate (CAGR) ranging from 8.3% to 17.2% (1), the competition among UAV manufacturers is increasingly fierce. This focuses is on the enhancement of the TEKEVER AR5 to strengthen its competitive edge in the Medium-Altitude Medium-Endurance (MAME) fixed-wing UAV sector (Figure 1).

**Figure 1: TEKEVER AR5 (source: TEKEVER UAS)**



This UAV model is designed to execute a variety of missions, including search and rescue, maritime surveillance, and maritime patrol, offering advantages such as extended endurance and cost-effective operation . A summary of its key specifications is provided in Table 1.

**Table 1: TEKEVER AR5 characteristics (source: TEKEVER UAS)**

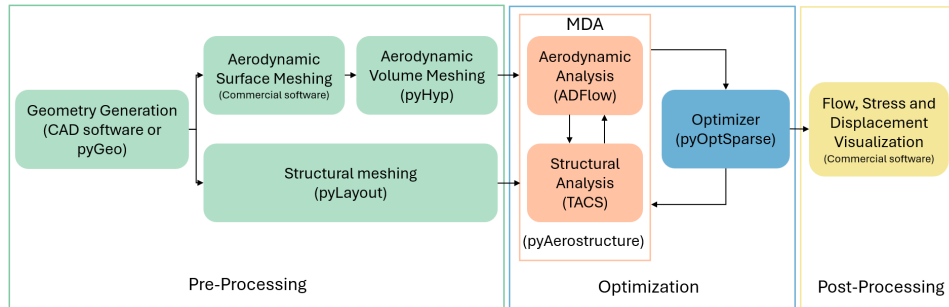
Cruise speed	Cruise altitude	Payload	Wing span	Wing area	Length	Endurance
100 km/h	340 m	50 kg	7.3 m	4.36 m <sup>2</sup>	4 m	20 h

The primary objective is to improve the wing of the AR5, enhancing its aerodynamic efficiency and structural integrity. Considering that the wing is a flexible structure, whose shape differs significantly under loads in flight due to fluid-structure interactions, a high-fidelity aerostructural design tool is employed (3). This study is a follow up of the work done in (4), where the wing twist and the effect of maintainability constraints was analyzed, being know tested the effect of additional aerodynamic Design Variables (DV), namely chord, span and airfoil shape. Furthermore, it was previously demonstrated that there is a strong coupling between the structural and aerodynamic behavior of the TEKEVER AR5 wing that will benefit from this more complex and time consuming optimization.

## 2 AEROSTRUCTURAL DESIGN FRAMEWORK

The aerostructural design framework used is MACH-Aero, developed by the Multidisciplinary Design Optimization (MDO) Laboratory at the University of Michigan. It includes three main stages, as depicted in Figure 2.

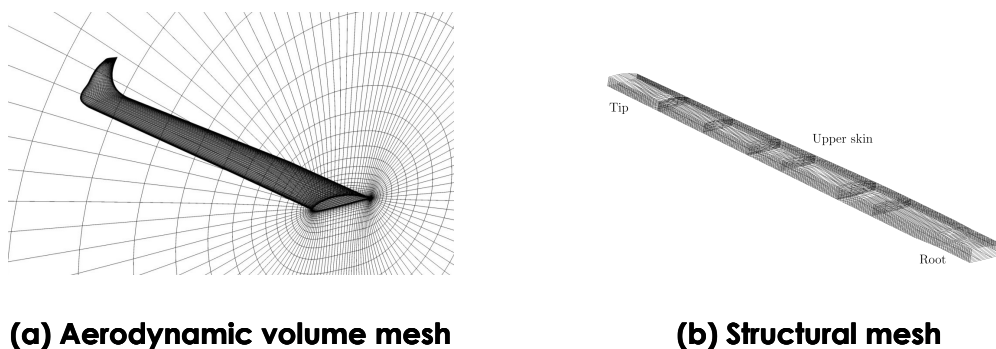
**Figure 2: Aerostructural design framework (3)**



### 2.1 Pre-processing stage

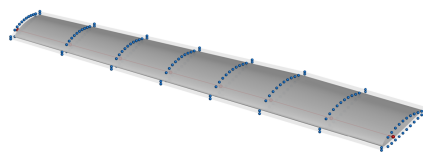
Based on the geometry CAD description of the TEKEVER AR5 wing, the aerodynamic mesh is created. Starting by the creation of surface mesh characterized by its high density at the leading, trailing edge and wing tip (4) and sharp edges are avoidance consistent with being a based for hyperbolic strutted volume mesh. The next step is the volume mesh generation using pyHyp (5), achieving the general topology observed in Figure 3a, which also applies the far-field and wall boundary conditions. The first layer height was prescribed, and latter verified to guarantee a  $y^+$  close to unity as required by the Spalart-Allmaras turbulence model employed, chosen for its effectiveness at predicting the turbulent effect around the wing at the AR5 operating conditions and for being differentiated in the Mach-Aero framework (6). A mesh refinement study concluded that 800,000 cells were sufficient, considering the trade-off between accuracy and performance, with 0.5% difference in lift and 5% drag but converged in only 20% of the time, compared to the most refined mesh studied. The computational domain extends 20 chords.

**Figure 3: Computational meshes of TEKEVER AR5 wing (3)**



To avoid the computational burden of generating new meshes from scratch, the Free-Form Deformation (FFD) method (7) is employed, which is based on generating boxes through control points surrounding the wing surface (as shown in Figure 4), then when moved modify the wing geometry (8). Although each of the points can be individually moved, as is done in airfoil shape optimization, it is more practical to reduce and create more recognizable DV. Therefore, they are aggregated as parametric global variables like chord, twist, and span (8). In Mach-Aero, `pyGeo` is the module responsible for performing this task; moreover, it also handles the computation of the global DV derivatives using the chain rule, starting from the already computed derivative of the movement of each individual point (8).

**Figure 4: Free form deformation (FFD) box (3)**



The structural finite element mesh is generated with `pyLayout`, an automated module for the creation of wingbox structures for wings. When given a CAD file along with the position of spars and ribs generates the structural layout, as shown in Figure 3b. Since these wing parts are thin and made of fibre-reinforced composite materials, bilinear, 4-node, 2-D shell elements were used (9). From a mesh convergence study monitoring the tip displacement and average stress, a mesh with 1,000,000 DoF was selected, which presents an error smaller than 2% in both parameters.

## 2.2 Optimization stage

The Multidisciplinary Feasible (MDF) MDO architecture is used for its simplicity and accuracy at the optimizer level (10, 2). The problem is solved as a single discipline where the couple results are given by a Multidisciplinary Analysis (MDA). This methodology is used as it allows for the use of the previously developed, fully differentiated aerodynamic and structural solvers (11). The aerodynamic discipline is solved using `ADFLOW` (12) and the structural discipline is solved using `TACS` (13). Both solvers have the ability of computing DV linked to them, namely, flow properties, wing aerodynamic shape, material fiber orientation and thickness.

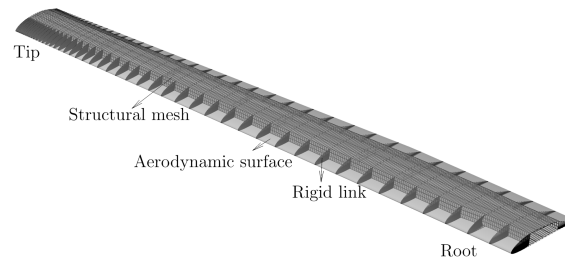
`ADFLOW` employs a finite-volume method to solve the steady compressible RANS equations, utilizing the Spalart-Allmaras model for turbulence. The models' discretization relies on central finite differences with JST scalar dissipation. As `ADFLOW` is a compressible flow solver and the `TEKEVER AR5` operates at very low Mach number, the solver uses characteristic time-stepping combined with an approximate Newton method, and the van Leer-Lee-Roe preconditioner to enhance both accuracy and convergence. Convergence is defined by achieving a  $10^{-6}$  reduction in the L2-norm of the residual. Default settings are used for all other solver settings (12).

`TACS` is finite-element solver and computes the generalized Hooke's Law (14,



9). The material is considered orthotropic, with the fibres parallel within a ply, allowing the rule of mixtures (15). The failure criteria is the Tsai-Wu (16). The disciplines are coupled using `pyAerostructure`, which captures the interactions between aerodynamic forces and structural displacements (2). The MDA is converged using Gauss-Seidel, a fixed-point method in which each discipline analysis is run using the most recent output from the other disciplines until a consistent set of state variables is returned. The MDA convergence tolerance was set to  $10^{-5}$ . The displacements are transferred between the meshes through using the Rigid Link Transfer (RLT) technique (2) (Figure 5), and the method of virtual work is used to determine the structural nodal forces (17, 2) given by the integration of the aerodynamic loads.

**Figure 5: Overlay of the rigid links, structural and aerodynamic mesh(3)**



The wing volume mesh is deformed at each aerostructural iteration during using an Inverse-Distance Weighting method (IDW) (5).

The gradient-based SLSQP algorithm is used in the optimization process itself, that proved to be adequate in similar problems (18). The module `pyOptSparse` (19) implements such constrained optimizer.

The sensitivity analysis, required for the search direction evaluation in the gradient-based optimizer, is efficiently and accurately performed using the adjoint method, since there are considerably more design variables than metric functions (20). The coupled system of adjoint equations is treated as a unified problem, solving the entire set together to directly address the interdependencies between different disciplines, leading to more accurate sensitivity analysis and faster convergence (2). The adjoint solver is converged using the Krylov subspace approach, with a tolerance of  $10^{-5}$ .

To prevent material failure, the Kreisselmeier-Steinhauser (KS) aggregation technique is used (9), which provides a smooth estimate of the maximum stress, while avoiding issues of discontinuity and excessive constraints.

### 3 TEKEVER AR5 MULTIDISCIPLINARY OPTIMIZATION

The aerostructural optimization targets the maximization of the aircraft range  $R$  defined by the Breguet equation,

$$R = \frac{L}{D} \frac{\eta}{sfc \cdot g} \ln \left( \frac{W_0}{W_f} \right), \quad (1)$$

where the lift  $L$  and drag  $D$  coefficients depend on the aerodynamic performance, and the initial  $W_0$  and final  $W_f$  weight depend on the structural

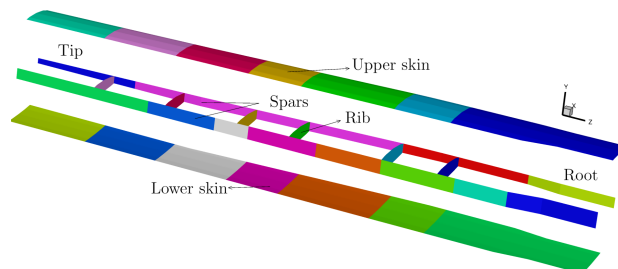
performance, the remaining equation terms are fixed by flight operating condition, the propulsion efficiency  $\eta$  and specific fuel consumption  $sfc$ .  $g$  is the gravitational acceleration. Finally, the wing design variables (DV) are summarized in Table 2.

**Table 2: Design variables**

Design variable	Description	Quantity	Lower bound	Upper bound
$\alpha$	angle of attack	1	$-4^\circ$	$20^\circ$
$\gamma$	twist distribution	7	$-15^\circ$	$15^\circ$
$c$	chord distribution	7	-1 m	1.5 m
$b$	span	7	1 m	1.5 m
$shape$	shape	6x8	-0.05 m	0.05 m
$\theta_1/\theta_2$	fibre angle	2N	$0^\circ$	$90^\circ$
$t$	material thickness	N	0.01 m	0.1 m

The twist and chord distributions are functions of the wing spanwise coordinate (see Figure 4). The shape DV is controlled by 6 points along the airfoil, along 7 section in the spanwise direction (see Figure 4), where each of the control points has the freedom to move up and down, inside its bounds, changing the airfoil shape. The fibre angles and material thickness are defined for each block  $i$  of the  $N$  blocks presented in Figure 6.

**Figure 6: Wing structural design variables by blocks (3)**



The design must satisfy five requirements, included in the form of constraints in the optimization: i) the aircraft trimming implies that the lift generated must match the UAV weight at level flight,  $L = W$ ; the structure must not fail under a 2-g manoeuvre,  $KS(failure) \leq n(2g)$ ; iii) adjacency constraints to keep the difference in each design block thickness under a maximum threshold,  $|t_i - t_{i+1}| \leq \Delta_{max}$ ; iv) composite ply angle continuity among consecutive blocks for manufacturability,  $\theta_{1,i} = \theta_{1,i+1}$  and  $\theta_{2,i} = \theta_{2,i+1}$ ; and v) orthogonality between plies for manufacturability to allow the use of carbon fibre cloths with weaving pattern,  $|\theta_1 - \theta_2| = 90^\circ$ . In (3), the impact of adding these manufacturability constraints was analyzed. It was concluded that while they do not significantly affect the final optimal result, they greatly enhance the wing's manufacturability (3). Moreover, despite existing the capability of aerostructurally analyze all corners of V-n diagram (velocity vs load factor) with linear structural response, it was decided to only consider maximum load maneuvering and level flight, to save on computational effort. The wing aerostructural design problem can be written in standard optimization form as

$$\begin{aligned}
& \text{maximize} && R \\
& \text{with respect to} && \alpha, c, b, \text{shape}, \theta_{1,i}, \theta_{2,i}, t_i \\
& \text{subject to} && L = W \\
& && KS(\text{failure}) \leq n(2g) \\
& && |t_i - t_{i+1}| \leq \Delta_{\max} \\
& && \theta_{1,i} = \theta_{1,i+1} \\
& && \theta_{2,i} = \theta_{2,i+1} \\
& && |\theta_1 - \theta_2| = 90^\circ.
\end{aligned} \tag{2}$$

The summarized results of the optimization using the simplified TEKEVER AR5 wing as the starting geometry are found in Table 3. As previously mentioned, the structural constraints have already been studied, so this study focuses on the impact of adding different aerodynamic DVs. Throughout the study, all structural DVs are included, along with the angle of attack.

**Table 3: Design variables**

Case	Wing mass, kg (wing)	L/D (wing)	Range, m (UAV)
Starting geometry	ref	ref	ref
Twist distribution (3)	-50%	+0.6%	+0.9%
Chord distribution	-56%	-1.2%	+1%
Span + Twist distribution	+130%	+20%	+6.3%
Airfoil shape	-42%	+10.56%	+4.53%
All	+114%	+32%	+9.9%

It can be concluded that an aerostructural optimization of the TEKEVER AR5 wing yields significant improvements in the UAV range. The aerostructural approach allows for an automatic trade-off between design variables that directly affect both disciplines, such as the aircraft's wingspan. Indeed, this solution would not be possible in a single-discipline optimization, highlighting it as one of the best options available. Furthermore, the objective function, which considers both aerodynamic and structural concerns, ensures that no single adverse outcome (such as an increase in mass or a decrease in aerodynamic efficiency) led to a reduction in range showcasing the couple performance behavior. The results also show that when more freedom is given to the optimizer, such as in shape optimization and with all design variables included, significantly better outcomes can be achieved. A detailed discussion of the new cases is included next.

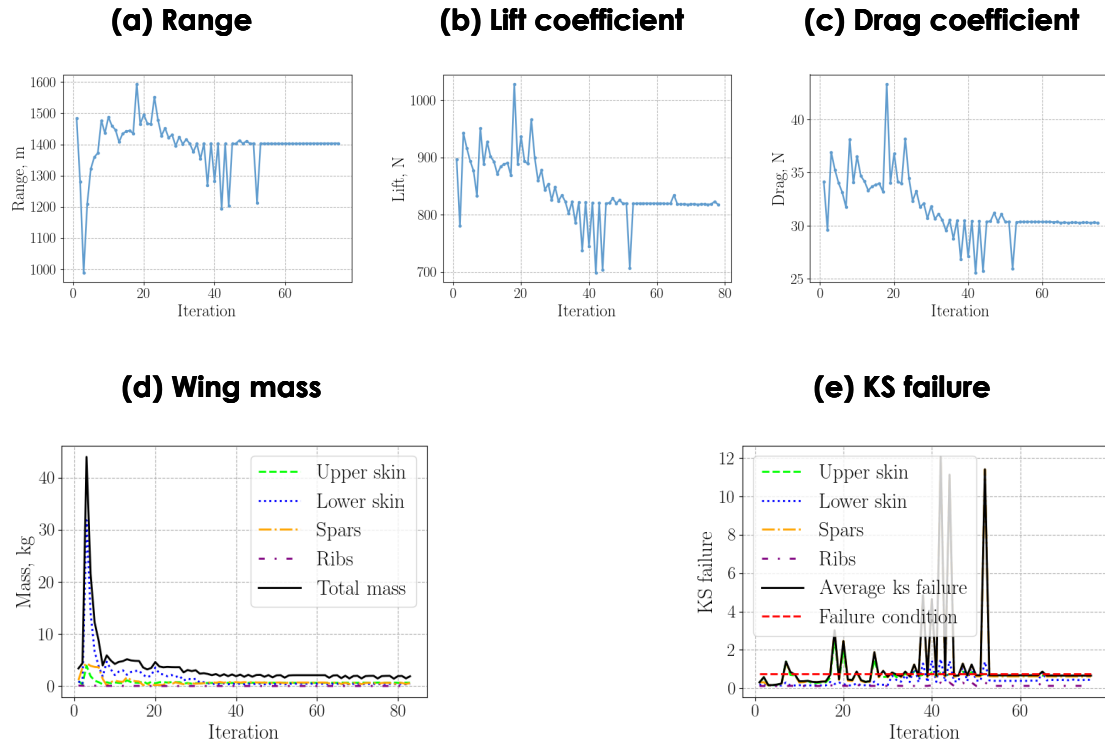
### 3.1 Chord optimization

Starting from the simplified TEKEVER AR5 wing design without winglet, a first optimization was done considering the chord distribution and angle-of-attack as design variables. Overall, a 0.9% increase in range was achieved, following a 56% decrease in wing mass due to the smaller skin panels and the thinner walls, despite a 1.2% decrease in aerodynamic efficiency.

Figure 7 shows the optimization convergence history of five key parameters in 93 iterations. It is clear the need for less lift for trimming (Fig.7b), the reduction in drag (Fig.7c) by reducing the lift needed and the overall wetted

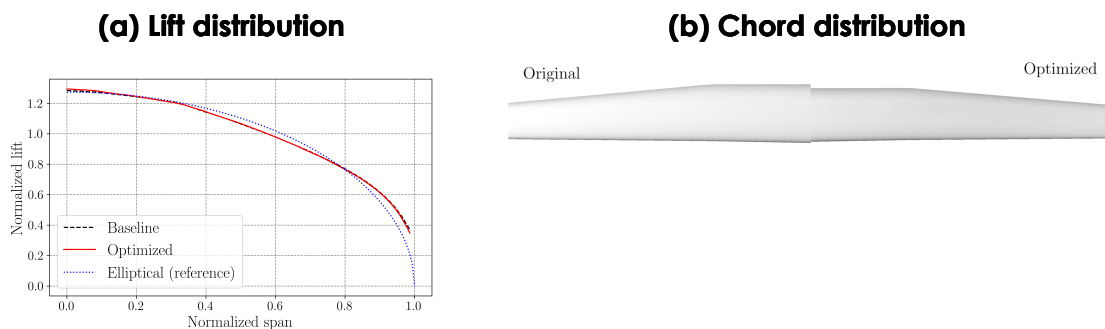
area, and the search for a lighter structure (Fig.7d) while avoiding structural failure (Fig.7e).

**Figure 7: Optimization history of key parameters**



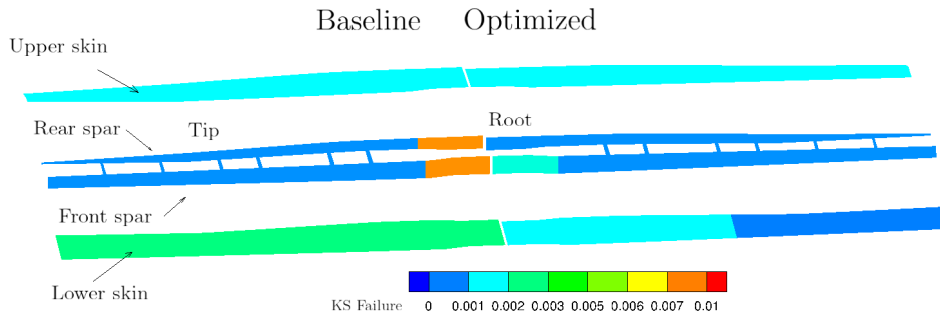
The optimal chord and lift distributions are illustrated in Figure 8a and Figure 8b, respectively. As expected, the optimizer did not converge on the ideal aerodynamic solution (elliptical lift distribution). Instead, it produced a slight increase in lift near the wing root and a reduction near the tip for more efficient structural loading. However, the primary achievement that contributed to the increase in range was the reduction in weight, which was the strategy explored by the optimizer. With weight reduction, less lift was needed, and therefore, less wing area was required, which further contributed to the weight reduction.

**Figure 8: Aerodynamic spanwise distributions**



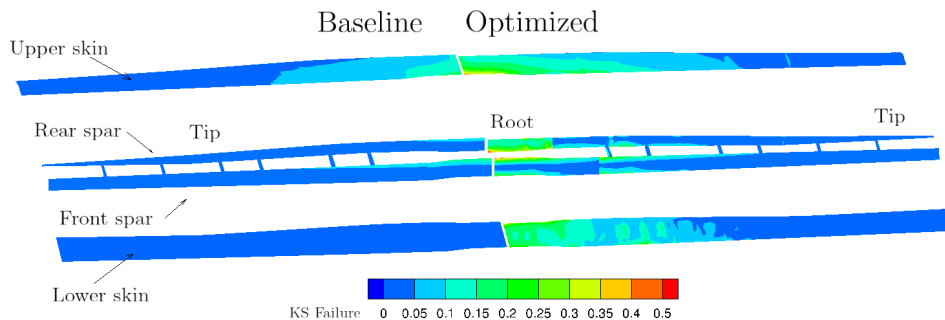
This case led to a significant thinning of the wing panels, as observed in Figure 9, particularly at the front spar and lower skin. As a consequence, a 63% wing weight reduction was achieved.

**Figure 9: Thickness distribution**



The drastic improvement of the structural efficiency is attested by the KS index failure increase shown in Figure 10, where the optimized wing box exhibits more regions with a higher failure index, meaning it works closer to failure due to the overall thickness decrease.

**Figure 10: KS failure index**



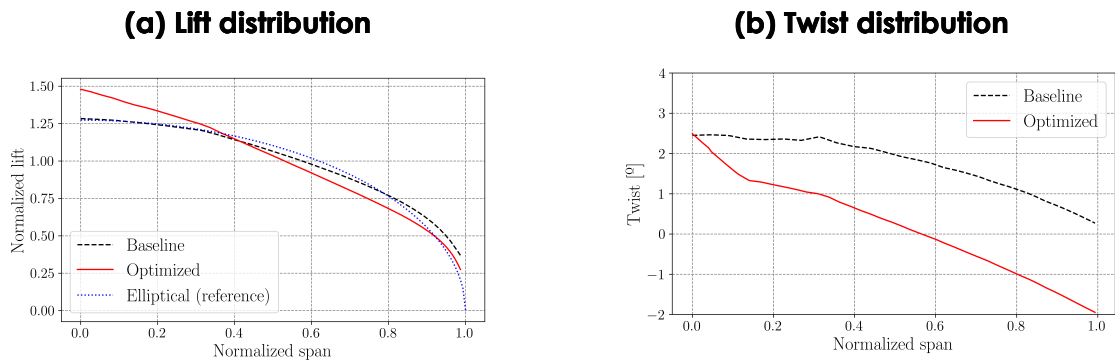
The ply angle distribution in the optimal solution is feasible in terms of manufacturing, being this solution much easier to implement with its orthogonal plies and consistency in ply angles.

### 3.2 Twist and span optimization

The optimal twist and span optimization was thought to be interesting to address as the aerostructural trade-off between the size of the wing and its structural weight is automatically done. The optimizer converged after 282 iterations, with similar history behavior to that of the previous case.

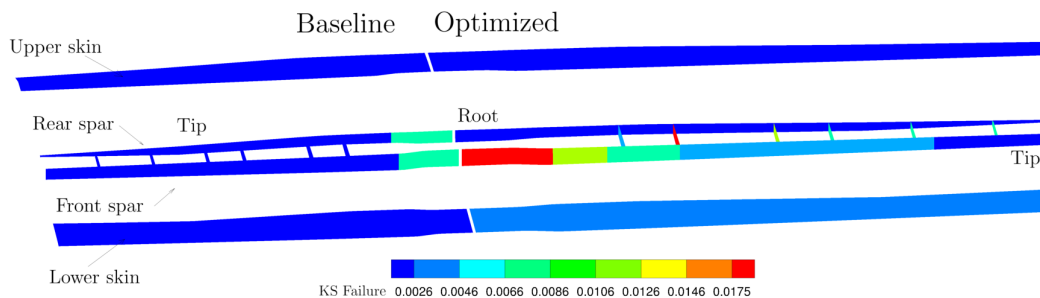
Again, the optimizer did not converge for the ideal aerodynamic solution (elliptical lift distribution) but it drastically increased the lift produced in the wing section closer to the root and reduced it closer to the tip, contributing to a more efficient structural loading (less bending moment, thus lighter structure) and better aerostructural result, as illustrated in Figure 11.

**Figure 11: Aerodynamic spanwise distributions**



This case led to a 78% increase in span, which improved the aerodynamic characteristics of the wing, namely a 20% increase in lift-to-drag ratio. It is important to mention that this change would impose negative effects in manufacturability costs (material, labor and tools) and logistics of operation with the UAV transport and runway characteristics being harder to accomplish, affecting potential buyers. Due to the increase in span, a thickening of panels was observed (see Figure 12), particularly at the rear spar and lower skin panels near the root, leading to a 130% weight increase.

**Figure 12: Thickness distribution**

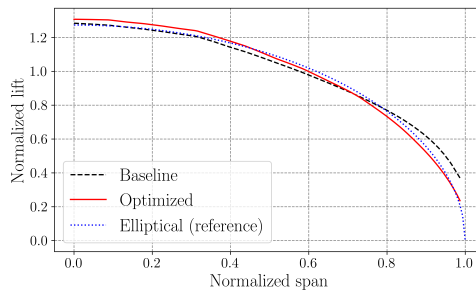


Despite that, the structural efficiency of the wing increased as attested by the increase in the KS index failure that was observed in all the wing structure. The optimized wing box has more regions with a higher failure index, meaning it works closer to failure due to the overall thickness decrease in the tip, despite the general increase in the root.

### 3.3 Airfoil shape optimization

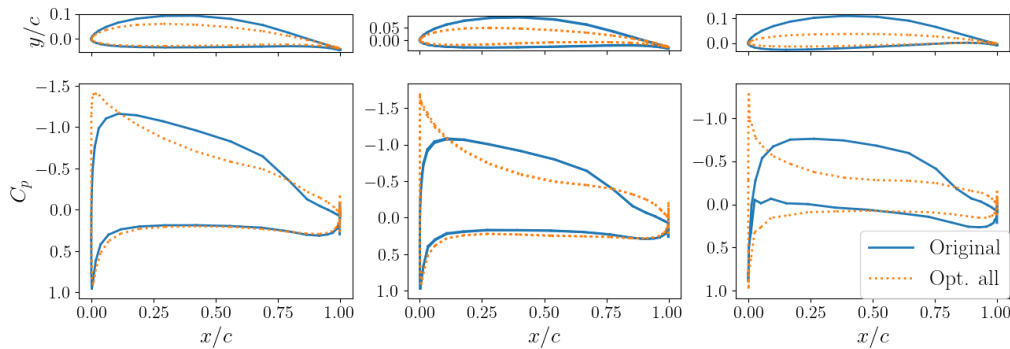
The airfoil shape optimization achieved a 4.5% increase in range, following a 10.5% increase in aerodynamic efficiency and 42% decrease in weight. This time the optimizer took 394 iterations to converge as a result of a larger design space (more DVs). As illustrated in Figure 13, the optimizer converged to a lift distribution close to the ideal aerodynamic solution, but a slight maximum in lift near the wing root and a reduction near the tip is visible for more efficient structural loading and overall performance.

**Figure 13: Lift distribution**



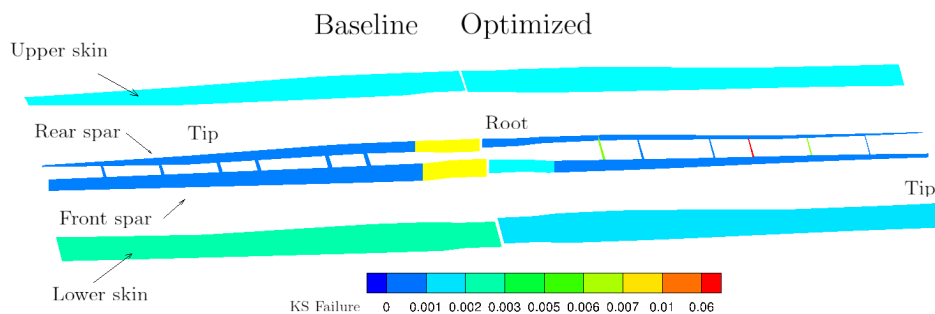
The airfoil shape can be observed in Figure 14, where the capability of the aerostructural analysis is showcased with the trade-off between reducing airfoil thickness for aerodynamic purposes and increasing it for structural ones. Indeed, the optimizer opted for decreasing the original thickness as much as the structure was still able to cope with the loads.

**Figure 14: Airfoil shape and coefficient of pressure distribution at 10%, 50% and 90% of the span**



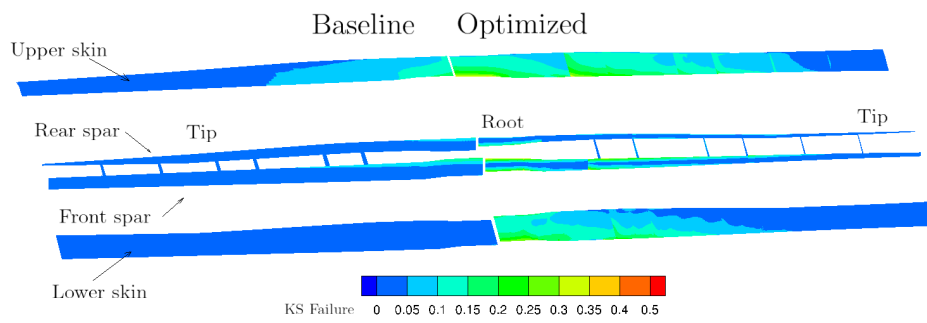
This case led also to an improvement of the structural efficiency as attested by the increase in the KS index failure (Fig.16 due to reduction in panels thickness and the thinning of the airfoil (Fig.15). As a consequence, a 63% wing weight reduction was achieved.

**Figure 15: Thickness distribution**



It is important to mention that all manufacturability constraints were also respected in this case.

**Figure 16: KS failure index**

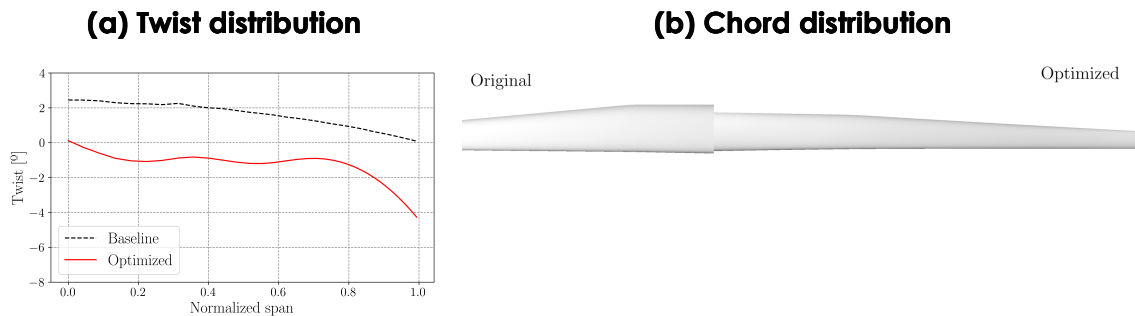


### 3.4 All design variables

As expected, considering all DV led to the best overall design, with 9.9% range increase, which resulted from a 32% improvement in aerodynamic efficiency, despite a 114% increase in wing weight. This optimization case was by far the most costly, requiring 500 iterations to converge.

The final solution is characterized by operating at an angle-of-attack of  $3.14^\circ$ , with 2.2 times larger span than the baseline wing. The optimal twist and chord distributions are shown in Figure 17, where it is observed an attempt to maximize span, introduce wash-out (negative twist), and reducing the chord to reduce drag, until the increase in structural weight mitigated the effect.

**Figure 17: Aerodynamic spanwise distributions**



The airfoil shape and pressure distribution, depicted in Figure 18, shown an increase in thickness-to-height ratio, that overcomes the reduction in span, so that sufficient bending stiffness is still obtained.

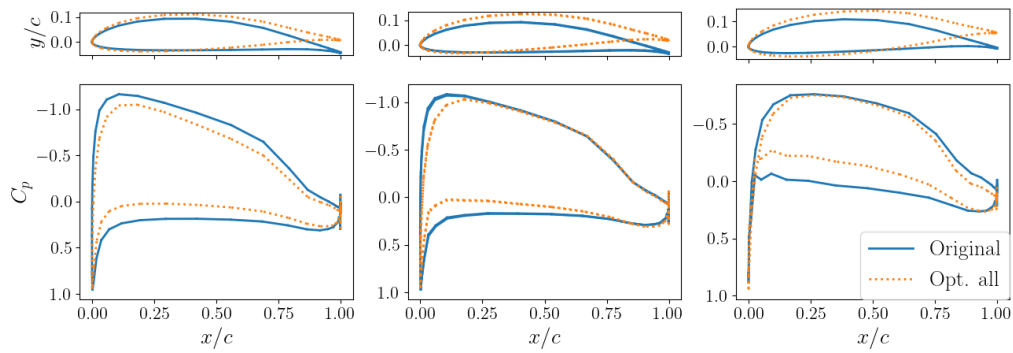
Once again, the wing lift distribution achieved, shown in Figure 19, produces a more efficient structural loading, with increased lift closer to the root and decreased at the tip.

The optimized wing box has more regions with high failure index, meaning it works closer to failure, as shown in Figure 20, despite the increase in thickness due to the higher bending moments resulting from the larger span, as shown in Figure 21.

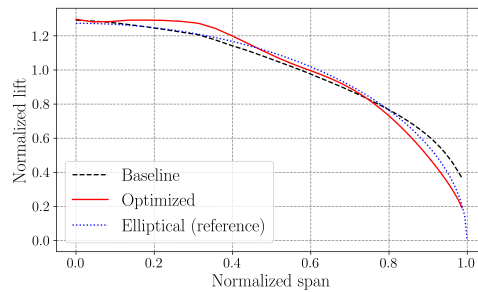
The ply angle distribution between the blocks is shown in Table 4 which



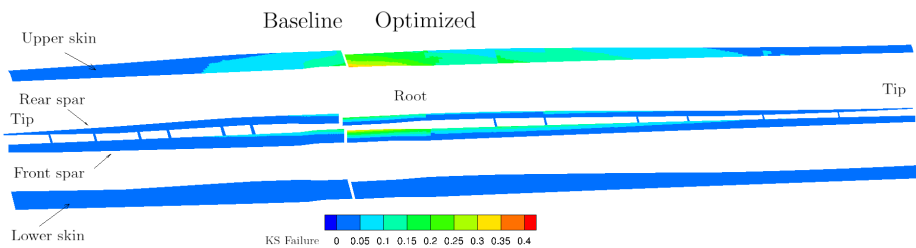
**Figure 18: Airfoil shape and coefficient of pressure distribution at 10%, 50% and 90% of the span**



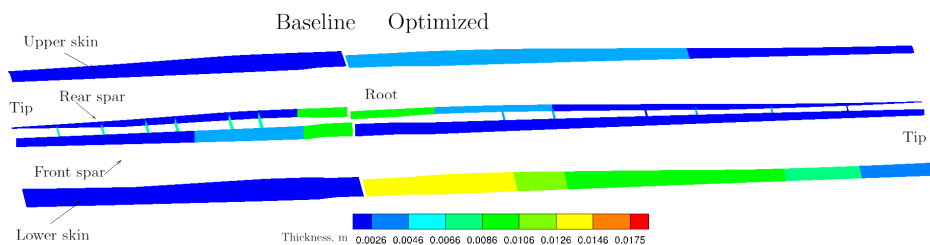
**Figure 19: Lift distribution**



**Figure 20: KS failure index**



**Figure 21: Thickness distribution**



demonstrates that the optimal solution is feasible in terms of manufacturing. It is important to mention that the initial configuration in all panel  $\theta_1$  is  $90^\circ$  and  $\theta_2$  is  $0^\circ$ .

This was the best case solution, indicating that the aggregation of chord, shape and span as DV have room to be improved within the optimization.

**Table 4: Ply angles**

	Front spar	Rear spar	Upper skin	Lower skin
$\theta_1$	89.6 °	89.8 °	88	89
$\theta_2$	0.4 °	0.2 °	2 °	1 °

## 4 CONCLUSIONS

High-fidelity MDO has proven to be a powerful tool for aerostructural wing design, achieving an optimal coupled solution by maximizing wing performance for cruise while also analyzing it under a 2g load to ensure structural efficiency during maneuvers. Future work will apply this framework in the detailed design of the next-generation UAV, considering wing shape, structural model, and fuselage effects.

Gains in the TEKEVER AR5 range of +10% were achieved by tweaking all design variables, resulting in a +32% lift-to-drag ratio improvement, despite a 114% wing weight increase due to wingspan growth, thicker shell panels near the root, and adjusted composite ply angles. Although this is the best solution, it requires a costly full wing redesign due to the new wingspan, also potentiality raising production costs from materials, wing molds, and labor; transportation and takeoff logistics become more complex, necessitating larger storage space and impacting potential buyers. A better option is the shape optimization case, yielding a 4.5% range increase from a 42% weight reduction and a 20% lift-to-drag ratio improvement with minimal changes to UAV characteristics, making it suitable for an updated model.

## 5 ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) through IDMEC, under LAETA (project no. UIDB/50022/2024). The authors also acknowledge Tekever UAS for its financial and technical support.

## REFERENCES

- 1 Fact.MR, "Fixed Wing Drone Market," 2022. Accessed on 10-09-2023.
- 2 G. K. W. Kenway, G. J. Kennedy, and J. R. R. A. Martins, "Scalable parallel approach for high-fidelity steady-state aeroelastic analysis and adjoint derivative computations," *AIAA Journal*, vol. 52, no. 5, 2014. doi:10.2514/1.J052255.
- 3 A. C. M. Pedro M. Cardoso and N. B. Matos, "Aerostructural design of a medium-altitude medium-endurance fixed wing uav," in *ECCOMAS Congress 2024 - 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, (Lisbon, Portugal), 2024.
- 4 R. Gameniuro, "Wing Aerodynamic Design for a MAME UAV using High-Fidelity Numerical Tools," Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2023.
- 5 N. R. Secco, G. K. W. Kenway, P. He, C. Mader, and J. R. R. A. Martins, "Efficient mesh generation and deformation for aerodynamic shape optimization," *AIAA Journal*, vol. 59, no. 4, pp. 1151–1168, 2021.

- 6 G. K. Kenway, C. A. Mader, P. He, and J. R. Martins, "Effective adjoint approaches for computational fluid dynamics," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 110, 2019.
- 7 T. W. Sederberg and S. R. Parry, "Free-form deformation of solid geometric models," in *SIGGRAPH '86: Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, (New York, USA), Aug. 1986. doi:10.1145/15922.15903.
- 8 G. Kenway, G. Kennedy, and J. Martins, "A cad-free approach to high-fidelity aerostructural optimization," 09 2010.
- 9 G. Kennedy and J. Martins, "A parallel finite-element framework for large-scale gradient-based design optimization of high-performance structures," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 87, p. 56–73, 09 2014.
- 10 A. C. Gray and J. R. Martins, "Geometrically nonlinear high-fidelity aerostructural optimization for highly flexible wings," in *AIAA Scitech 2021 Forum*, (Virtual event), Jan. 2021. doi:10.2514/6.2021-0283.
- 11 R. Perez, H. Liu, and K. Behdinan, "Evaluation of multidisciplinary optimization approaches for aircraft conceptual design," in *10th AIAA/ISSMO multidisciplinary analysis and optimization conference*, (Albany, USA), Aug. 2004. doi:10.2514/6.2004-4537.
- 12 MDO Lab of University of Michigan, "ADFlow Documentation." <<https://mdolab-adflow.readthedocs-hosted.com>>, 2024. (accessed on 2024-04-03).
- 13 G. J. Kennedy and J. R. Martins, "A parallel finite-element framework for large-scale gradient-based design optimization of high-performance structures," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 87, 2014. doi:10.1016/j.finel.2014.04.011.
- 14 J. N. Reddy, *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*. CRC Press, 2nd ed., 2003. doi:10.1201/b12409.
- 15 D. R. Askeland, P. P. Fulay, and W. J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*. Cengage Learning, 6th ed., 2010. ISBN:9780495296027.
- 16 A. Khani, S. T. IJsselmuiden, M. M. Abdalla, and Z. Gürdal, "Design of variable stiffness panels for maximum strength using lamination parameters," *Composites Part B Engineering*, vol. 42, no. 3, 2011. doi:10.1016/j.compositesb.2010.11.005.
- 17 G. J. Kennedy and J. R. R. A. Martins, "Parallel solution methods for aerostructural analysis and design optimization," in *Proceedings of the 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference*, (Fort Worth, USA), Sept. 2010. doi:10.2514/6.2010-9308.
- 18 Z. Lyu, Z. Xu, and J. R. R. A. Martins, "Benchmarking optimization algorithms for wing aerodynamic design optimization," in *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Fluid Dynamics*, (Chengdu, China), July 2014. ICCFD8-2014-0203.
- 19 E. Wu, G. Kenway, C. A. Mader, J. Jasa, and J. R. R. A. Martins, "pyoptspase: A python framework for large-scale constrained nonlinear optimization of sparse systems," *Journal of Open Source Software*, vol. 5, no. 54, p. 2564, 2020.
- 20 J. R. R. A. Martins and G. Kennedy, "Enabling large-scale multidisciplinary design optimization through adjoint sensitivity analysis," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 64, 2021. 10.1007/s00158-021-03067-y.

# ENHANCING AIRPORT ADAPTABILITY TO SUSTAINABLE AIRCRAFT PROPULSION METHODS

MARQUES, EMA (1); SILVA, JORGE (2); BRITO, ELIANE (3)

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, AEROSPACE SCIENCES DEPARTMENT, CONVENTO DE SANTO ANTÓNIO, 6200-001 COVILHÃ, PORTUGAL

E-MAIL: EMA.MARQUES@UBI.PT

(2) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, AEROSPACE SCIENCES DEPARTMENT, CONVENTO DE SANTO ANTÓNIO, 6200-001 COVILHÃ, PORTUGAL

CITUA, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, AV. ROVISCO PAIS 1, 1049-001 LISBOA, PORTUGAL

E-MAIL: JMRS@UBI.PT

(3) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, AEROSPACE SCIENCES DEPARTMENT, CONVENTO DE SANTO ANTÓNIO, 6200-001 COVILHÃ, PORTUGAL

CITUA, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, AV. ROVISCO PAIS 1, 1049-001 LISBOA, PORTUGAL

E-MAIL: ELIANE.BRITO@UBI.PT

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: EMA.MARQUES@UBI.PT

## ABSTRACT

*The issues related to climate change and the rise in CO<sub>2</sub> emissions are central concerns of this century. In response to this challenge, both industry and society are exploring alternatives to mitigate their detrimental effects on the planet, while still addressing the demands of a growing population and its increasing needs. Over recent decades, the aviation sector has been identified as a significant contributor to the rise in these emissions. Indeed, within Europe, the air transport industry is the second-largest emitter of carbon in the transportation sector. To address this issue, the aviation sector has committed to achieving carbon neutrality by 2050. Consequently, research and experimentation are underway to explore alternative energy sources, including hydrogen, sustainable aviation fuels (SAFs), and electricity. Although these alternatives are viewed as highly promising and favorable for meeting sustainability criteria, the comprehensive impacts of implementing these propulsion systems on existing airport infrastructure remain uncertain. To assess the feasibility of fully integrating these new solutions into airports, scientific literature and databases from organizations such as ICAO and FAA will be examined. Additionally, a study will be conducted on airports where these technologies are already being implemented. The objective is to obtain reliable and constructive insights by comparing various airports to understand how these technological advancements may affect the operation of current airport infrastructures and to determine the most efficient, effective, and expedient solution to achieve the goal of zero carbon by 2050.*

**Keywords:** Airports, Sustainability, Adaptability, Propulsion, Hydrogen, SAF (Sustainable Aviation Fuel), Electric.

## RESUMO

As questões ligadas às mudanças climáticas e ao crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> estão no cerne das preocupações deste século. Na tentativa de contrariar esta realidade, a indústria e a sociedade procuram alternativas para minimizar as suas consequências nefastas no planeta sem deixar de ter como objetivo responder ao aumento da população e das suas necessidades crescentes. Ao longo das últimas décadas, o transporte aéreo tem sido apontado como um dos principais responsáveis para o aumento destas emissões. De facto, só na Europa, a indústria do transporte aéreo é a segunda maior emissora de carbono no setor do transporte. Numa tentativa de corrigir este facto, o setor da aviação comprometeu-se a atingir a neutralidade carbónica até 2050, tendo, por isso, começado a estudar e a experimentar o uso de outras fontes de energia, como é o caso do hidrogénio, dos *Sustainable Aviation Fuel - SAF* (Combustível de Aviação Sustentável - CAS) e até da eletricidade. Embora todas estas alternativas se apresentem como fortemente favoráveis e promissoras para alcançar os critérios de sustentabilidade definidos, ainda não são conhecidos os múltiplos impactos que a implementação destes mesmos sistemas de propulsão terão nos aeroportos atuais. Para tentar verificar a viabilidade de adaptação total nos aeroportos destas novas soluções, analisaram-se artigos científicos e bases de dados, como as da ICAO e a da FAA. Por outro lado, serão objeto de estudo alguns aeroportos nos quais já estão a ser implementadas estas tecnologias. Espera-se obter resultados fidedignos e construtivos, comparando a realidade de diversos aeroportos, para poder entender de que forma estes avanços tecnológicos poderão impactar o funcionamento das infraestruturas aeroportuárias atuais e definir a solução mais eficiente, profícua e rápida de modo a atingir o desejado objetivo de zero carbono até 2050.

**Palavras-chave:** Aeroportos, Sustentabilidade, Adaptabilidade, Propulsão, Hidrogénio, SAF, Elétrico.

## 1 INTRODUÇÃO

O setor da aviação foi apontado como um dos principais responsáveis pelas emissões de gases nocivos para a atmosfera. Por isso, e numa tentativa de tentar corrigir esse problema, foi acordado que a indústria aeronáutica teria de alcançar zero emissões de carbono até 2050 [1]. Para cumprir essa meta, três soluções aparecem como as mais promissoras: o *Sustainable Aviation Fuel - SAF* (Combustível de Aviação Sustentável - CAS), o hidrogénio e a eletricidade. Cada uma destas apresenta vantagens ao nível da sustentabilidade, mas enfrenta desafios ao nível da sua implementação [2].

O objetivo deste artigo é analisar cada uma dessas tecnologias emergentes, percebendo quais as suas vantagens, mas essencialmente quais as dificuldades que serão sentidas no processo da sua implementação nos aeroportos. Serão analisados aeroportos em que estas tecnologias já foram adotadas e as modificações que foram feitas nas infraestruturas dos mesmos ou, no caso em de ainda não terem sido implementadas estas medidas, serão apresentadas as propostas, já definidas, para a sua adoção em alguns aeroportos em concreto para que se consiga entender qual das soluções terá menos impacto ao nível económico, tecnológico, logístico, social e ecológico de modo que se consiga atingir a meta de zero carbono até 2050.

## 2 COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL - CAS

### 2.1 Definição e aplicação

O *Sustainable Aviation Fuel* - SAF (Combustível de Aviação Sustentável - CAS) é um combustível certificado para jatos equivalente ao “jetfuel” tradicional, mas difere no que diz respeito às suas origens, uma vez que é parcialmente derivado de matérias-primas reutilizadas em vez de ser totalmente baseado em combustíveis fósseis. Assim sendo, estas matérias-primas podem ser compostas por óleos alimentares usados, gorduras, óleos vegetais, resíduos urbanos, resíduos agrícolas e florestais e de culturas não alimentares. O SAF pode ser, posteriormente, misturado com os combustíveis fósseis convencionais, o que o torna uma solução “drop-in” que pode ser utilizada nas aeronaves e infraestruturas existentes sem modificações [3].

Contribuindo com aproximadamente 2-3% das emissões globais de gases com efeito de estufa (GEE) induzidas pelo homem, a aviação é um alvo significativo e de destaque para o qual apontam os esforços de redução do carbono. A utilização de SAF é, assim, uma estratégia fundamental para diminuir esta pegada de carbono, com potencial para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> até 80% em comparação com o combustível tradicional para aeronaves. [3]

Neste sentido, a União Europeia (UE) aprovou, em outubro de 2023, um regulamento denominado “ReFuelEU”, uma iniciativa emblemática para tornar o setor da aviação menos poluente através da promoção do uso de SAF [4].

É de salientar que a União Europeia (UE) foi a primeira a estabelecer um quadro regulamentar que ajudará à produção de SAF, ao fornecimento deste às companhias aéreas e, também, por conseguinte, à criação de um mercado que aumentará os volumes, diminuindo assim o seu preço. Além de dar mais ênfase ao SAF, esta medida abrange também a propulsão a hidrogénio e a eletricidade [4].

Nas medidas mais imediatas do “ReFuelEU” prevê-se que 2% dos combustíveis devam ser sustentáveis até 2025, estando igualmente definida a meta de 70% até 2050 [3].

Desta forma, os voos que saírem dos maiores aeroportos da UE deverão ser abastecidos com uma quantidade mínima de SAF, independentemente de a companhia aérea ser ou não uma companhia aérea da UE [5].

Para assegurar a disponibilização do SAF, existem, presentemente, nove vias de produção certificadas para o SAF, garantindo, desta forma, que o seu desempenho é operacionalmente equivalente ao do combustível “Jet Fuel” convencional. Entre as vias de produção certificadas destacam-se o HEFA (Estéres Hidroprocessados e Ácidos Gordos), o álcool a jato (AtJ) e o “eFuel”.

Além das linhas de produção, atualmente, todas as aeronaves Airbus podem já voar com uma mistura máxima de 50% de SAF e de combustível convencional. Prevê-se ainda que, até 2030, todos os aviões e helicópteros Airbus possam voar com 100% de SAF [3].

Por sua vez, as aeronaves militares da Boeing estão, hoje em dia, preparadas para operar com uma mistura de 50% de SAF [6].

## **2.2 Desafios na implementação do SAF**

A fim de ser aceite para a utilização comercial, o SAF deve ser certificado de acordo com os rigorosos requisitos de segurança e desempenho do setor dos transportes aéreos, deve ainda conseguir uma redução material das emissões de carbono ao longo do ciclo de vida e cumprir critérios de sustentabilidade abrangentes para ser uma alternativa “drop-in” ao combustível para a aviação tradicional à base de combustíveis fósseis, e evitar a remodelação dispendiosa de motores, estruturas de aeronaves ou sistemas de distribuição de combustível [7].

Outra dificuldade é a cadeia de abastecimento de SAF, mais complexa do que a do combustível convencional para aviões a jato, devido à necessidade de misturar SAF com combustíveis tradicionais. Este processo consiste, numa primeira fase, na recolha de matérias-primas, que são pré-processadas e convertidas em SAF à qual se segue a mistura com querosene convencional. O novo combustível deve depois ser testado e certificado para, posteriormente, ser distribuído às companhias aéreas [7].

No que diz respeito às infraestruturas de combustível dos aeroportos, outros desafios se erguem, uma vez que muitos não são proprietários destas, nem as exploram. A propriedade e a exploração podem variar muito, podendo depender de consórcios, de companhias aéreas, de fornecedores de combustível ou de instituições terceiras. Os aeroportos limitam-se, muitas vezes, a fornecer terrenos ou infraestruturas, mas não controlam a sua exploração. Esta falta de propriedade complica a inclusão dos SAF. No entanto, o SAF, sendo um combustível de mistura, não exige alterações significativas ao nível das infraestruturas ou do funcionamento, podendo ser usado com as infraestruturas atuais e ser manuseado tal como o combustível “jetfuel” [7].

No caso do acesso às condutas, os gasodutos existentes para o transporte de combustível para motores a jato, também podem ser utilizados para transportar SAF. Prevê-se, inclusivamente, que as novas instalações de produção possam entrar em funcionamento nos próximos 1-3 anos, permitindo a sua aplicação nos 10 maiores aeroportos dos EUA, todos eles já ligados a grandes oleodutos, ficando somente por solucionar a situação dos aeroportos mais pequenos que não têm acesso a estes [8].

Para utilizar o SAF 100% “non drop-in” seriam necessárias modificações às infraestruturas existentes, inclusive modificações nos motores das aeronaves, já que este combustível tem propriedades físico-químicas

bastante diferentes do “jetfuel” atual. Este tipo de SAF não será priorizado para já, uma vez que o custo das modificações necessárias para a sua implementação iria subir o preço do combustível, colocando portanto mais entraves à sua utilização e impossibilitando o cumprimento dos prazos apertados estabelecidos para a implementação do SAF na indústria aeronáutica [9].

Relativamente às considerações ambientais e económicas que devem ser tidas em conta, é de realçar que a produção de combustíveis alternativos é frequentemente feita de forma intensiva em termos energéticos e algumas matérias-primas têm impactos ambientais negativos. Acresce-se a esta contrariedade, o facto da produção de SAF continuar a ser mais dispendiosa do que a do querosene fóssil, o que o torna menos atrativo do ponto de vista económico [10].

Outro fator que dificulta, igualmente, a implementação dos SAF é o volume limitado do seu fornecimento, que complica a sua distribuição global que, por sua vez, depende, em grande medida, da procura das companhias aéreas [11].

Apesar de todas estas dificuldades, destaca-se o facto do SAF poder ser guardado em tanques de armazenamento de combustível, com um mínimo de alterações ao nível das infraestruturas, não havendo necessidade técnica de separar o SAF do combustível convencional para aviões a jato, nem necessidade de misturas adicionais ou de recertificação no aeroporto. Nos próximos anos, os aeroportos poderão receber o SAF misturado através de condutas, transportes ferroviários e terrestres como receberam o combustível tradicionalmente usado até hoje [8].

No caso das aeronaves, sabe-se que o SAF misturado até 50% é adequado para a maioria, independentemente da sua idade. Com o SAF certificado de acordo com as normas ASTM 1655, não é necessária a segregação do combustível e os aeroportos podem já tratar o SAF como qualquer outro combustível. As aeronaves mais recentes podem ainda acomodar SAF de baixo teor aromático e podem ainda sofrer algumas alterações para utilizar até 100% de SAF [8].

### **2.3 Uso e desenvolvimento atual do SAF**

Atualmente, existem já vários aeroportos que estão a utilizar o SAF, nomeadamente, San Francisco International Airport (SFO), Los Angeles International Airport (LAX), Narita International Airport (NRT), Changi Airport (SIN) e Paris Le Bourget (LBG) [12].

O SFO é atualmente o aeroporto que opera com maior quantidade de SAF no mundo. O seu pico de utilização deu-se durante a pandemia COVID-19 tendo, o SFO, procurado produtores locais para limitar, também, desta forma as emissões dos transportes associadas à sua entrega [13]. No que se refere aos primeiros voos alimentados por SAF que partiram de SFO, estes realizaram-se em 2018 e alcançaram um sucesso significativo pelo que foi decidido, conseqüentemente, expandir o seu



uso a mais voos. No entanto, foram encontrados vários entraves, sendo que os que tiveram mais impacto se registaram ao nível das infraestruturas e da logística da cadeia de abastecimento. No tocante aos problemas da cadeia de abastecimento, rapidamente se percebeu que existia uma solução, já que havia cinco refinarias, quatro estações e três espaços de armazenamento perto do aeroporto que podiam receber SAF (100%) ou SAF misturado com combustível fóssil desde que melhorassem ligeiramente as suas infraestruturas.

Tendo como objetivo, a curto-prazo, providenciar até cerca de 114 milhões de litros de SAF por ano com o mínimo de custos e investimentos possível, optou-se por utilizar camiões para o abastecimento, que se deslocam diretamente para as instalações atualmente existentes, evitando assim os constrangimentos que poderiam acontecer nos gasodutos KM SFPP, que abastecem o aeroporto, e evitar uma qualquer rutura de abastecimento. No entanto, o exceder dos 114 milhões de litros, pode vir a provocar a congestão de camiões e constrangimentos no descarregamento e, neste caso, será, indubitavelmente necessária uma opção de abastecimento que passe por linhas ferroviárias ou marítimas e que tenha acesso direto ao aeroporto. Para a concretização desta alternativa será preciso corrigir os problemas de constrangimentos existentes no KM SFPP através de novas ramificações nos gasodutos. Para uma resolução a longo prazo, em que será indispensável uma solução de armazenamento e mistura em larga-escala, ter-se-á que alargar as medidas implementadas a médio-prazo e complementá-las sem haver, contudo, necessidade imediata de desenvolver outras [14].

Um exemplo da implementação destas medidas já se pode encontrar nos Estados Unidos onde a refinaria "Neste" estabeleceu um abastecimento constante de SAF através de gasodutos, utilizado pelas companhias aéreas [15]. Estes gasodutos para múltiplos produtos já existiam para o transporte de combustíveis fósseis, o que facilitou, desta forma, o abastecimento do aeroporto, não tendo implicado modificações nas infraestruturas, e novos investimentos [16].

Também no Aeroporto de LAX o processo é executado de forma semelhante ao dos combustíveis fósseis, não tendo havido qualquer modificação nas operações [17]. Numa fase inicial foram usados os transportes terrestres (camiões) para transportar quantidades menores de SAF, mas, posteriormente, à medida que as quantidades de SAF foram aumentando, foi usado o transporte marítimo, entrando de seguida nas infraestruturas já existentes e no processo habitual para o abastecimento de combustível [18].

Na Europa, o aeroporto de Paris "Le Bourget" foi pioneiro no que diz respeito a ter um abastecimento permanente de SAF disponível para as companhias aéreas [19]. Este é aprovisionado pela refinaria "Total Energies" que produz o SAF em França a partir de óleos de cozinha usados e que faz o abastecimento do aeroporto em camiões híbridos ou elétricos [20].

No aeroporto de Singapura (Changi) foi igualmente verificado que não foi necessário qualquer tipo de modificação à infraestrutura atual para a implementação de SAF [21]. A refinaria “Neste”, situada em Singapura, fornece diretamente os sistemas de abastecimento de combustível de Changi, reforçando assim a cadeia de abastecimento de SAF ponta-a-ponta [22].

Em Portugal, o primeiro voo com SAF foi efetuado em 2022 e, numa primeira fase, o SAF utilizado foi entregue pelo maior fornecedor atual, a “Neste”. Prevê-se que as infraestruturas de abastecimento existentes nos aeroportos se mantenham inalteradas e, não se antevê a necessidade da adaptação das frotas [23].

Aliado ao facto de não serem necessárias mudanças nas infraestruturas, está já comprovado que, atualmente, o SAF pode ser misturado com até 50% de “Jet Fuel” sem que isso cause qualquer impacto, o que pode permitir a inserção destes combustíveis com relativa facilidade e rapidez [24].

### **3 HIDROGÉNIO**

#### **3.1 Definição e aplicação**

É o elemento químico mais abundante. Mais leve do que o ar, incolor, inodoro e extremamente inflamável, apesar da sua simplicidade, o hidrogénio é uma das maiores esperanças mundiais em termos energéticos.

O hidrogénio não é muito mais do que um constituinte de outros elementos e estruturas. Não pode ser extraído, pelo que a sua necessidade – e todo o seu potencial - requerem uma produção de base industrial.

O hidrogénio pode ser produzido de várias formas, mas destacam-se duas, uma que continua a ser a mais usada, a reformação por vapor, e outra cujo potencial é inquestionável, a eletrólise da água.

É, por isso, necessária uma grande quantidade de energia elétrica para a produção de hidrogénio - 55kWh e 9 litros de água para 1 kg de H<sub>2</sub> - pelo que a redução do seu preço final depende do desenvolvimento da tecnologia e do constante crescimento das energias renováveis [25].

Apesar de o hidrogénio ser reconhecido como um combustível limpo, já que pode ser consumido sem causar poluição, o hidrogénio “puro” não está disponível na natureza e os vários métodos disponíveis para criar combustível a partir do hidrogénio, embora sirvam para diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> no futuro, não são processos sustentáveis. O único hidrogénio com neutralidade carbónica é o hidrogénio verde, pois não gera carbono na sua formação. Atualmente, estão a ser usadas energias renováveis para o fabrico do hidrogénio verde [26].

Enquanto fonte de energia para a propulsão, o H<sub>2</sub>, pode ser obtido por processos de conversão térmica em motores de combustão a H<sub>2</sub> ou por

conversão eletroquímica no caso de células de combustível. Estes novos conceitos de propulsão implicam novas aeronaves para incluírem os tanques de H<sub>2</sub> a bordo. Devido às diferentes densidades energéticas, os motores a combustão de H<sub>2</sub> servirão para aeronaves de médio-longo curso, enquanto as células de combustível serão úteis para aeronaves que percorram distâncias menores. É de notar que durante o voo nenhum destes conceitos emite CO<sub>2</sub> nem NO<sub>x</sub> [27].

O desenvolvimento da indústria do hidrogénio para a aviação comercial pode ser categorizado em diversas áreas, nomeadamente: a aplicação nos aeroportos, como é o caso de certos veículos usados na placa, as infraestruturas existentes, onde os aeroportos mantêm o seu formato atual e usam combustíveis "ELECTROFUELS" como combustíveis "drop-in", produzidos a partir de uma mistura de CO<sub>2</sub> com hidrogénio, e as infraestruturas futuras, que implicarão alterações nas aeronaves para se adaptarem aos tanques de hidrogénio [26].

A maior desvantagem do hidrogénio é que, embora as emissões de CO<sub>2</sub> desapareçam, as emissões de NO<sub>x</sub> continuam presentes, mesmo que em menor quantidade [28].

### **3.2 Desafios na implementação do Hidrogénio**

Apesar de o hidrogénio ser o elemento mais abundante na natureza, há desafios na sua implementação e no seu armazenamento [26]. O abastecimento de H<sub>2</sub> líquido não requer só a sua produção e capacidade logística, mas também novas estruturas de abastecimento de combustível e de operações nos aeroportos [27].

Com o uso do hidrogénio, tem de se considerar as diferentes propriedades deste combustível face ao querosene. Este último, quando derramado ou vazado, permanece no solo como um risco inflamável. Já o H<sub>2</sub> rapidamente se dispersa para o ar. Além disso, os tanques, sistemas de reabastecimento, como mangueiras, hermeticamente selados em operações normais, deverão adotar novas normas devido às elevadas pressões. Presume-se, no entanto, que o raio de segurança usado hoje possa continuar a ser o mesmo quando se utilizar o hidrogénio [27].

Por outro lado, para que o hidrogénio seja implementado como um combustível na aviação, são necessárias grandes modificações nas aeronaves atuais uma vez que o uso deste combustível requer tanques de armazenamento reforçados que alteram os seus pesos e centros de gravidade [26]. O hidrogénio líquido (LH<sub>2</sub>) deverá estar a uma temperatura de -253°C e a pressão manter-se constante a cerca de 1.45 bar. Estes tanques têm de ser selados para que não haja qualquer entrada de ar, caso contrário ficará em estado sólido e inutilizável. Caso o hidrogénio seja comprimido, e não líquido, a pressão nos tanques deve estar entre 350 e 700 bar, o que torna ainda mais complicada a sua utilização. [29]

Deve, igualmente, ter-se em conta que, ao contrário do que acontece atualmente com os combustíveis fósseis, que são produzidos numa

refinaria e transportados para o aeroporto onde são guardados até serem utilizados, o abastecimento de hidrogénio apresenta variantes dependendo do seu estado: líquido ou gasoso. Assim, o hidrogénio líquido, assumindo que ele é produzido por eletrólise e liquefeito fora das instalações aeroportuárias, pode ser transportado por via marítima, terrestre, ferroviária ou por gasodutos. No caso do hidrogénio no estado gasoso, este pode ser também transportado por gasodutos, no entanto, implica que seja liquefeito nas instalações do aeroporto antes de ser armazenado. Por outro lado, se porventura o aeroporto estiver localizado numa zona com área suficiente e fontes de energias renováveis nas proximidades, o hidrogénio líquido pode ainda ser produzido nessa área, diminuindo assim os custos de transporte [28].

Outro desafio é conseguir armazenar grandes quantidades de hidrogénio, o que necessita a criação de infraestruturas específicas. Presentemente, já existem algumas destas infraestruturas, por exemplo, na NASA, com tanques com capacidade para 270 toneladas de hidrogénio líquido e um volume de 3800 metros cúbicos [28]. Um tanque com esta capacidade pode abastecer, aproximadamente, 40 a 50 aeronaves de médio curso. Comparativamente com as estruturas existentes atualmente para o "jetfuel", estes tanques têm de ter um volume quatro vezes maior [30].

Considerando ainda o abastecimento de hidrogénio líquido apresentam-se três cenários principais, LH<sub>2</sub> no local, LH<sub>2</sub> fora do aeroporto e GH<sub>2</sub> também fora do local.

Em primeiro lugar, no cenário em que o LH<sub>2</sub> é produzido no local, a produção do H<sub>2</sub> e a sua liquefação é feita nos arredores do aeroporto ou no próprio aeroporto, evitando-se, deste modo, dificuldades no seu transporte. Para isso, são necessários componentes de conversão; a energia "verde" é produzida a partir de fontes de energias renováveis como painéis fotovoltaicos ou energia eólica. Estas alimentam os sistemas de eletrólise da água para a formação de hidrogénio no estado gasoso. Um compressor para elevar a pressão do hidrogénio pode ainda ser necessário. Por fim, o hidrogénio é arrefecido até atingir o estado líquido. Para o armazenamento são precisos tanques pressurizados, um para o hidrogénio no estado gasoso e outro para quando este já se encontra no estado líquido para posteriormente entrar no sistema de reabastecimento do aeroporto. Para armazenar o hidrogénio também são necessárias bombas criogénicas para evitar perdas. Neste cenário, para produzir 50 toneladas de hidrogénio por dia, seriam necessários, aproximadamente, 5000 a 10000m<sup>2</sup> de espaço [31].

Em suma, a produção, liquefação e tanques de armazenamento de 700000 litros de hidrogénio, que se antevê como necessário para alimentar 8 a 12 aeronaves de médio curso implica um espaço adicional de 13000m<sup>2</sup>, sem incluir o espaço requerido para as energias renováveis usadas na produção de H<sub>2</sub> [31].

Para um aeroporto movimentado, como é o caso do aeroporto de Sydney Kingsford Smith, onde são necessários 10000 litros de querosene por dia, se se quisesse transformar todos os voos em voos movidos a hidrogénio seria necessária uma área de 1.3 milhões de m<sup>2</sup>, o que equivale a 15% da área total do aeroporto [31].

No segundo cenário em que o LH<sub>2</sub> é produzido fora das instalações aeroportuárias, este tem de ser transportado por via marítima, terrestre ou ferroviária. São, desta forma, necessários terminais de exportação e importação que consistem em tanques e bombas criogénicas para carga e descarga das embarcações [31]. Este esquema evita o armazenamento fixo intermédio de LH<sub>2</sub> e as transferências intermédias, que são as principais fontes de ineficiência no manuseamento de LH<sub>2</sub>; é flexível e não exige espaço ou investimentos significativos no aeroporto. O fator limitativo é o grande número de camiões necessários, o que resulta em custos de transporte/logística elevados e num potencial congestionamento do tráfego nas proximidades e nos aeroportos [9].

Por fim, no terceiro cenário, em que o GH<sub>2</sub> é fabricado fora do aeroporto, este tem de ser transportado por gasodutos para o aeroporto. Aqui, é necessária uma infraestrutura para liquefação do H<sub>2</sub> no aeroporto. Os gasodutos podem ser novos ou pode ser feito uma adaptação dos que são atualmente usados para o gás natural e que irão cair em desuso no futuro. Para além disso é necessário um compressor para o GH<sub>2</sub> e estações de válvulas [31].

Também os terminais serão alterados e, provavelmente, criar-se-á terminais específicos para as aeronaves a hidrogénio separados dos das aeronaves tradicionais, dado que necessitarão de uma área de segurança maior [31]. Atualmente, os terminais têm uma zona de segurança de combustível (FSZ – Fuel Safety Zone) com um raio de 3 m, para o hidrogénio calcula-se que a FSZ seja de cerca de 20 m [32].

### **3.3 Uso e desenvolvimento atual do hidrogénio**

Atualmente, está em curso um projeto no aeroporto de Londres Gatwick liderado pela Airbus, a EasyJet e a Air Products, para estabelecer como as infraestruturas necessárias para o hidrogénio podem ser implementadas no aeroporto [33].

A Airbus lançou o programa “Hydrogen Hub at Airports” para começar a programar quais serão as infraestruturas necessárias e qual a logística, para que se possa começar a usar o H<sub>2</sub> já em 2035 na aviação comercial. O aeroporto de Gatwick servirá como teste, já que opera com mais voos de curto/médio curso [34].

## **4 ELETRICIDADE**

### **4.1 Definição e aplicação**

A aviação elétrica é um conceito promissor para o combate ao aquecimento global, já que permite eliminar as emissões de CO<sub>2</sub>, especialmente na estratosfera [35].

A aviação elétrica pode ser dividida em duas categorias, a propulsão 100% elétrica e a híbrida [36].

A configuração 100% elétrica, embora elimine as emissões de CO<sub>2</sub>, reduza o ruído e minimize os custos de operação, está limitada pelos desenvolvimentos tecnológicos das baterias. Presentemente, nenhuma bateria consegue competir com uma aeronave movida a combustível, já que não é possível atingir as mesmas distâncias. Este tipo de propulsão só é usado para voos de curta distância [37]. Por exemplo, comparando o uso do querosene com a utilização de uma bateria de lítio, constata-se que a melhor bateria de lítio existente no mercado pesa cerca de 13 vezes mais do que a quantidade equivalente de querosene. Desta forma, um avião com um tanque de 250kg de querosene tem um tempo máximo de voo de 260 minutos. Substituindo este tanque por 250kg de baterias de lítio, o tempo de voo ficaria reduzido a um máximo de 20 minutos. [38]

Numa configuração híbrida, a aeronave usa várias fontes de energia durante o voo, quer em simultâneo, quer separadamente. A mistura de várias fontes de energia, seja ela combustível fóssil ou SAF combinado com eletricidade otimiza a eficiência energética e reduz o consumo de combustível até 5% quando comparado com um voo normal. A eletricidade utilizada pode vir de baterias ou de células de combustível que transformam hidrogénio em eletricidade [36].

## **4.2 Desafios na implementação da Eletricidade**

Um dos constrangimentos da aviação elétrica é o peso das baterias, hoje em dia seriam necessárias 35 toneladas de baterias para alimentar um avião como o Boeing 737 [39].

Por outro lado, atualmente, as infraestruturas existentes não estão desenhadas para este novo tipo de aeronaves e, por isso, precisam de ser repensadas. Seria inevitável rever as infraestruturas necessárias para recarregar as baterias. Isto implicaria um fornecimento de energia muito maior na reconfiguração dos aeroportos atuais. Assim, percebe-se que o custo da eletricidade aumentaria e teria de ser tido em conta [40].

De modo a minimizar as modificações nos aeroportos, a solução mais simples é a troca de baterias. Este método requer, no entanto, a compra de muitas baterias para ter reservas [35].

Outro entrave é o carregamento de baterias "plug-in" que requer carregadores de elevada potência para poder cumprir com os horários dos voos. Este método "plug-in" é limitado pela capacidade "hardware" dos carregadores o que torna esta solução irrealista devido à elevada procura [35].

Apesar destes constrangimentos, assume-se que o futuro da aviação geral e regional - que representa apenas uma pequena parte do tráfego

aéreo - basear-se-á nas tecnologias de propulsão elétrica (baterias eletroquímicas ou células de combustível alimentadas a hidrogénio) e nas tecnologias híbridas (querosene-elétrica, em série ou em paralelo).

Os híbridos parecem ser a tecnologia mais avançada em termos de tempo de colocação no mercado, capacidade de carga útil e autonomia máxima e horizontes de certificação [9].

Em relação às baterias eletroquímicas, existem várias soluções de carregamento disponíveis nos aeroportos, tais como: os carregadores fixos de potência variável instalados nas zonas de estacionamento dos aviões para permitir o seu recarregamento durante o tempo de rotação ou em zonas dedicadas ao estacionamento de longa duração para recarga. Estes carregadores serão alimentados pela rede elétrica do aeroporto; os carregadores móveis que distribuem eletricidade armazenada em baterias ou produzida por uma pilha de combustível que utiliza hidrogénio armazenado (uma solução para os aeroportos cuja ligação à rede elétrica é difícil); e o método de "battery swapping" (substituição de baterias vazias por baterias recarregadas).

A utilização da eletricidade como fonte de energia para as aeronaves implica ainda que estas necessidades sejam integradas nos planos diretores gerais de eletricidade dos aeroportos, a fim de garantir a conformidade entre a potência subscrita, a energia disponível e a energia necessária. Esta questão é importante já que muitas aplicações aeroportuárias estão também a passar para a eletricidade veículos, equipamentos de assistência em escala, sistemas de substituição da APU dos aviões, etc, aumentando assim ainda mais as necessidades.

Os aeroportos podem também ter de considerar a "smart grid" (um sistema de gestão inteligente para o armazenamento e a distribuição de eletricidade na rede) e/ou a instalação de baterias de grande capacidade ou outras soluções de armazenamento, como o hidrogénio, para fazer face aos picos de procura de eletricidade [9].

### **4.3 Uso e desenvolvimento atual da eletricidade**

Atualmente, são ainda escassos os casos de uso, no entanto pode destacar-se a "Air New Zealand" que selecionou dois aeroportos: Wellington e Marlborough, para a rota de demonstração de voos comerciais 100% elétricos. Ambos os aeroportos terão infraestruturas de carregamento. Estes testes têm como objetivo eletrificar todos os voos internos do país [41].

Também a Escandinávia tem desenvolvido esta área esperando ter o primeiro voo comercial totalmente elétrico em 2028 [42].

## **5 CONCLUSÕES**

A transição da indústria aeronáutica atual para uma mais sustentável que consiga eliminar todas as emissões até 2050 exige novas tecnologias e infraestruturas adequadas.

O uso dos SAF parece ser a melhor solução atualmente, porque, além de permitir uma redução de, pelo menos 57% de CO<sub>2</sub> em relação ao querosene [9], aproveita as infraestruturas existentes, minimizando a necessidade de mudanças, sendo, por isso, mais rentável e mais rápida para tentar atingir a meta definida.

A propulsão a hidrogénio enfrenta inúmeros desafios no que toca à sua produção, ao armazenamento e à cadeia de abastecimento, sendo necessária a construção de infraestruturas, tanto para a liquefação do hidrogénio, como de tanques criogénicos para o armazenar e um abastecimento diferente do atual devido às suas propriedades.

No caso da aviação elétrica, seja ela a 100% ou assente num sistema híbrido, é inegável que esta contribui para a redução das emissões e do ruído, no entanto, está limitada pela capacidade das baterias existentes nos dias de hoje e necessita de infraestruturas diferentes das que os aeroportos possuem neste momento para o carregamento dessas baterias. Esta seria uma solução passível de ser implementada mais rapidamente para as aeronaves que percorrem curtas distâncias.

Apesar de todas as tecnologias apresentarem desafios à sua implementação, todas elas serão necessárias para termos um futuro na aviação sustentável. No sentido de viabilizar este objetivo de aviação mais limpa, terá que se conjugar estas três opções. Assim, a solução ideal, para já, poderá passar pela implementação de aviões elétricos no caso de servirem apenas para voos mais curtos, como é o caso de aviões de escolas de pilotagem ou aeronaves usadas para lazer. Também será importante aumentar o uso do SAF na aviação comercial de médio/longo curso e, futuramente, construir novas infraestruturas, novas aeronaves e terão que se definir normas de segurança necessárias para que se possa desenvolver a propulsão a hidrogénio.

## AGRADECIMENTOS

The authors are grateful for the Foundation for Science and Technology's support through funding UIDB/05703/2020 from the research unit CiTUA.

## REFERÊNCIAS

- [1] Babuder, Diego, et al. "Impact of emerging sustainable aircraft technologies on the existing operating ecosystem." *Journal of Air Transport Management* 115 (2024): 102524.
- [2] Kivits, Robbert, Michael B. Charles, and Neal Ryan. "A post-carbon aviation future: airports and the transition to a cleaner aviation sector." *Futures* 42.3 (2010): 199-211.
- [3] SUSTAINABLE aviation fuels. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/sustainable-aviation-fuels>. Acesso em: 14 ago. 2024.
- [4] REFUELEU Aviação - Um marco para contribuir para a descarbonização da aviação | EASA. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/pt/light/topics/refueleu-aviation>. Acesso em: 14 ago. 2024.
- [5] OBJETIVO 55 e ReFuelEU Aviação | EASA. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/pt/light/topics/fit-55-and-refueleu-aviation>. Acesso em: 15 set. 2024.



- [6] Boeing clears the way for sustainable aviation fuel use on RAF aircraft. Disponível em: <https://www.raf.mod.uk/news/articles/boeing-clears-the-way-for-sustainable-aviation-fuel-use-on-raf-aircraft/>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- [7] Rodríguez, Helena. *Sustainable Aviation Fuel Implementation Strategies for European Airports*. MS thesis. 2023.
- [8] ICAO Environment SAF Logistics. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/ACT%20SAF%20Series%207%20-%20SAF%20Logistics.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2024.
- [9] FEUILLE DE ROUTE de décarbonation de l'aérien. Disponível em: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Proposition%20de%20feuille%20de%20route%20décarbonation%20transport%20aérien.pdf>. Acesso: 13 ago. 2024.
- [10] Barke, Alexander, et al. "Are sustainable aviation fuels a viable option for decarbonizing air transport in Europe? An environmental and economic sustainability assessment." *Applied Sciences* 12.2 (2022): 597.
- [11] Baldo, Arianna. "ALIGHT document review and quality control." (2022).
- [12] Neste MY Sustainable Aviation Fuel. Disponível em: <https://www.neste.com/products-and-innovation/sustainable-aviation/sustainable-aviation-fuel>. Acesso: 15 ago. 2024.
- [13] INTERNATIONAL, F. Sustainable Aviation Fuel | San Francisco International Airport. Disponível em: <https://www.flysfo.com/pt-pt/node/10501>. Acesso em: 17 ago. 2024.
- [14] Sustainable Aviation Fuel Feasibility Study Sustainable Aviation Fuel Feasibility Study Final Report. Disponível em: [https://www.flysfo.com/sites/default/files/SFO\\_Sustainable\\_Aviation\\_Fuel\\_Feasibility\\_Study\\_Report.pdf](https://www.flysfo.com/sites/default/files/SFO_Sustainable_Aviation_Fuel_Feasibility_Study_Report.pdf). Acesso em: 15 ago. 2024
- [15] Continuous supply of sustainable aviation fuel at SFO | Neste. Disponível em: <https://www.neste.com/news-and-insights/aviation/continuous-supply-sustainable-aviation-fuel-sfo>. Acesso em: 16 ago. 2024.
- [16] Neste delivers sustainable aviation fuel to San Francisco International Airport – first company to deliver it via pipeline. Disponível em: <https://www.neste.com/news/neste-delivers-sustainable-aviation-fuel-to-san-francisco-international-airport-first-company-to-deliver-it-via-pipeline>. Acesso em: 16 ago. 2024.
- [17] MCDONNELL, B. White Paper | Sustainable Aviation Fuel and Existing Infrastructure. Disponível em: <https://info.burnsmcd.com/white-paper/sustainable-aviation-fuel-and-existing-infrastructure?abm=true>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- [18] MEDIA, A. Neste, Laxfuel deliver 1,500t SAF to LAX on barges. Disponível em: <https://www.argusmedia.com/pt/news-and-insights/latest-market-news/2393559-neste-laxfuel-deliver-1-500t-saf-to-lax-on-barges>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [19] TotalEnergies Is the First to Provide a Permanent Supply of Sustainable Aviation Fuel in France at Paris-Le Bourget Airport. Disponível em: <https://aviation.totalenergies.com/en/blog/horizon/totalenergies-first-provide-permanent-supply-sustainable-aviation-fuel>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [20] ENAC ALUMNI. Le carburant aérien durable Total Energies disponible à Paris-Le Bourget. Disponível em: <https://www.alumni.enac.fr/fr/news/le-carburant-aerien-durable-total-energies-disponible-a-paris-le-bourget-870>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [21] Singapore is operationally ready for sustainable aviation fuel but more is needed to support adoption. Disponível em: <https://www.caas.gov.sg/who-we-are/newsroom/Detail/singapore-is-operationally-ready-for-sustainable-aviation-fuel-but-more-is-needed-to-support-adoption>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [22] Singapore Airlines Group orders sustainable aviation fuel from Neste. Disponível em: <https://www.neste.com/news/singapore-airlines-group-orders-sustainable-aviation-fuel-from-neste>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [23] TAP, GALP e ANA juntos no primeiro voo com SAF em Portugal. Disponível em: <https://www.galp.com/corp/pt/media/comunicados-de->

- imprensa/comunicado/id/1367/tap-galp-e-ana-juntos-no-primeiro-voe-com-saf-em-portugal. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [24] BOEING. ENVIRONMENTAL BENEFITS ADDITIONAL BENEFITS. Disponível em: <https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/principles/esg/SAF-fact-sheet.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [25] Hidrogênio: O elemento transformador da economia e do planeta. Disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/o-que-e-o-hidrogenio>. Acesso em: 21 ago. 2024.
- [26] Yusaf, Talal, et al. "Sustainable aviation—Hydrogen is the future." *Sustainability* 14.1 (2022): 548.
- [27] Hoelzen, Julian, et al. "Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure—Review and research gaps." *International Journal of Hydrogen Energy* 47.5 (2022): 3108-3130.
- [28] Sopena López, Sara. *Feasibility tool and business plan for the adaptation of airports to hydrogen-powered aircraft*. BS thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, 2023.
- [29] Sürer, Meryem Gizem, and Hüseyin Turan Arat. "State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation." *European Mechanical Science* 2.1 (2018): 20-30.
- [30] Gu, Yue, et al. "Hydrogen-Powered Aircraft at Airports: A Review of the Infrastructure Requirements and Planning Challenges." *Sustainability* 15.21 (2023): 15539.
- [31] Hoelzen, Julian, et al. "H<sub>2</sub>-powered aviation—Design and economics of green LH<sub>2</sub> supply for airports." *Energy Conversion and Management: X* 20 (2023): 100442.
- [32] Babuder, Diego, et al. "Impact of emerging sustainable aircraft technologies on the existing operating ecosystem." *Journal of Air Transport Management* 115 (2024): 102524.
- [33] Airbus welcomes London Gatwick to global hydrogen hub network. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-07-airbus-welcomes-london-gatwick-to-global-hydrogen-hub-network>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [34] Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-07-airbus-welcomes-london-gatwick-to-global-hydrogen-hub-network>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- [35] Guo, Zekun, et al. "Aviation to grid: Airport charging infrastructure for electric aircraft." International Conference on Applied Energy, 2020.
- [36] Hybrid and Electric Flight | Airbus. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hybrid-and-electric-flight>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- [37] Adu-Gyamfi, Bright Appiah, and Clara Good. "Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies." *Transportation Engineering* 9 (2022): 100134.
- [38] Rezende, Rene N., Eduardo Barros, and Vladia Perez. "General Aviation 2025—A study for electric propulsion." *2018 joint propulsion conference*. 2018.
- [39] JACOBO, J. How passenger electric planes could become a reality within the next decade. Disponível em: <https://abcnews.go.com/Business/passenger-electric-planes-become-reality-decade/story?id=106223258>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- [40] Trainelli, Lorenzo, et al. "Optimal sizing and operation of airport infrastructures in support of electric-powered aviation." *Aerospace* 8.2 (2021): 40.
- [41] Mission Next Gen Aircraft: Air New Zealand announces airport selection. Disponível em: <https://www.airnewzealandnewsroom.com/press-release-2024-mission-next-gen-aircraft-air-new-zealand-announces-airport-selection>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- [42] Reserve your seat in the future of aviation. Disponível em: <https://travel.flysas.com/electric>. Acesso em: 29 ago. 2024.



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MOTORES JUNKERS 2-TEMPOS

**LAIA ANTUNES, JOÃO (1); BRÓJO, FRANCISCO (2); GREGÓRIO, JORGE (3)**

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-mail: [joao.laia.antunes@ubi.pt](mailto:joao.laia.antunes@ubi.pt)

(2) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-mail: [brojo@ubi.pt](mailto:brojo@ubi.pt)

(3) INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA, E-mail: [jgregorio@ipg.pt](mailto:jgregorio@ipg.pt)

### RESUMO

Este estudo desenvolve o tema da evolução e do estado atual dos motores de pistões opostos a 2-tempos em particular dos motores Junkers, muito utilizados no século XX. Os motores Junkers Jumo 205 e 207 foram o seu expoente máximo, tendo equipado aeronaves civis e militares antes e durante a segunda Guerra Mundial, bem como locomotivas e submarinos. Este tipo de motores são caracterizados pela sua eficiência térmica e mecânica, sendo de fabricação simples, baixo consumo de combustível e potência elevada.

Na década de 70 do século passado e devido à legislação ambiental implementada na época com o objetivo de limitar as emissões poluentes, estes tipo de motores entraram em declínio, mesmo assim ainda são vistos como promissores para aplicações que exigem potência compacta. Tanto é que empresas como a Achatas Power e a Cummins continuam a desenvolver novos modelos, tendo como base os motores Junkers, utilizando tecnologia computacional e novos materiais a fim de melhorar o desempenho e reduzir as emissões. Também outras empresas e academias têm regressado ao estudo destes motores, devido ao seu potencial de eficiência e de aplicações, em especial na aviação.

Os motores de pistões opostos a 2-tempos apresentam margem de progressão futura, com evoluções no que diz respeito à sua arquitetura, principalmente com a utilização de novas tecnologias que permitem ultrapassar limitações ambientais e desenvolver as suas vantagens estruturais e mecânicas.

**Palavras-chave:** Motor de Pistões Opostos, Aeronáutica, Cilindro.

### ABSTRACT

*This study develops the theme of the evolution and current state of 2-stroke opposed piston engines, particularly Junkers engines, widely used in the 20th century. The Junkers Jumo 205 and 207 engines were its peak, having equipped civil and military aircraft before and during the Second World War, as well as locomotives and submarines. This type of engines are characterized by their thermal and mechanical efficiency, being simple to manufacture, low fuel consumption and high power.*

*In the 70s of the last century and due to environmental legislation implemented at the time with the aim of limiting polluting emissions, these types of engines went into decline, although they are still seen as promising for applications that require compact power. So much so that companies such as Achatas Power and Cummins continue to develop new models, based on Junkers engines, using computer technology and new materials in order to improve performance and reduce emissions. Other companies and academies have also returned to studying these engines, due to their potential for efficiency and applications, especially in aviation.*

*2-stroke opposed piston engines present scope for future progression, with evolutions regarding their architecture, mainly with the use of new technologies that allow environmental limitations to be overcome and their structural and mechanical advantages to be developed.*

**Keywords:** *Opposed Piston Engine, Aeronautics, Cylinder.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os motores de pistão sempre tiveram um papel muito importante na aeronáutica, estes são ainda responsáveis pela propulsão de cerca de 80% das pequenas aeronaves e helicópteros (EL-SAYED, 2017). Dentro desses motores, os motores de pistões opostos a 2-tempos tiveram o seu desenvolvimento inicial pelas mãos de Wittig em 1878, tendo a sua comercialização começado em 1900 (STONE, 1999). Este tipo de motores ganhou relevância em várias aplicações, como são os casos da rodoviária, ferroviária, marítima e aeronáutica, muito graças à sua eficiência, simplicidade de fabricação e equilíbrio mecânico (PIRAULT, 2009). Muito embora, depois da Segunda Guerra Mundial a sua utilização tenha sido reduzida, graças ao consumo excessivo de óleo e também devido a normas ambientais apertadas (STONE, 1999).

Nos últimos anos, voltou o interesse pelos motores de pistões opostos a 2-tempos, muito graças aos avanços em dinâmica de fluidos computacionais, novos materiais e novas técnicas de engenharia. Este tipo de motores apresentam uma grande densidade de potência, excelente rendimento térmico e simplicidade estrutural, características essas que continuam a superá-los em relação a outros tipos de motores (BRÓJO al., 2010) (REGNER al., 2011). Além disso, com o desenvolvimento de novos programas de análise computacional e o desenvolvimento de novos materiais, foi possível ultrapassar limitações antigas, como é o caso das emissões poluentes, mantendo as suas inúmeras vantagens (PIRAULT, 2009).

O objetivo deste trabalho foi o de realizar uma revisão abrangente sobre o estado da arte dos motores Junkers a 2-tempos, tendo como pontos de estudo a sua evolução histórica bem como as aplicações onde estes foram instalados, evolução técnica que sofreu e perspectivas futuras. O estudo enfoca também as vantagens dos motores de pistões opostos a 2-tempos em relação a outros tipos de motores de combustão interna, sendo destacados os avanços alcançados em termos de eficiência térmica, consumo de combustível, potência e utilização por parte da indústria (STONE, 1999) (GREGÓRIO, 2017).

Para atingir os objetivos previstos neste estudo, foi utilizada uma metodologia que envolveu uma revisão bibliográfica detalhada das principais fontes sobre o desenvolvimento e aplicações de motores de pistões opostos a 2-tempos, incluindo estudos mais antigos (TAYLOR, 1985) e (MAITRE, 1976) e estudos mais recentes (REGNER al., 2011) e (PIRAULT, 2009). Também foram estudados alguns motores como é o caso do

Junkers Jumo 205 e o 207, muito utilizado na aviação civil e militar no período da Segunda Guerra Mundial, bem como as aplicações em veículos terrestres, navios e sistemas industriais (ALVES, 2011) (SCOTT, 1917).

Este artigo está organizado em várias partes. A primeira parte contextualiza o avanço dos motores de pistões opostos a 2-tempos desde a sua invenção até ao seu declínio no pós Segunda Guerra Mundial. A segunda parte aborda as características técnicas dos motores Junkers Jumo, realçando a relevância histórica e as inovações que sofreram, bem como as suas vantagens. A parte final aborda o renascimento destes motores, as várias aplicações em diferentes setores e a comparação com outros motores de combustão interna, limitações e desafios.

Espera-se assim que este artigo ofereça uma visão ampla e atual dos motores de pistões opostos a 2-tempos, realçando as vantagens e os desafios, propondo novos caminhos para o seu desenvolvimento futuro.

## **ESTADO DA ARTE**

Desta forma foi feito um resumo do estado da arte que realça a evolução dos motores Junkers a 2-tempos até aos nossos dias.

Os motores de pistões opostos iniciaram a sua comercialização no ano de 1900, tendo sido utilizados em várias aplicações como a rodoviária, a ferroviária, a marítima e a aeronáutica.

Por serem motores de fácil fabricação e com um equilíbrio muito bom, a sua evolução foi natural e rápida, uma vez que apresentavam grandes desempenhos mecânicos e uma grande economia de combustível (PIRAULT, 2009). É de tal forma que alguns recordes por eles atingidos subsistem até aos dias de hoje, como é o caso do rendimento térmico e densidade de potência, sem igual por qualquer outro tipo de motor (BRÓJO al., 2010).

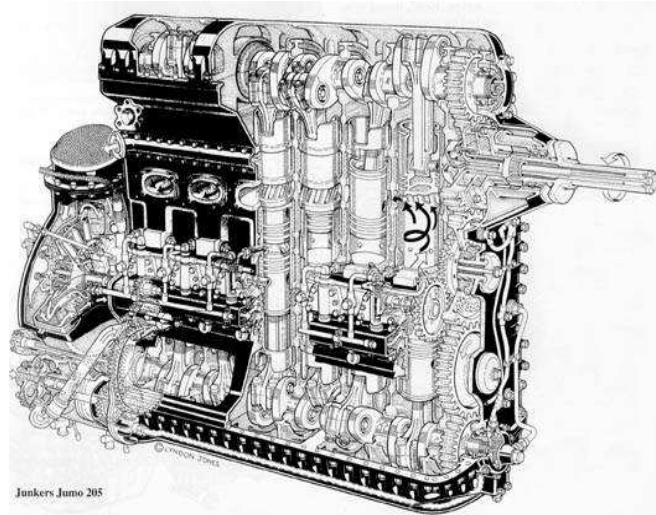
De entre todos os motores de pistões opostos a 2-tempos, o que mais se destacou foi o da classe Junkers Jumo.

## **Junkers Jumo**

Os motores alternativos de combustão interna de pistões opostos a 2-tempos a gasóleo, Junkers Jumo 205 foram utilizados na aviação civil no pré-Segunda Guerra Mundial e durante a mesma na aviação militar alemã equipando as aeronaves Junkers Ju 52/3m (ALVES, 2011). Já o motor Junkers Jumo 207 equipou a aeronave militar Junkers Ju 86 P. Com este tipo de motores a diesel a 2-tempos foi possível atingir potências elevadas com baixas RPM'S, tendo tal característica levado à sua utilização em larga escala em locomotivas (Napier Deltic e Fairbanks-Morse), em submarinos (Fairbanks-Morse) e em navios (Doxford) nas décadas de 50 e 60 do século passado.

Este motor apresenta uma disposição vertical dos cilindros, como pode ser visto na Figura 1. Arrefecidos a óleo e com duas cambotas, uma na parte superior do bloco, a de escape, ligadas aos pistões de escape, e outra na parte inferior do bloco, a de entrada do ar, ligada aos pistões de entrada de ar (STONE, 1999).

**Figura 1 – Motor Junkers Jumo 205**



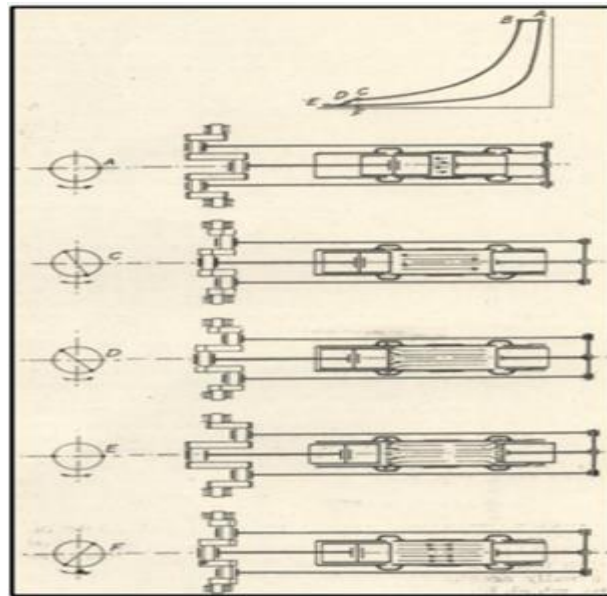
**Fonte:** SIADKOWSKA, K. et. al. (2017)

Os pistões de escape efetuam a extração dos gases resultantes da combustão e os de entrada de ar efetuam a entrada de ar fresco dentro dos cilindros, efetuando a abertura das janelas aquando da passagem dos pistões (TAYLOR, 1985). A ligação entre a cambota de escape e a cambota de entrada de ar é efetuada na frente do bloco do motor, através de uma engrenagem com cinco rodas dentadas. Sendo acionado no centro da engrenagem duas árvores de cames que efetuam o controlo das bombas de injeção de combustível de cada cilindro. O coletor de admissão encontra-se na parte de trás do cárter e o coletor de escape na frente do respetivo cárter, com ligação ao escape (STONE, 1999).

Este motor tem um funcionamento idêntico ao de um motor convencional de ignição por compressão a 2-tempos (GREGÓRIO, 2017).

Como se pode observar na Figura 2 o funcionamento do motor inicia-se com o aproximar dos pistões um ao outro, comprimindo o ar aí existente. Antes do estado A, começa a injeção de combustível. Já no estado B, a injeção é parada e inicia-se a propagação dos gases. No ponto C, o pistão de escape abre a janela de saída dos gases e dá-se a saída à pressão atmosférica. No ponto D, o pistão de escape abre outra janela pela qual entra ar fresco no cilindro sob pressão, obrigando os gases de escape a serem extraídos. Quando as janelas são de novo fechadas, ar fresco é introduzido no cilindro e inicia-se a compressão, terminando o ciclo (PENNINGER, A. et al., 2006).

**Figura 2 – Ciclo do Motor Junkers**



**Fonte:** SCOTT (1917)

As janelas de transferência estão colocadas numa posição diagonal, o que lhes confere um movimento ativo em espiral no que diz respeito ao fluxo de entrada de ar fresco. Com este movimento em espiral é mantido um espaço livre no centro do cilindro durante o estado de compressão e potência. Nesse espaço livre rotativo de ar é injetado combustível atomizado e distribuído até ao fim de curso de compressão. Já a injeção é efetuada sem a presença de ar, sendo utilizadas bombas hidráulicas que obrigam o combustível a ser introduzido no cilindro por meio de injetores (TAYLOR, 1985).

### **O presente**

Na década de 70 do século passado, com a criação de normas sobre emissões poluentes e com a obrigatoriedade de escapes para tratar os gases resultantes da combustão, desacelerou a utilização de motores de pistões opostos a 2-tempos (PIRAULT, 2009).

Nos dias de hoje por todo o mundo ainda são utilizados motores de pistões opostos a 2-tempos, muito embora tenha sido reduzida a sua utilização pelos problemas causados com as emissões poluentes. Apesar disso, os motores de pistões opostos atingiram muitos recordes que ainda hoje perduram. Relação peso potência, melhoramento do equilíbrio dinâmico, redução do consumo de combustível, rendimento térmico e simplicidade de fabricação. Por estas razões estes motores permanecem viáveis para aplicações que necessitem de potências elevadas, compactas, simplicidade de fabrico e de fiabilidade (PIRAULT, 2009).

Apesar do desinteresse provocado pela implementação das normas limitativas de emissões poluentes dos motores de pistões opostos a 2-

tempos, com o aparecimento dos computadores e o desenvolvimento de métodos computacionais de dinâmica de fluidos (CFD), a utilização de programas de análise, novos materiais e métodos de engenharia, esta a ser possível voltar a desenvolver o motor de pistões opostos a 2-tempos a fim de se conseguir ultrapassar as normas restritivas relativas as emissões, mantendo as vantagens que eles podem apresentar (REGNER, al., 2011).

### **Vantagens Técnicas dos Motores de Pistões Opostos a 2-tempos**

Os motores de pistões opostos a 2-tempos, apresentam inúmeras vantagens técnicas em relação a outro tipo de motores de combustão interna. A sua elevada eficiência térmica e mecânica são uma das suas imagens de marca, sendo também a sua simplicidade estrutural e fabricação simples outra das suas mais valias. O fato de serem motores com baixos consumos de combustível e alta densidade de potência permite uma utilização ideal para várias utilizações, como na aviação. Outra das suas grandes vantagens é o equilíbrio dinâmico que se consegue pela configuração dos pistões opostos, reduzindo vibrações e aumentando a sua durabilidade em termos de componentes mecânicos. A arquitetura é outra das vantagens destes motores, pois graças a ela é maximizado o rendimento energético do motor. Por fim e muito graças aos avanços computacionais e de novos materiais, foi possível ultrapassar as limitações do passado, mantendo as vantagens que sempre caracterizaram estes motores.

### **Avanços Tecnológicos na Indústria**

Nos dias de hoje existem mais empresas a comercializar e a desenvolver motores de pistões opostos do que no final do século passado, para as mais diversas aplicações.

As britânicas *Diesel Air Limited* em conjunto com a *Weslake Air Services* e a *Jade Air*, uniram-se a fim de desenvolver e comercializar um motor diesel para aeronaves ligeiras, o Gemini 100, tendo este motor sido inspirado no projeto original do motor Junkers Jumo, sendo caracterizado por ter 3 cilindros sobrealimentados a trabalhar na horizontal ("Motor Gemini 100", 2024).

A empresa britânica *Powerplant Developments* e o seu presidente *Derek Graham*, acreditam que as aeronaves ligeiras são o futuro da indústria aeronáutica e por isso a sua aposta assenta no desenvolvimento de um motor com 100 cavalos de potência e um peso de 70 kg (SANTOS, 2009).

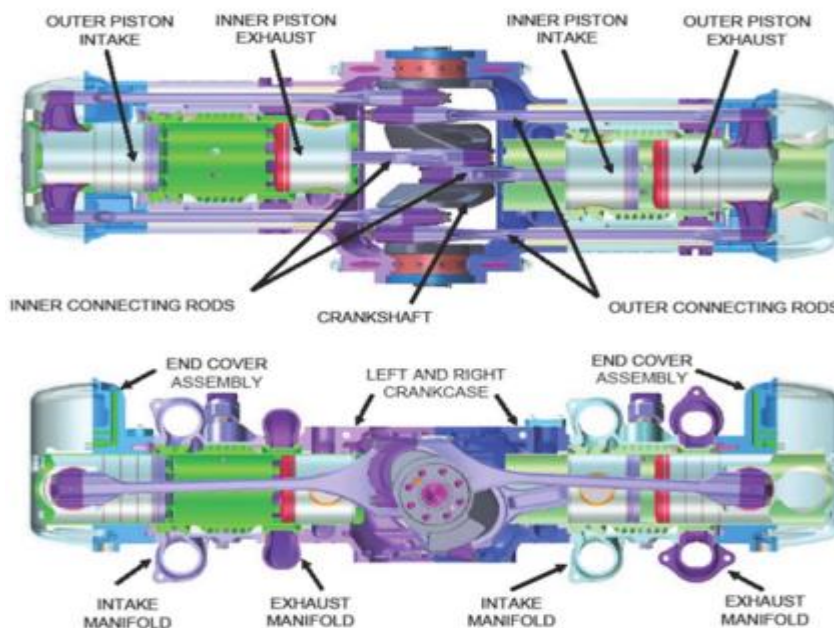
Já a norte americana *Achates Power* testou um motor de 3 cilindros horizontais, inspirado no projeto original dos motores Junkers a 2-tempos a diesel, tendo conseguido um contrato com a *Defense Advanced Research Projects Agency* a fim de produzir um motor compacto e leve para instalação em UAV'S ("Soluções de motores líderes na indústria", 2020).



A germânica *Golle Motor GmbH* desenvolveu e comercializa motores que também foram beber o conhecimento do projeto original dos motores Junkers a 2-tempos a diesel, neste caso para aplicação em sistemas de cogeração.

Já a norte americana *EcoMotors*, que tinha como investidores a *Khosla Ventures* e *Bill Gates* entre outros, desenvolve um dos mais avançados motores de pistões opostos a 2-tempos diesel que existe nos dias de hoje. Tendo sido um motor desenvolvido inicialmente pela empresa *Advanced Propulsion Technologies* para aplicações militares. Como é possível observar na Figura 3, este motor é constituído por duas câmaras de combustão e uma cambota tipo Wittig, sendo um motor extremamente compacto que pode ser aplicado em diversos fins, tal como na aeronáutica. Este motor estava previsto ser utilizado pela Porsche e pela Subaru, mas em 2017 o consorcio foi extinto e o projeto terminado ("Motor Pattakon OPRE", 2007) ("*EcoMotors*", [s.d.]).

**Figura 3 – Motor EcoMotors de pistões opostos a 2-tempos diesel**



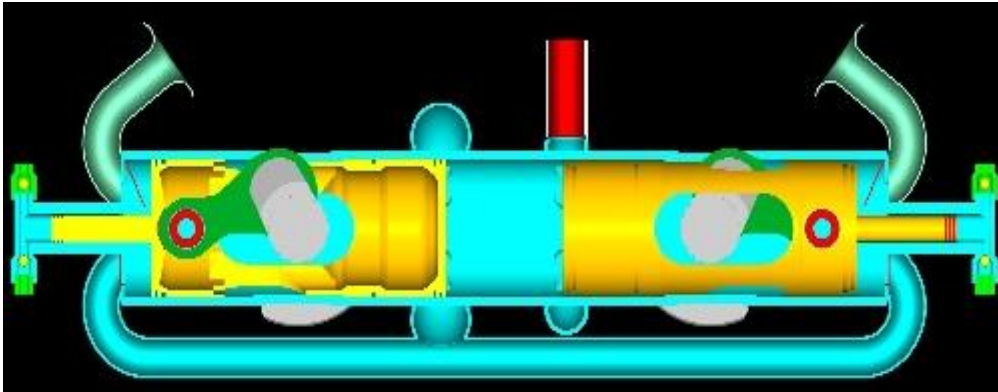
**Fonte:** "*EcoMotors*" ([s.d.])

A ucraniana *Kharkiv Morozoy Machine Building* desenvolve e comercializa motores que foram beber ao projeto original dos motores Junkers de 2-tempos a Diesel, tendo esta empresa a particularidade de ter contratado técnicos da Junkers no final da segunda Guerra Mundial, sendo das empresas mais antigas a produzir este tipo de motores e tendo na atualidade a sua principal aplicação em tanques de combate como é o T-84 e o Oplot-T.

Já a empresa grega *Pattakon* desenvolveu e comercializa motores de pistões opostos com várias variantes do motor tipo Wittig a 2-tempos com sistema de injeção, onde o motor mais conhecido é o *Opposed Piston Pulling Rod Engine*. Como é possível observar na Figura 4, neste motor de

pistões opostos o pistão empurra a biela durante a expansão dos gases, contrariamente aos motores alternativos convencionais. Mesmo sendo idêntico a um motor de pistão livre com pistões de duplo efeito, as suas duas cambotas montadas no interior dos pistões mantêm-nas na posição certa. As extremidades dos pistões servem de bomba de ar nas câmaras exteriores, alimentando de ar a câmara de combustão no interior do cilindro, entre as partes internas do cilindro, não tendo sobrealimentação (LENSKI et. al., 2015).

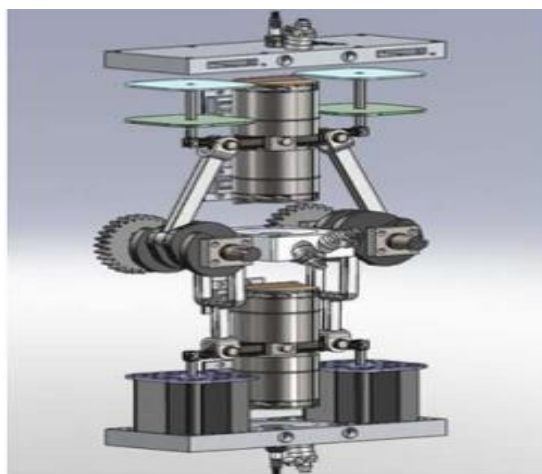
**Figura 4 – Motor Pattakon de pistões de duplo efeito a 2-tempos diesel**



**Fonte:** HEROLD, R. E. (2011)

A empresa britânica Monolith está a desenvolver um motor de estrutura inovadora de pistões opostos com duas cambotas. Estas são colocadas ao lado do cilindro que contém os dois pistões de duplo efeito e três câmaras de combustão, como é possível observar na Figura 5. É um motor de 2-tempos com injeção direta, leve e compacto. Sendo os 4 cantos do motor utilizados para instalar o sistema de bombeamento de ar para a admissão do motor, fazendo aumentar a pressão em 120% e estando previsto debitar uma potência de 200 HP ("Monolith Engine", [s.d.]).

**Figura 5 – Esquema do motor de pistões opostos da Monolith Engine**



**Fonte:** "Monolith Engine" ([s.d.])

As americanas *Achates* e *Cummins* desenvolveram um motor de ignição por compressão a 2-tempos de pistões opostos a diesel de três cilindros que debita 400 CV, como é possível observar na Figura 6. Esta aposta vem no sentido de equipar caminhões e autocarros. O modelo inicial do projeto tinha 2,7 litros, tendo depois sido alterado para 10,6 litros, estando já em estudo um novo modelo com 14,8 litros por parte da *Cummins*. Este último é um motor para equipar o caminhão *Peterbilt 579* ("Soluções de motores líderes na indústria", 2020).

**Figura 6 - Motor Achates e Cummins de 10,6 Litros**



**Fonte:** "Soluções de motores líderes na indústria" (2020)

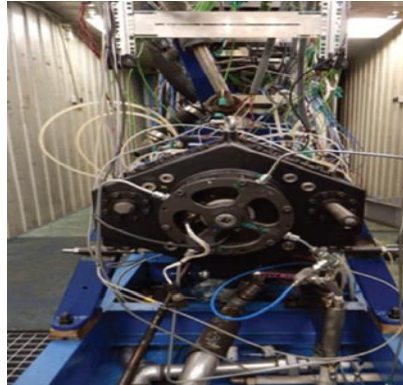
Uma das vantagens deste motor é a redução de custos na sua fabricação, uma vez que a construção de um motor com 3 cilindros opostos é 11% mais barata que a construção de um motor de 6 cilindros em linha convencionais. Reduzindo também assim o seu tamanho.

A principal inovação apresentada por este motor é a existência de duas cambotas, uma na parte superior e outra na parte inferior do bloco, ligando-se a um eixo que vai servir de transmissão, não existindo cabeçotes. Este motor consegue alcançar uma eficiência térmica muito boa, através de janelas controladas por pistões onde as perdas de calor são reduzidas pela pouca área de transferência. O sistema de combustão é instalado no cilindro por meio de um injetor. Outro dos avanços deste motor é a biela ser mais curta, reduzindo assim a velocidade de funcionamento dos pistões, aumentando a durabilidade dos componentes móveis ("Soluções de motores líderes na indústria", 2020).

Os polacos da equipa de investigação *WUT* desenvolveram o motor *PAMAR* com a gestão do *Dr. Pawel Mazuro*. O modelo *PAMAR-3* com 3.0 Litros e 340 kW é um motor de pistões opostos a 2-tempos e teve grande sucesso pois apresenta uma tecnologia simples, com menor necessidade de peças e por isso baixo peso. A sua simetria axial baixou o nível de vibração em altas potências. Este motor foi de tal forma versátil que funcionou com vários tipos de combustíveis. Outras das razões que levaram ao sucesso deste motor foi a eliminação do uniflow e a eliminação de uma cambota, reduzindo assim o impulso lateral do pistão. O seu sistema de simetria axial de arrefecimento consegue manter uma condição térmica constante em todos os cilindros tanto na admissão como no escape, mantendo assim uma eficiência volumétrica constante e equivalente em todos os cilindros. Sendo assim possível alcançar um

trabalho igual em todos os cilindros. A janela de entrada para fornecer ar no cilindro é instalada num dos lados do cilindro e a janela de escape do outro lado, a fim de saírem os gases de escape. O movimento dos pistões controla a abertura e fecho das janelas, através do seu movimento sincronizado. A combustão acontece quando os pistões se encontram no ponto morto superior. Os movimentos rotativos dos pistões são acionados por biela manivela (ALQAHTANI, A. et al., 2017) (MAZURO, 2020).

**Figura 7 - Motor PAMAR de pistões opostos e simetria axial**



Fonte: ALQAHTANI, A. et al. (2017)

### **Avanços Tecnológicos na Academia**

Tal como na Indústria também nas Academias o motor de pistões opostos a 2-tempos não foi esquecido, sendo o seu desenvolvimento muito atual.

Em 2008 Araújo, utilizou uma arquitetura tipo Junkers com uma disposição linear e oposta dos pistões, utilizando dois motores mono cilindro a gasolina a 2-tempos. Para tal foram utilizados dois blocos da marca Peugeot de 50 cm<sup>3</sup>, como se pode observar na Figura 8 (ARAÚJO, 2008).

Num dos blocos foi eliminada a janela de admissão e no outro a janela de escape, de forma a possibilitar a entrada do fluxo da mistura de ar por um dos blocos, para que por sua vez ao dirigir-se para o centro do cilindro empurre os gases de escape para o outro bloco. Foi desenhada uma peça a unir as cabeças dos cilindros, uma vez que se tratava de dois cilindros independentes com cabeça. A peça foi obtida por fundição. A peça fundida, além de se tratar de uma peça para união dos blocos, também tem a função de suporte da vela de ignição, uma vez que se trata de uma versão a gasolina.

Neste trabalho foi também implementado um estudo com desfasamento das cambotas, a fim de se compararem as diferentes taxas de compressão e rendimento do motor. Verificou-se que os melhores resultados foram atingidos quando o desfasamento era de 0°.

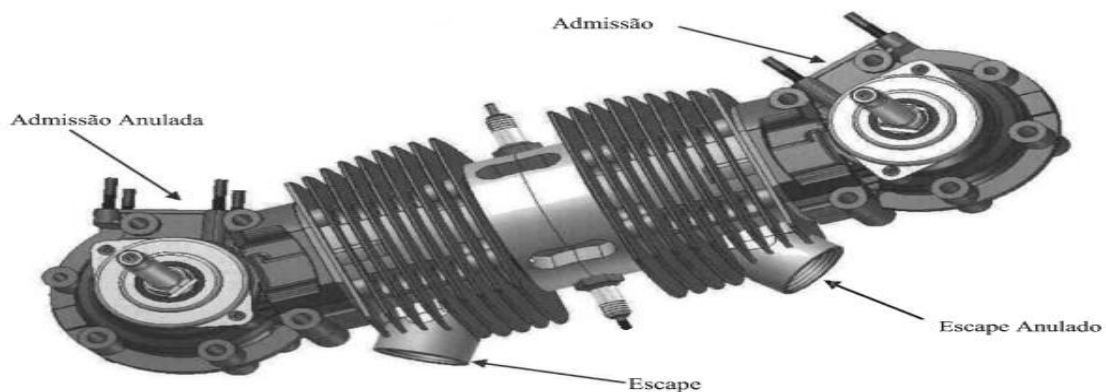
O estudo efetuou também uma comparação entre uma peça de união dos blocos dos motores com 40 mm e outra com 20 mm de espessura,

sendo a de 20 mm a que atingiu a maior taxa de compressão do motor de pistões opostos.

A ideia do autor deste motor foi a sua utilização em pequenos modelos aeronáuticos, por se tratar de um motor compacto, com elevada resistência mecânica e baixo peso. Podendo qualquer um dos veios da cambota acionar uma hélice. Outro dos objetivos do autor foi que a sua manutenção fosse fácil e que as afinações fossem simples e pouco demoradas (ARAÚJO, 2008).

É assim possível a construção de um motor a partir de outro pré-existente, reduzindo os seus encargos de fabricação. Sendo o objetivo obter um motor leve, com potência e com baixas emissões para uso aeronáutico (ALVES, 2011).

**Figura 8 - Motor de pistões opostos a 2-tempos a gasolina**



**Fonte:** ARAÚJO (2008)

Pirault e Flint muito graças ao livro que publicaram em 2009 com o título "Opposed Piston Engines: Evolution, Use, and Future Applications", conseguiram que outros investigadores desenvolvessem novos estudos sobre motores de pistões opostos.

Também da autoria destes dois autores foi a publicação em 2010 de um artigo com o título "Opposed-Piston Engine Renaissance, Power for the Future", onde é desenvolvido o tema dos motores diesel a 2-tempos, sendo caracterizados historicamente e também em relação as potencialidades futuras que se podiam extrair deles, sendo referida a enorme flexibilidade de arquiteturas destes motores, o que ajudou a desenvolver de forma tão alargada a sua utilização. Apresentando a título de exemplo os do Junkers Jumo 205 e 207 na aeronáutica, o Rolls Royce K60 em veículos militares, o Rootes TS3 "folded" crank-train em veículos automóveis, o Napier Deltic em locomotivas e lanchas, o Fairbanks Morse 38D em submarinos e navios e o Doxford em navios e aplicações pesadas estacionárias. São também apresentadas as vantagens, desvantagens e desafios que são colocados a este tipo de motores. Referindo também as vantagens da utilização de novos programas informáticos no desenvolvimento dos motores de pistões opostos, em particular na injeção e na dinâmica de fluidos

computacional. Referem aspetos mecânicos e térmicos dos novos materiais, óleos e sistemas de escape que permitem explorar as melhores características dos motores de pistões opostos. Para concluir, o artigo apresenta uma comparação entre um motor diesel convencional de 4-tempos e um motor diesel de pistões opostos a 2-tempos (REGNER, *al.*, 2011).

Já a equipa de Achatés Power juntamente com David Foster da Universidade de Wisconsin, efetuaram análises termodinâmicas a fim de demonstrarem a eficiência de um motor de pistões opostos de 2-tempos em comparação a um motor de 4-tempos de arquitetura convencional. Tiveram em conta 3 configurações: um motor convencional de 4-tempos e 6 cilindros em linha; um motor de pistões opostos de 4-tempos e 3 cilindros e um motor de pistões opostos a 2-tempos e 3 cilindros. Sendo todos os motores com igual valor de diâmetro de pistão e de curso. Foi feita uma comparação do desempenho de ciclo a fim de saber o seu rendimento térmico. Os resultados obtidos indicaram que o motor de pistões opostos a 2-tempos apresenta um rendimento mais elevado, uma vez que este motor cria uma relação de área/volume na câmara de combustão mais indicada ao seu funcionamento, uma vez que combina a redução da transferência de calor. O aumento da relação de temperatura específica acontece pois, o motor trabalha em regimes mais baixos e a redução do tempo de combustão não aumenta a pressão. Foi assim possível concluir que o motor de pistões opostos a 2-tempos apresentou o melhor rendimento térmico, 53%. Comparados os valores médios dos ciclos dos motores, o motor de pistões opostos a 2-tempos atinge valores de pressão e temperatura mais reduzidos e um consumo específico 10,4% abaixo do motor a 4-tempos de arquitetura convencional (SANTOS *al.*, 2016) (HEROLD *al.*, 2011) ("Soluções de motores líderes na indústria", 2020).

Em 2014, Gonçalves efetuou uma simulação em CFD com o motor de pistões opostos Junkers Jumo 205 alterado para funcionar a 4-tempos com válvulas laterais paralelas ao eixo do cilindro e uma câmara de combustão no meio delas com espaço para abertura completa de válvulas. Com tal alteração teve-se como objetivo avaliar o funcionamento e características do escoamento do interior do cilindro, a fim de estudar a viabilidade de comercialização de um motor a 4-tempos. Foi verificado que em vários parâmetros foram obtidos os padrões esperados pelas características de um motor de pistões opostos. Muito embora um motor com esta configuração a funcionar a 4-tempos onde a cabeça do cilindro é inexistente, representa uma dificuldade adicional de instalação de válvulas de admissão e de escape com o objetivo de auxiliar as trocas gasosas para um funcionamento eficiente. Para tal foi preciso dimensionar o modelo, tendo em conta o motor Junkers Jumo 205 com as duas válvulas e também com a câmara de combustão e respetivas condutas de escape e admissão. Assim sendo foram obtidos resultados que permitiram perceber que devido ao tamanho do cilindro da câmara de combustão e das condutas de passagem dos fluxos de ar e gases, foi influenciado o comportamento do

fluido quer no cilindro, quer nas válvulas e condutas, não sendo adequado para o bom funcionamento do motor. Sendo o motor a 2-tempos a atingir os melhores resultados (GONÇALVES, 2014).

Em 2017, Mattarelli influenciado pelo motor lançado pela empresa Achatés Power, um motor de 2,7 litros e 3 cilindros de ignição por compressão a 2-tempos de pistões opostos a diesel, analisou a influência de um sistema de combustão inovador, desenvolvido pelo próprio através de análises adicionais de CFD-3D. sendo possível através do estudo numérico, demonstrar que este motor com o novo sistema de combustível consegue alcançar uma melhoria de 10% na eficiência do combustível, reduzindo os picos de pressão no cilindro e as elevadas temperaturas na entrada da turbina, em comparação com um motor diesel convencional de 4-tempos turbo alimentado, com 6 cilindros e 4,2 litros. Tal é conseguido graças ao novo sistema de combustão que consegue uma combustão completa e rápida, juntamente com a redução das perdas de calor que foram conseguidas pela redução das áreas de transferência de calor. Sendo a temperatura dos gases de escape mais baixa e existindo em simultâneo uma redução das emissões (MATTARELLI, E. Al.2017).

Alqahtani em 2017, modelou e simulou um motor mono cilindro de pistões opostos a 2-tempos a fim de minimizar o consumo de combustível e a perda de calor com o auxílio do software AVL BOOST. Este programa de modelação de motores, analisa o desempenho do motor, alterando os parâmetros desejados. Foi assim analisado o efeito da compressão variável no desempenho do motor de pistões opostos a 2-tempos, através de modelação. Verificou-se uma tendência geral entre os parâmetros analisados e a taxa de compressão. Foi constatado que a pressão de pico de temperatura e a eficiência volumétrica diminuíram quando foi aumentada a taxa de compressão. Alguns parâmetros como é o caso da eficiência mecânica, foram afetadas quando se ajustou as RPM'S do motor (ALQAHTANI, A. al.,2017) (MAZURO, 2020).

### **Limitações e Desafios dos Motores de Pistões opostos a 2-tempos**

Muito embora as vantagens dos motores de pistões opostos a 2-tempos sejam muitas, também apresentam limitações e desafios. Uma delas esta relacionada com as emissões poluentes, o que levou ao seu abandono no passado. Outra das suas limitações é o consumo de óleo excessivo para efeitos de lubrificação. A complexidade na gestão do fluxo de gases dentro do motor, impõem um dos grandes desafios técnicos deste motor, uma vez que o sincronismo entre o pistão de admissão e o de escape tem de ser mantido a fim de garantir uma lavagem eficaz dos cilindros, evitando perdas de eficiência volumétrica. O desenvolvimento da sobrealimentação e da injeção direta é um dos desafios capazes de melhorar este tipo de motores. Por último, a utilização de novos materiais e uma combustão mais eficiente, associada a durabilidade e eficiência energética são uns dos desafios futuros desta gama de motores.

## Motores Patenteados

De entre os vários motores de pistões opostos a 2-tempos, vão ser referidos aqueles que tiveram mais relevância ao longo dos tempos.

Foi um dos pioneiros a ser utilizado em larga escala, o motor Doxford, teve o seu início a partir 1921, tendo equipado navios de grandes dimensões.

Pouco depois surgiu o motor Fairbanks-Morse 38D, em 1930, tendo sido utilizado para equipar locomotivas e submarinos, é ainda hoje utilizado como backup em alguns submarinos nucleares da marinha dos EUA.

A utilizados na aviação civil no pré-Segunda Guerra Mundial em meados de 1932, e durante a mesma na aviação militar alemã, os motores Junkers Jumo 205 e o Jumo 207 que equiparam a aeronave militar Junkers Ju 86P.

O motor Napier Deltic, em 1943 foi utilizado em locomotivas e lanchas rápidas militares.

O Commer TS3, conhecido como "Knocker", em 1948 foi usado em caminhões e autocarros além de aplicações industriais e náuticas.

Por fim, uma das últimas utilizações em massa foi o Rolls Royce K60 em 1962, utilizado para equipar veículos militares.

## O Futuro

Os motores de pistões opostos a 2-tempos como o Junkers Jumo 205 e 207, representam uma tecnologia eficiente que apesar das suas limitações em termos de emissões e consumo de óleo, continuam a oferecer potencial em aplicações modernas. O renascimento do interesse por este tipo de motores, impulsionado pelos avanços ao nível de materiais e técnicas computacionais, abre novas portas para o seu desenvolvimento futuro. Contudo, ainda existam barreiras consideráveis que devem ser ultrapassadas, como a necessidade de uma maior eficiência energética e a conformidade com as emissões poluentes dos nossos dias.

## REFERÊNCIAS

ALQAHTANI, A. et al. Evaluation of the effect of variable compression ratios performance on opposed piston 2-stroke engine, **Combustion Engines**, 2017.

ALVES, F. S. Rendimento volumétrico de um motor de pistões opostos a quatro tempos, **Universidade da Beira Interior**, p. 62, 2011.

ARAÚJO, L.M.R.S. Estudo Teórico-Prático de um Motor de Êmbolos Opostos. **Universidade Da Beira Interior**, p. 59, 2008.

BRÓJO, F. et al. Computational Analysis of the Scavenging of a two-stroke Opposed Piston Diesel Engine, **Proceedings of the World Congress of Engineering 2010 Vol II**, 2010.

Ecomotors. Disponível em: <<https://www.ecomotors.com.htm>>. Acesso em 2 set. 2024.



EL-SAYED, A.F. Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines. **CRC Press**, p. 1476, Second edition, 2017.

GONÇALVES, R.S. 3D CFD Simulation of a Cold Flow Four-Stroke Opposed Piston Engine. **Universidade da Beira Interior**, p. 102, 2014.

GREGÓRIO, J. M. P. Desenvolvimento de um Motor Alternativo de Combustão Interna de Pistões Opostos. **Universidade Da Beira Interior**, p. 252, 2017.

HEROLD, R.E. et al. Thermodynamic benefits of opposed-piston two-stroke engines, **SAE Technical Papers**, 2011.

LENSKI, B. M. et al. (12) United States Patent. v. 2, n. 12, 2015.

MAITRE, C. L. Maitre, Tracteurs et machines agricoles. **CNEEMA**, p.399, 1976.

MARTINS, J. Motores de Combustão Interna. **Publindústria**, 2006.  
Monolith Engine. Disponível em: <[www.monolithengines.com](http://www.monolithengines.com)>. Acesso em 3 set. 2024.

Motor Gemini 100. Disponível em: [HTTPS://www.aeroexpo.online/pt/prod/gemini-diesel/product-186044-37021.HTML](https://www.aeroexpo.online/pt/prod/gemini-diesel/product-186044-37021.html). Acesso em 14 set. 2024.

Motor Pattakon OPRE. Disponível em:  
<<https://www.pattakon.com/pattakonOPRE.htm>>. Acesso em 1 set. 2024.

MAZURO, P.; MAKAREWICZ, B. The potential of wobble plate opposed piston axial engines for increased efficiency. **Energies**, v. 13, n. 21, 2020.

OPRE: Opposed piston Pulling Rod Engine. Disponível em:  
<<https://www.pattakon.com/pattakonOPRE.htm>>. Acesso em: 13 set. 2024.

PENNINGER, A. et al. Internal Combustion Engines, **Technical University of Budapest**, 2006.

PIRAULT, J. P. et al. Opposed Piston Engines: Evolution, Use, and Future Applications, **SAE International Warrendale**, p.576, 2009.

REGNER, G. et al. The Achates Power Opposed-Piston Two-Stroke Engine: Performance and Emissions Results in a Medium-Duty Application, **SAE Int. J. Engines**, 2011.

SANTOS, A. Análise computacional da lavagem de um motor Diesel, 2 tempos, de pistões opostos, **Universidade da Beira Interior**, p. 50, 2009.

SANTOS, A. A.; SILVA, A. F. Automação Óleo-Hidráulica: Princípios de Funcionamento. **Publindústria**. p. 197, 2016.

SCOTT, P. L. Construction of Junkers Engine, **SAE International**, 1917.

SIADKOWSKA, K. et al. Studying a construction of pistons for the aircraft CI engine. **SAE Combustion Engines**, 2017.

Soluções de motores líderes na indústria. Disponível em:  
<<https://www.achatespower.com.htm>>. Acesso em: 4 set. 2024.

STONE, R. Introduction to Internal Combustion Engines. **MacMillan Press**, p. 294, 1999.  
TAYLOR, C. F. The Internal-Combustion Engine In Theory and Practice, **MIT Press**, p.588, 1985.



## **VARIABLE-PITCH PROPELLERS: ELEVATING ADVANCED AIR MOBILITY**

RODRIGUES, RAFAEL (1); MACHADO, RENATO (2); SILVESTRE, MIGUEL (3)

(1) UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR, E-MAIL: [RAFAEL.C.RODRIGUES@UBI.PT](mailto:RAFAEL.C.RODRIGUES@UBI.PT)

(2) CEIIA, E-MAIL: [RENATO.MACHADO@CEIIA.COM](mailto:RENATO.MACHADO@CEIIA.COM)

(3) UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR, E-MAIL: [MARS@UBI.PT](mailto:MARS@UBI.PT)

### **ABSTRACT**

*This article explores the importance of Variable-Pitch Propellers (VPP) within the context of Advanced Air Mobility (AAM), with a special focus on VTOL Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). AAM introduces unique propulsion challenges due to the conflicting demands of vertical take-off and cruise phases. Traditional fixed-pitch propellers struggle with these diverse requirements, especially in tilt-rotor designs. In contrast, VPPs allow for blade pitch adjustment, optimising performance across different flight modes. This paper not only presents the state-of-the-art VPP technology but also provides a comprehensive overview of the current developments in VTOL UAVs and the broader AAM landscape. By examining the limitations of existing technologies and showcasing the potential of VPPs, the article highlights how these advancements can improve UAV efficiency, manoeuvrability, and energy consumption. With UAV applications expanding in air taxis, last-mile deliveries, and emergency services, VPPs emerge as a vital technology for shaping the future of AAM and next-generation air transport systems.*

**Keywords:** VPP, AAM, UAV, Propeller, Pitch

### **RESUMO**

Este artigo analisa a importância das Hélices de Passo Variável (VPP) no contexto da Mobilidade Aérea Avançada (AAM), com foco em Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) de Descolagem e Aterragem Verticais (VTOL). A AAM apresenta grandes desafios propulsivos devido às exigências dicotómicas das fases de descolagem vertical e fase de cruzeiro. Hélices de passo fixo têm dificuldade em satisfazer todos os requisitos com eficiência, especialmente em configurações de rotor basculante. Pelo contrário, as VPPs permitem o ajuste do passo das pás, otimizando o desempenho independentemente da fase de voo. Este artigo apresenta não só o estado da arte das tecnologias VPP, mas também oferece uma visão abrangente sobre os desenvolvimentos atuais em UAVs VTOL e os conceitos mais amplos de AAM. Ao examinar as limitações das tecnologias existentes e destacar o potencial das VPPs, este artigo mostra como esses avanços podem melhorar a eficiência dos UAVs, tornando-as essenciais para o futuro da AAM.

**Palavras-chave:** VPP, Mobilidade, Drone, Hélice, Passo

## 1 INTRODUCTION

By following the path illustrated in Figure 1, this article will introduce and discuss several technologies, starting with the broad concept of Advanced Air Mobility (AAM). The presentation of concepts will be further narrowed down to more specific topics and culminates in the introduction of Variable-Pitch propeller (VPP).

**Figure 1 - Illustrative overview of key themes to be discussed**



Source: Author's own illustration (2024)

### 1.1 Advanced Air Mobility (AAM)

Every day, road traffic congestion induces the spending of millions of unproductive person hours. In 2023, the average driver in London lost 148 hours stuck in traffic in a 10-kilometre daily round trip, which consists of an increase of 6% compared to 2022 [1]. Several studies and surveys corroborate the growing annual trend worldwide [2–4]. This problem influences several aspects of daily routine, from direct consequences such as less time with family and more money spent on fuel per commute to more indirect consequences, namely health issues. People who commute more than 16 km were associated with a higher risk of high blood pressure [5], and a direct relationship between longer commuting time and anxiety or social isolation has also been observed [6].

Around 200 years ago, the housing market faced challenges accommodating a growing population in cities without expanding in area. The solution was to add a new dimension, the z-coordinate, with the creation of skyscrapers. Adding a z-coordinate to the traffic congestion problem could be a solution again. Advanced Air Mobility introduces this concept and, alongside sustainability [7] and economic goals [4], aims to reduce traffic congestion by providing an air transportation system for passengers and cargo.

AAM has two subdivisions: Rural Air Mobility (RAM) and Urban Air Mobility (UAM). UAM focuses on operations within or traversing metropolitan areas, whereas RAM relates to applications in rural markets, where it might not be possible to use conventional distribution methods [8, 9]. They both share some similarities, namely the recognition that electrified propulsion and system autonomy will drastically reduce the costs of their operations, and both acknowledge that community acceptance is the ultimate key to their success. They diverge, however, when it comes to infrastructure requirements and markets they serve [1]. UAM operations usually require VTOL aircraft and vertiports scattered around cities, while RAM leverages existing, and often underutilised, aerodromes.

### 1.1.1 Urban Air Mobility (UAM)

The idea of UAM has been around for decades, not only in sci-fi movies but in pioneering visions of innovators who tried and succeeded to materialise the concept of flying cars [10–12], but it is now reaching realistic implementation levels, encouraging the development of new markets.

#### 1.1.1.1 Use Cases

The most challenging and market-rewarding UAM applications can be summarised in three prominent use cases: Last-mile delivery, Air metro, and Air taxi.

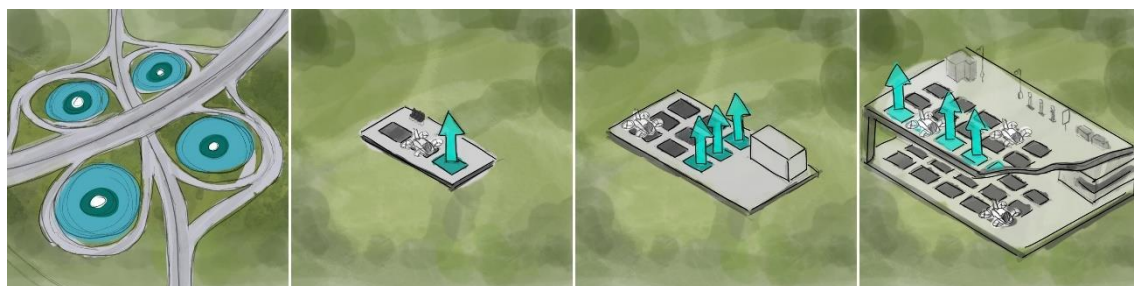
Last-mile delivery is the final part of a parcel's journey to its destination, and it's often the most expensive due to its on-demand and unpredictable nature [13]. This step is vulnerable to traffic congestion, but UAM applications have improved efficiency. The Air metro is a public transit option, similar to subways or buses, with fixed routes and regular schedules. Due to the emergence of Commercial Off-The-Shelf (COTS) VTOL UAV options, the Air Metro may have a viable market in 2028 [14]. Air taxi refers to unscheduled, on-demand ride-sharing between city rooftops using VTOL flights, accommodating up to five people with one passenger per trip [14]. Emergency services are also a note-worthy application UAM provides, allowing for a 73% faster delivery of organs between hospitals [7], and Research and Development (R&D) collaborations in Portugal are currently working towards a solution in this regard [15].

In Europe alone, the maturation of these use cases will allow around 90.000 jobs to be created by 2030 when it is estimated that UAM market size will be valued at more than 4 billion Euro [7].

#### 1.1.1.2 Infrastructure

In the United States (U.S.), there are 5664 helipads, most of which are mostly unused, inactive or for emergency use only [29]. As many of these are placed in highly populated areas, possibilities on retrofitting them into vertiports for UAM applications have been considered [35]. The archetypes for UAM infrastructure with the highest potential can be summarised in four categories.

**Figure 2 - Representations of potential archetypes for UAM infrastructure**



(a) Vertistops

(b) Vertipads

(c) Vertibases

(d) Vertihubs

Source: Author's own illustration (2024)

Vertistops, or single VTOL pads, can be implemented in various locations, utilising existing cloverleaf highway connections and helipads. Vertipads have greater complexity with up to two parking, charging, or maintenance spots. Vertibases are medium-sized structures with around three take-off and landing spaces and six spots dedicated to vehicle charging and maintenance. These would either be newly built or created by retrofitting existing corporate headquarters rooftops or even parking garages [17, 18]. Vertihubs are imagined as stand-alone buildings constructed in high-traffic, central areas.

### 1.1.1.3 Challenges

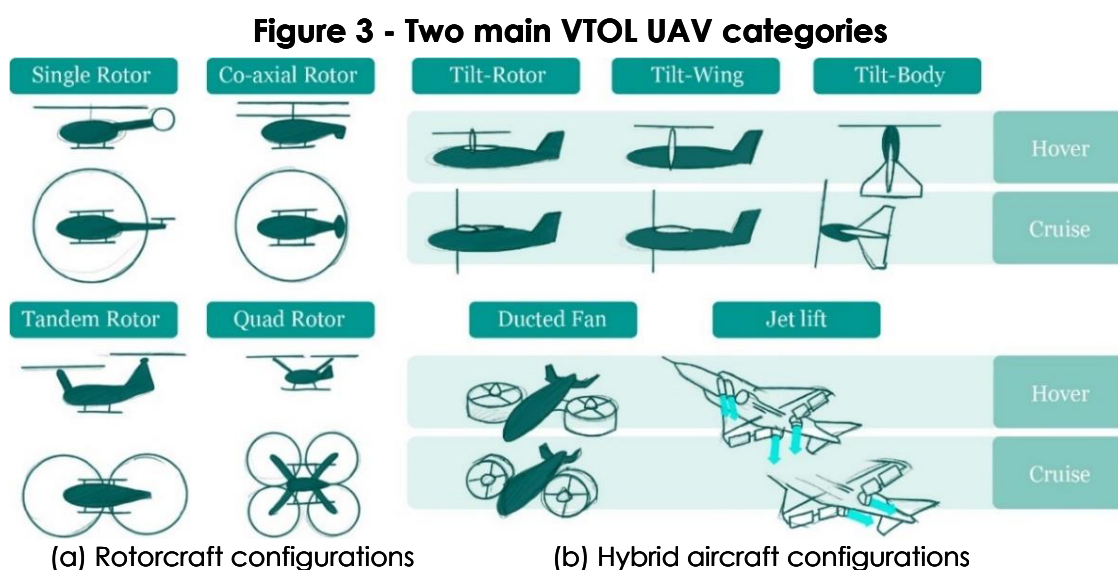
Even though economic models for UAM markets are becoming well-defined, and the infrastructure and vehicles needed are technologically maturing, some obstacles remain to overcome. For example, today's air traffic management system cannot accommodate UAM operations that will scale over time [19]. Acknowledging it is a growing trend, both the Federal Aviation Administration (FAA) and the European Union Aviation Safety Agency (EASA) are working to facilitate its operations [20, 21]. Societal acceptance of UAM is also a concern. EU citizens initially express a positive attitude towards UAM but are concerned about risks related to safety, noise, security, and sustainability, an EASA survey concludes [7].

## 1.2 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Although the rising popularity of UAVs may induce the sense that this technology is new, it is argued that what might be considered drones were first used in 1849 [22-25]. Since then, almost exclusively with military interests as the driving force, the industry has seen remarkable progress [26-39].

### 1.2.1 Vertical Take-Off and Landing (VTOL)

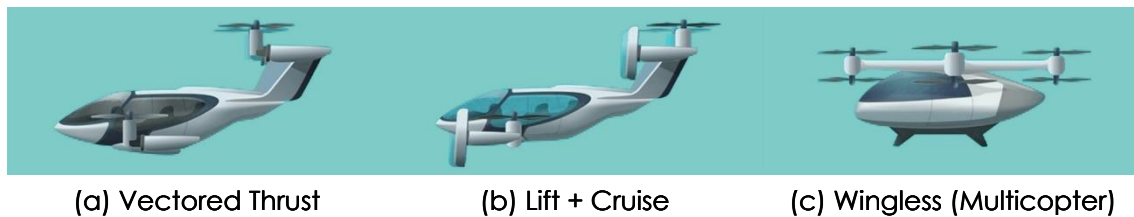
UAM thoroughly relies on the maturation of VTOL and eVTOL UAVs, whose main configurations can be separated into two families [40]: Rotorcraft, Figure 5a, and Hybrid aircraft, Figure 5b.



Source: Author's own illustration (2024)

Rotorcraft configurations have their design mainly optimised to maximise their hovering and manoeuvrability capabilities [23][41]. Their cruise speed, however, is limited by the stalling of the retreating blades [40]. Hybrid aircraft configurations, also called Convertible, emerged as an attempt to combine the capability of both VTOL and Horizontal Take-Off and Landing (HTOL), providing optimised and high cruise speed while maintaining the ability to take-off and land vertically for use cases in which the need for a long runway is not an option. With UAM applications in mind, EASA [7] has further categorised some layouts into three archetypes.

**Figure 4 - Three UAM vehicle types**



**Source:** EASA (2021) [7]

In Vectored Thrust layouts, a single propulsion unit provides lift during hover and thrust during cruise. The wing generates lift, enabling high efficiency and high-speed cruise. This layout type has garnered significant interest and R&D investment by Original Equipment Manufacturers (OEMs) [7, 42]. Successful full-scale prototypes such as Joby's Tilt-Rotor [43] and Airbus A3's Tilt-Wing [44] have demonstrated the viability of this configuration through numerous flight tests.

The Lift + Cruise configurations have separate propulsion units for cruise and hover phases. These layouts create unnecessary drag and are sub-optimally designed for both phases. Despite this, they are potentially easier to certify than Vectored Thrust designs [7], as the two propulsion systems are separated and often individually similar to existing units. OEMs have built several prototypes with this configuration [45–47]. In Wingless or Multicopter configurations, the propulsion system is fixed and creates lift all the time, so the cruise is the slowest and the least efficient of all three types. After obtaining Design and Production Organisation Approvals, Volocopter is currently “working towards achieving Type Certification (TC)” of an 18 prop-rotor Multicopter aircraft [48].

### 1.3 Propeller

A propeller, present in the lion's share of UAVs, is a device that transforms mechanical energy coming from the engine into thrust,  $T$ , which is used to propel the vehicle in whatever direction its configuration allows. As the generation of thrust using propellers consumes far less fuel than any other current propulsive option, they are the most efficient way of generating thrust currently available [50]. Proof of that is the fact that it is by far the most common means of propulsion in CS-23 [51] and practically the only means in CS-VLA [52].

**Figure 5 - Examples of propellers with different number of blades**



(a) One-blade propeller by Everel [49]

(b) Two-blade propeller in a Cessna Skyhawk [53]

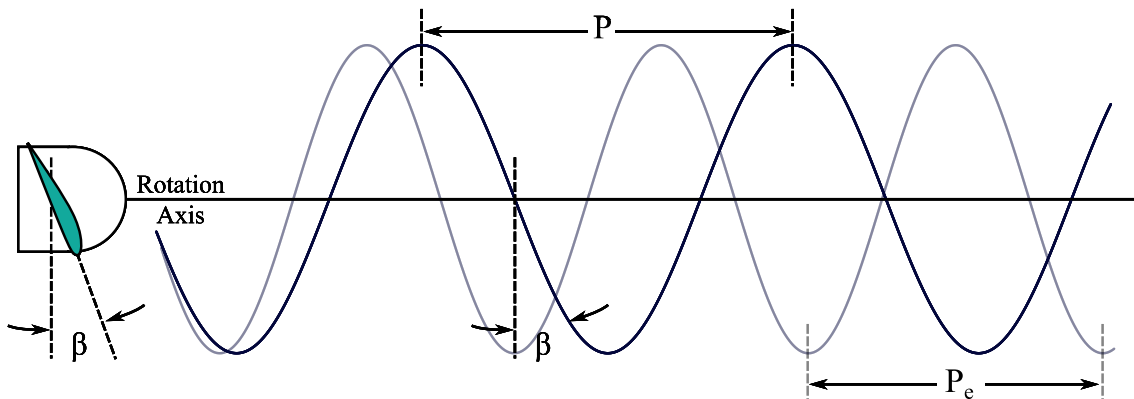
(c) Six-blade propeller used in Lockheed C-130 Hercules [54]

Sources: [49] [53] [54]

### 1.3.1 Propeller Pitch

As a propeller rotates, a forward motion can be inferred, similar to what happens with a screw in wood. The fundamental principle of geometric pitch or pitch distance,  $P$ , consists of that forward distance. However, as a propeller moves through the air, a low-viscosity fluid, it covers less distance per revolution than the geometric pitch designates. The angle between the blade's chord line and the propeller's plane of rotation is called the geometric pitch angle and is denoted by  $\beta$ .

**Figure 6 - Schematic illustrating geometric and effect propeller pitch**



Source: Author's own illustration (2024)

Propellers are designed with a specific mission requirement range in mind. The blade pitch angle is fixed in a Fixed-Pitch propeller (FPP), simplifying the aircraft design, mass, and cost [50]. FPPs are designed to optimise one specific flight condition: an FPP optimised for the climb has its highest efficiency at a relatively low airspeed and has a low (or fine) pitch.

On the other hand, an FPP whose design is optimised for the airplane's cruise condition presents its highest efficiency at a higher airspeed, which is mainly advantageous when higher cruising speed and higher range are of greater importance. These propellers have a high (or coarse) pitch.

## 2 STATE-OF-THE-ART

This section aims to give an overview of the current Variable-Pitch propeller technologies and mechanisms both implemented by OEMs in

state-of-the-art aircraft and being developed and tested by the scientific community as an attempt to mitigate the drawbacks of Fixed-Pitch propellers, they will also be presented. It also describes the current propeller pitching moment calculation method, which is of fundamental importance when designing such devices.

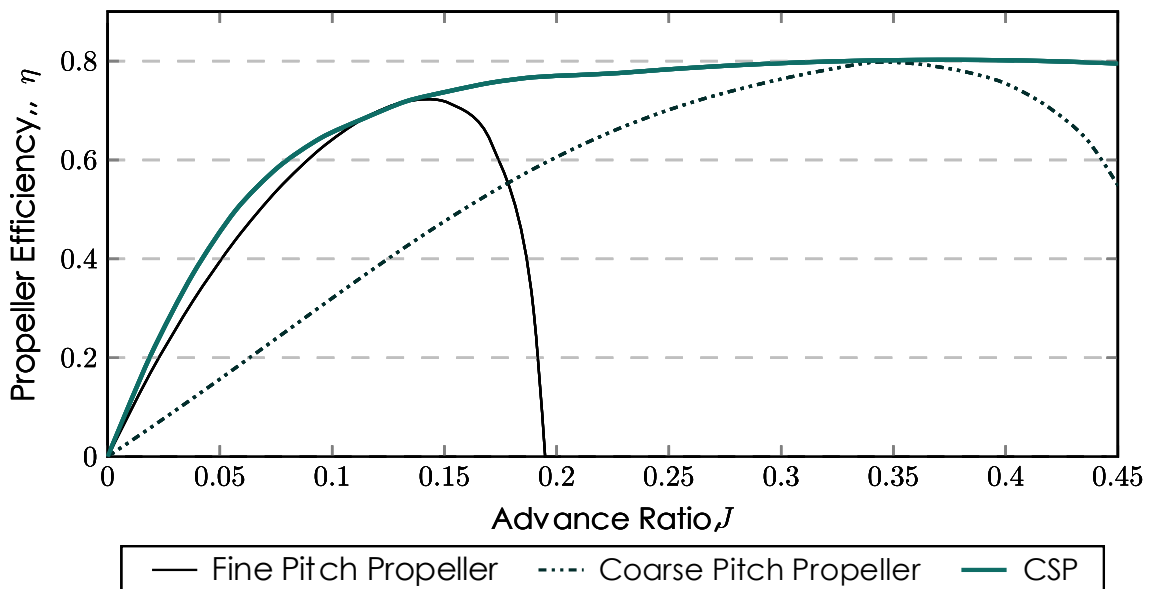
## 2.1 Variable-Pitch propeller (VPP)

### 2.1.1 Aircraft propellers

As seen, FPP are designed to optimise a particular flight condition, so they can only operate at the highest possible efficiency in that specific circumstance. If a pilot flying a FPP aircraft begins to climb from a cruising altitude, they will observe that the engine's RPM decreases. On the other hand, if the aircraft starts to descend, the engine's RPM increases. In the first case, as the airplane ascends, its speed decreases, causing the propeller blades to encounter a higher Angle of Attack (AoA). This, in turn, leads to increased drag, resulting in greater torque and a reduction in engine RPM. In the latter situation, the opposite occurs. As the aircraft speeds up, the blades experience a lower AoA and generate less drag, thus requiring less torque. The engine experiences this as reduced load, so its RPM increases, again changing the efficiency [50].

As cruise and climb phases present so clearly opposite propeller design requirements, a solution that tends to keep the RPM at a constant value, maximising the efficiency in different flight conditions was presented a few decades ago, with the introduction of the Constant-Speed propeller (CSP), Figure 9.

**Figure 7 - Example of Propeller efficiency between FPPs and CSP**



**Source:** Author's own graph (2024)

Dissimilar to FPPs, which are constructed and optimised with a specific design point in mind, CSP can adapt to various flight conditions within the operational envelope [56]. Often pointed to as the debut of the automatic VPP, Boeing 247 flew for the first time in 1933. Implementing



such a mechanism allowed for several gains in performance, including a reduction of 20% in take-off distance, an increase of 22% in climb rate, the cruise speed improved by 5%, and the ceiling altitude was raised by 1220 meters [56, 57].

### 2.1.2 Helicopter rotors

Mechanisms able to alter the blade's pitch both automatically and on the pilot's demand are crucial to the normal functioning of helicopters and essential for their stable flight and manoeuvrability. These systems are generally present in both the main and the tail rotors. Still, the latter can be omitted in some helicopter configurations, such as Co-axial, Figure 5, and No-Tail-Rotor (NOTAR) [59].

A critical part of helicopter flight control is the swashplate, which enables precise adjustment of the rotor blade pitch for manoeuvring by translating pilot inputs from the cyclic and collective controls into corresponding blade pitch changes through push-rods and connections [60].

### 2.1.3 UAV propellers

Although the implementation of VPP mechanisms in UAVs increases the overall UAV complexity and consequent failure probability, their development has become more popular as the need to enhance UAV flight performance becomes increasingly important, and Hybrid UAV configurations gain relevance.

Hydraulic mechanisms are the most common means of actuation used in subsystems of aircraft propellers, as well as helicopter rotors. However, its implementation in small-sized UAVs is not viable due to the mass and size associated with pumps, control valves and other necessary components.

The state-of-the-art active VPP technologies in UAVs use digital servo motors as the main driving force. Passive Variable-Pitch propeller (PVPP) attempts, which do not need any actuator, have also been developed by the scientific community and are also presented.

#### 2.1.3.1 Variable-Pitch propeller (VPP)

Maciej Podśędkowski et al. [61] implemented a VPP mechanism and concluded bench test results of a modified, commercially available propeller, Figure 12.

**Figure 8 - Variable pitch propeller (16x6) with the engine**



Source: Podśędkowski, M. (2023)

Its results indicate a 31% increase in maximal thrust measured, compared to the original blade, and the coefficient of thrust during hover measured was increased by 2.6%, up to 7.5% for various pitch angles.

Similarly, but focusing on attitude following optimisation and the energy efficiency of a VPP system, Ching-Wei Chang et al. [62] built a four-motor VPP quadrotor to verify their optimisation methodology, Figure 13.

**Figure 9 – VPP system implemented in a quadcopter**



(a) Quadrotor flight test platform

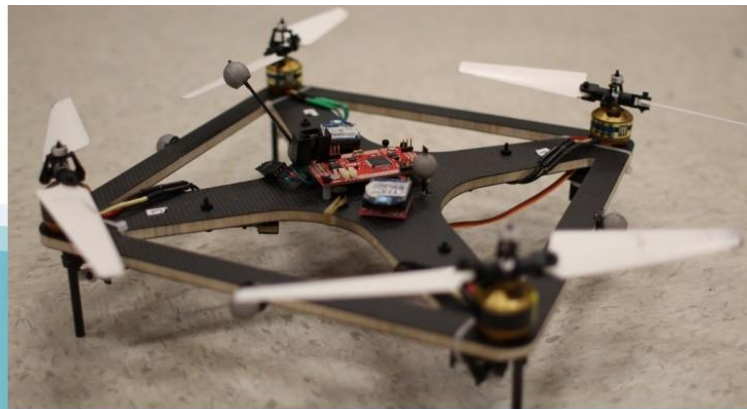
(b) CAD model

**Source:** Chang, C. (2020)

Their results prove a reduction in energy consumption when applying such a VPP system.

Also using a quadrotor as a test platform, Mark Johnson Cutler [63] implemented an autonomous VPP system.

**Figure 1 - Variable-Pitch quadrotor**

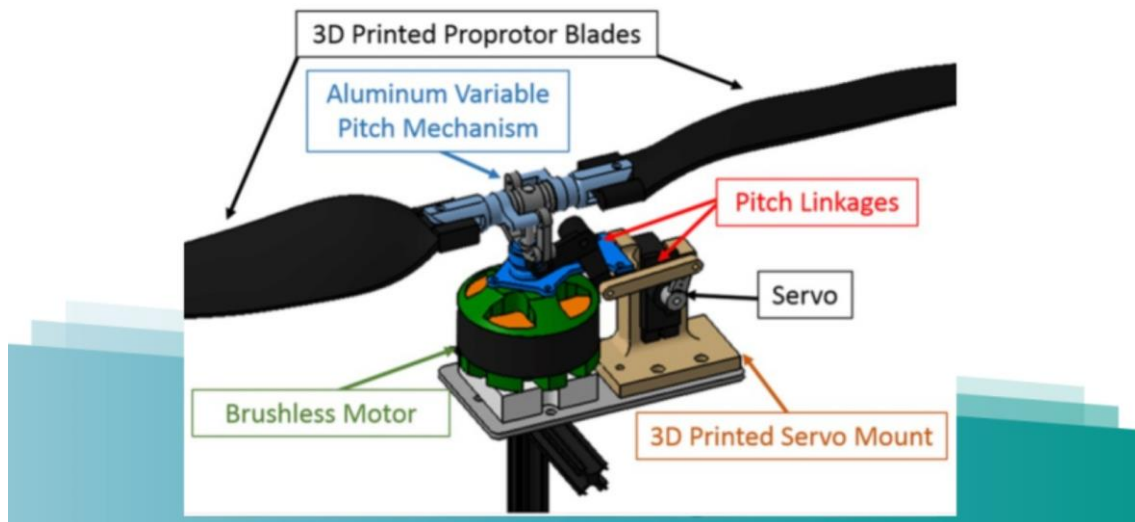


**Source:** Cutler, M. (2012)

With the focus on increasing the potential for aerobatics and allowing for inverted flight, this thesis presents a detailed analysis of the benefits of VPP over FPP for a quadrotor helicopter, designs and implements an algorithm for utilising the increased actuator capabilities of the system, and finally validates the actuator analysis by flight testing. A VPP quadrotor designed by the same author in a different work at the MIT's Aerospace Controls Lab was used as a starting point [64], but a second version was developed. Such quadcopter was designed to be “capable of aggressive aerobatic manoeuvres which stretch beyond the current abilities of typical fixed-pitch quadrotors”.

Following a similar approach, Phillips, B. et al. [65] developed and tested an aluminium variable pitch mechanism by mounting a 3D printed servo mount to the brushless motor support.

**Figure 10 - Variable-Pitch mechanism**

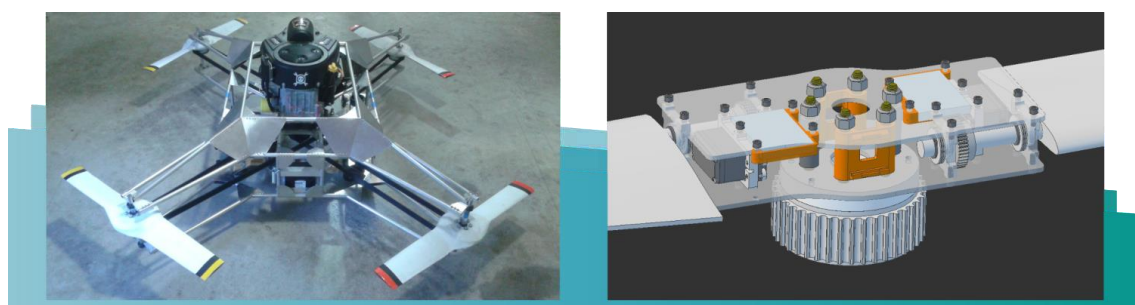


**Source:** Heinzen, S. (2015)

The work revolved around a tail-sitter (Tilt-Body) configuration that uses differential thrust vectors to pitch forward into a forward flight configuration to minimise trade-offs in performance between hover and fixed-wing modes. Figure 12 illustrates the developed variable pitch mechanism.

Finally, Peter McCloud, as the entry for an online competition, developed an Electric Variable Pitch Rotor (EVPR) device [66], an electrically actuated Variable-Pitch rotor, and implemented it on his lawnmower-engined quadcopter [67], in which a central lawnmower motor utilises a belt to power all the propellers.

**Figure 11 - VPP system implemented in a quadcopter**



(a) Quadrotor flight test platform

(b) CAD model

**Source:** McCloud, P. (2017)

Contrasting with the previous state-of-the-art solutions presented, the actuators in this mechanism are contained within the propeller's hub. An ingenious solution was found to power the electronics. By mounting

magnets to the frame, the system can “pull power from coils in the rotor hub and rectify it to DC to drive the servos and electronics” [67].

### 2.1.3.2 Passive Variable-Pitch propeller (PVPP)

Stearns B. Heinzen et al. [68] proposes an approach of a PVPP mechanism that uses purely aerodynamic moments: one generated by the pitching moment about the blade aerodynamic centre and the other by the lift acting at the aerodynamic centre generating a moment about the blade-pivot axis. After the development, a flight demonstration was performed, and successful results were obtained.

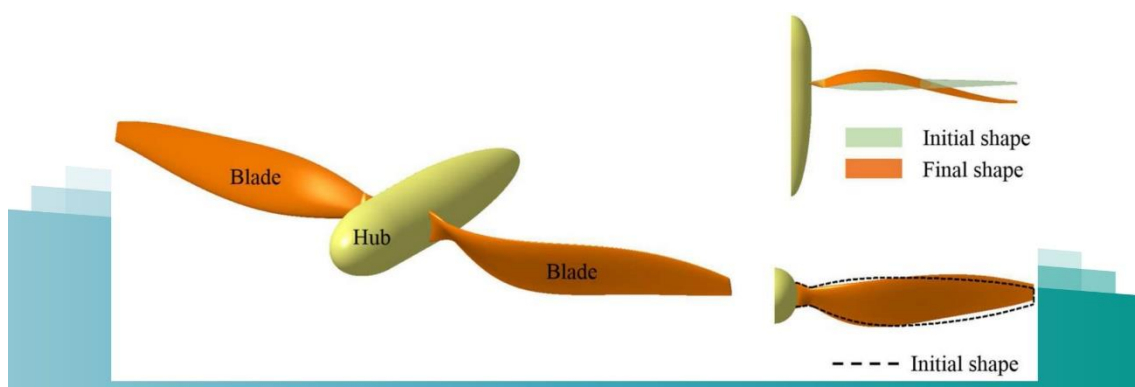
**Figure 12 - Mass balancing and synchronisation gear on a PVPP**



**Source:** Heinzen, S. (2015)

Some authors have, however, expressed concern regarding this approach's complex balance module and used it as a justification for the non-wide application of this type of PVPP [69]. Also, within the topic of PVPP, Keran Cong et al. [11] constructed a new framework to design such PVPP, aiming to simplify its balance module and increase its utility. They proposed new methods to parameterise the shape of the propeller and established mathematical models for each optimisation in the design process (initial design, shape design, and blade-pivot axis position).

**Figure 13 - Passive Variable-Pitch propeller**



**Source:** Cong, K. (2023)

Similarly to the results obtained by Stearns B. Heinzen et al., Keran Cong et al. concluded that PVPP, which uses “pure aerodynamic moment to change the pitch, has practical significance in reducing the energy consumption of the flight envelope and increasing the payload”.

### **3 CONCLUSION**

Unlike FPP, which are limited in their ability to optimise performance across varying flight phases, VPPs offer the flexibility needed to adjust blade pitch to meet the contrasting requirements of both vertical take-off and cruise. This adaptability significantly improves flight efficiency and operational flexibility in UAVs.

The use of VPP mechanisms is not new. Aircraft have long utilised it, and helicopters depend on it for stable and precise manoeuvrability. Now, this important technology is becoming accessible to UAVs as the scientific community increasingly recognises its significance in advancing the performance of unmanned systems. Integrating VPPs in UAVs brings several complexity challenges, but enables better optimisation across various flight conditions, allowing them to undertake more complex missions more efficiently.

Therefore, by introducing the main vehicle archetypes on which UAM is expected to develop its applications, this article emphasises the increasing acknowledgement of VPPs as a crucial solution in AAM. The capability to boost thrust while minimising fuel consumption positions VPPs as a significant facilitator of sustainable and adaptable UAV operations, which is vital for the success of the AAM market.

In conclusion, adopting VPP technology in UAVs represents a significant advancement in addressing the propulsion challenges in AAM. As VPPs become more widely used, they will play a crucial role in unlocking the full potential of UAVs, enabling air mobility to become more efficient, adaptable, and scalable in order to meet the evolving demands of what is to come.

- [1] TomTom, “**Annual TomTom Traffic Index Major Traffic Trends Shaping Cities Globally in 2023**,” 2023.
- [2] S. Doreswami, “**Delivery Drone Market Analysis Opportunities 2023 - 2030**,” 2023.
- [3] “**Urban mobility trends - August 2023 | Transurban Group**.” [Online]. Available: <https://www.transurban.com/news/urban-mobility-trends-august-2023>
- [4] Uber, “**Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation** [White Paper],” 2016.
- [5] C. M. Hoehner, C. E. Barlow, P. Allen, and M. Schootman, “**Commuting distance, cardiorespiratory fitness, and metabolic risk**,” *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 42, pp. 571–578, 6 2012.
- [6] A. V. Chobanian, “**The Seventh Report of the Joint National Committee on Prevention, Detection, Evaluation, and Treatment of High Blood Pressure: The JNC 7 Report**,” *JAMA*, vol. 289, pp. 2560–2571, 5 2003. [Online]. Available: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/196589>
- [7] EASA, “**Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe**,” 2021.
- [8] A. P. Cohen, S. A. Shaheen, and E. M. Farrar, “**Urban Air Mobility: History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges**,” vol. 22, pp. 6074–6087, 9 2021.
- [9] NASA, “**Advanced Air Mobility: What is AAM?**” [Online]. Available: [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/05/what-is-aam-student-guide\\_0.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/05/what-is-aam-student-guide_0.pdf)
- [10] “**Glenn Curtiss - A First Flying Car | Flying-Cars**.” [Online]. Available: <https://www.flyingcarsandfoodpills.com/glenn-curtiss—a-first-flying-car>
- [11] “**Waterman Aerobile | National Air and Space Museum**.” [Online]. Available: [https://airandspace.si.edu/collection-objects/waterman-aerobile/nasm\\_A19610156000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/waterman-aerobile/nasm_A19610156000)
- [12] “**Taylor Aerocar III | The Museum of Flight**.” [Online]. Available: <https://www.museumofflight.org/exhibits-and-events/aircraft/taylor-aerocar-iii>
- [13] “**What is Last Mile Delivery? Everything You Need to Know**.” [Online]. Available: <https://onfleet.com/blog/what-is-last-mile-delivery/>
- [14] NASA, C. Consulting, and McKinsey&Company, “**URBAN AIR MOBILITY (UAM) MARKET STUDY**,” 11 2018. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002046/downloads/20190002046.pdf>
- [15] CEiA, “**eVTOL UAV for Medical Emergency and Urban Logistics**.” [Online]. Available: <https://www.ceia.com>
- [16] EASA, “**SPECIAL CONDITION Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft Special Condition for small-category VTOL aircraft Statement of Issue**,” 2019.
- [17] T. Johnston, R. Riedel, and S. Sahdev, “**To take off, flying vehicles first need places to land**.”
- [18] K. R. Antcliff, M. D. Moore, and K. H. Goodrich, “**Silicon Valley as an Early Adopter for On-Demand Civil VTOL Operations**.”
- [19] H. Lee, “**ATM-X Urban Air Mobility (UAM) Subproject**,” in *HorizonUAM Symposium*. NASA, 9 2021, intro.
- [20] FAA, “**Concept of Operations v2.0 Urban Air Mobility (UAM)**.”
- [21] EASA, “**Specific Category - Civil Drones**.”
- [22] U. C. A. Authority, “**Safety and Airspace Regulation Group Unmanned Aircraft System Operations in UK Airspace-Policy and Guidance CAP 722 | Ninth Edition Amendment 1**.”
- [23] S. G. Gupta, M. M. Ghonge, and P. M. Jawandhiya, “**Review of Unmanned Aircraft System (UAS)**,” *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, vol. 2, pp. 2278–1323, 2013.

- [24] F. A. Administration, "**What is an unmanned aircraft system (UAS)?**" [Online]. Available: <https://www.faa.gov/faq/what-unmanned-aircraft-system-uas>
- [25] B. Custers, **The Future of Drone Use: Opportunities and Threats from Ethical and Legal Perspectives**. T.M.C. Asser Press, 01 2016, vol. 27.
- [26] M. University, "**Remote Piloted Aerial Vehicles.**" [Online]. Available: [https://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav\\_home.html](https://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html)
- [27] N. M. of the US Air Force, "**Kettering Aerial Torpedo "Bug".**" [Online]. Available: <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/198095/kettering-aerial-torpedo-bug/>
- [28] O. U. S. A. F. Website, "**Photos.**" [Online]. Available: <https://www.af.mil/News/Photos/>
- [29] M. de Git and A. Francis, "**Boeing - News Releases.**" [Online]. Available: [https://boeing.mediaroom.com/news-releases-statements?item=130788#assets\\_all](https://boeing.mediaroom.com/news-releases-statements?item=130788#assets_all)
- [30] DJI, "**Agras T30 - A New Digital Flagship for Agriculture.**" [Online]. Available: <https://www.dji.com/pt/t30>
- [31] A. A. S. Inc., "**eBee X mapping drone - Drones.**" [Online]. Available: <https://ageagle.com/drones/ebex/>
- [32] DJI, "**DJI Mavic 3 Pro - Inspiration in Focus.**" [Online]. Available: <https://www.dji.com/pt/mavic-3-pro>
- [33] Wingcopter, "**Wingcopter 198.**" [Online]. Available: <https://wingcopter.com/wingcopter-198>
- [34] A. C. Watts, V. G. Ambrosia, and E. A. Hinkley, "**Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use,**" *Remote sensing*, vol. 4, no. 6, pp. 1671–1692, 2012.
- [35] L. Brooke-Holland, "**Unmanned Aerial Vehicles (drones): an introduction,**" House of Commons Library: London, UK, 2012.
- [36] M. Arjomandi, S. Agostino, M. Mammone, M. Nelson, and T. Zhou, "**Classification of unmanned aerial vehicles,**" Report for Mechanical Engineering class, University of Adelaide, Adelaide, Australia, pp. 1–48, 2006.
- [37] A. Cavoukian, **Privacy and drones: Unmanned aerial vehicles**. Information and Privacy Commissioner of Ontario, Canada Ontario, 2012.
- [38] M. Hassanalian and A. Abdelkefi, "**Classifications, applications, and design challenges of drones: A review,**" pp. 99–131, 5 2017.
- [39] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. Pister, "**Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust",**" in Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, 1999, pp. 271–278.
- [40] R. Austin, "**Unmanned Aircraft Systems UAVs Design, Development and Deployment,**" 2010.
- [41] K. Nonami, F. Kendoul, S. Suzuki, W. Wang, and D. Nakazawa, **Autonomous flying robots: unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles**. Springer Science & Business Media, 2010.
- [42] D. P. Thippavong, "**Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations,**" 2018.
- [43] Joby, "**Joby Aviation.**" [Online]. Available: <https://www.jobyaviation.com/>
- [44] Airbus and A3, "**Aerospace Innovation Project - Vahana.**" [Online]. Available: <https://acubed.airbus.com/projects/vahana/>
- [45] EVE, "**Eve Air Mobility.**" [Online]. Available: <https://eveairmobility.com/>
- [46] Wisk, "**Autonomous Urban Air Mobility.**" [Online]. Available: <https://wisk.aero/>

- [47] BETA, "**Aircraft.**" [Online]. Available: <https://www.beta.team/aircraft/>
- [48] Volocopter, "**Solutions - VoloCity.**" [Online]. Available: <https://www.volocopter.com/en/solutions/volocity>
- [49] N. Air and S. Museum, "**Propeller, variable-pitch, one-blade, Sensenich and Everel.**" [Online]. Available: [https://airandspace.si.edu/collection-objects/propeller-variable-pitch-one-blade-sensenich-and-everel/nasm\\_A19370029000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/propeller-variable-pitch-one-blade-sensenich-and-everel/nasm_A19370029000)
- [50] S. Gudmundsson, **The Anatomy of the Propeller.** Butterworth-Heinemann, 1 2014.
- [51] EASA, "**CS-23 Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Aeroplanes.**"
- [52] EASA, "**CS-VLA Very Light Aeroplanes.**"
- [53] Cessna, "**Cessna Skyhawk.**" [Online]. Available: <https://cessna.txtav.com/en/piston/cessna-skyhawk>
- [54] Collins Aerospace, "**NP2000 Propeller System.**" [Online]. Available: <https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/industries/military-and-defense/exterior/np2000-propeller-system>
- [55] J. B. Brandt and M. S. Selig, "**Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers,**" 2011.
- [56] H. Jiang, Y. Zhou, and H. W. Ho, "**A review of variable-pitch propellers and their control strategies in aerospace systems,**" 9 2023. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2309.16075>
- [57] F. Van der Linden and V. Seely, **The Boeing 247: The First Modern Airliner.** University of Washington Press, 2011.
- [58] Boldmethod, "**How A Constant Speed Propeller Works.**" [Online]. Available: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/how-a-constant-speed-prop-works/>
- [59] I. Circiu and M. Boscoianu, "**An analysis of the efficiency of Coanda - NOTAR antitorque systems for small helicopters,**" INCAS BULLETIN, vol. 2, pp. 81–88, 12 2010.
- [60] F. A. Administration, **Helicopter Flying Handbook: FAA-H-8083-21B.** Skyhorse, 2021.
- [61] M. Podśędkowski, M. Lipian, and D. Obidowski, "**Variable pitch propeller – blade pitch moment computational analysis,**" in 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2023, pp. 118–122.
- [62] C. W. Chang, S. Chen, C. Y. Wen, and B. Li, "**An actuator allocation method for a variable-pitch propeller system of quadrotor-based uavs,**" Sensors (Switzerland), vol. 20, pp. 1–17, 10 2020.
- [63] M. J. Cutler, "**Design and Control of an Autonomous Variable-Pitch Quadrotor Helicopter,**" 2010.
- [64] M. J. Cutler, "**Variable-Pitch Quadrotor - Aerospace Controls Laboratory.**" [Online]. Available: <https://acl.mit.edu/projects/variable-pitch-quadrotor>
- [65] B. Phillips and A. V. Hrishikeshavan, "**Enhancing the Performance of a Quadrotor Biplane Tail-sitter (QBIT).**"
- [66] P. McCloud, "**EVPR: Electric Variable Pitch Rotor | Hackaday.io.**" [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/20473-evpr-electric-variable-pitch-rotor>
- [67] P. McCloud, "**Goliath - A Gas Powered Quadcopter | Hackaday.io.**" [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/1230-goliath-a-gas-powered-quadcopter>
- [68] S. B. Heinzen, C. E. Hall, and A. Gopalarathnam, "**Development and testing of a passive variable-pitch propeller,**" vol. 52. AIAA Inc., 2015, pp. 748–763.
- [69] K. Cong, D. Ma, L. Zhang, X. Xia, and Y. Yao, "**Design and analysis of passive variable-pitch propeller for VTOL UAVs,**" Aerospace Science and Technology, vol. 132, 1 2023.





**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# CIVIL ENGINEERING

# INFRAESTRUTURA HÚMIDA SUSTENTÁVEL RETARDANTE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS

REIS, RICARDO (1); LUCAS, SUSANA (2); GOMES, CASTRO (3)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [costa.reis@ubi.pt](mailto:costa.reis@ubi.pt)

(2) Instituto Politécnico de Setúbal, E-mail: [susana.lucas@estbarreiro.ips.pt](mailto:susana.lucas@estbarreiro.ips.pt)

(3) Universidade da Beira Interior, E-mail: [jpcg@ubi.pt](mailto:jpcg@ubi.pt)

## RESUMO

Este artigo, dirige-se prioritariamente a entidades com responsabilidades no domínio do urbanismo e da proteção civil, proporcionado uma visão panorâmica atualizada da possibilidade melhorar as estratégias de prevenção e supressão aos incêndios florestais na interface urbano florestal. O projeto da Infraestrutura húmida sustentável retardante de incêndios florestais apresenta-se como uma solução de ocupação do solo, destinada a aumentar a resiliência dos ecossistemas florestais, especialmente na Serra da Estrela, contra incêndios florestais. A integração na interface urbano florestal é uma solução inovadora que permite criar uma separação física entre a vegetação e o edificado, na interface alargada, com diminuição da carga de combustível e da sua inflamabilidade, preservando a humidade dos combustíveis finos e, protegendo o edificado existente contra a severidade dos incêndios florestais. O desenvolvimento de uma infraestrutura com capacidade para minimizar as perdas de humidade do solo por evapotranspiração, permite uma contribuição efetiva para a preservação dos valores dos sub índices de teor de humidade no solo constituintes do *Fire Weather Index (FWI)*, nomeadamente os Índice de humidade dos combustíveis finos, índice de húmus e o índice de seca. A infraestrutura constitui ainda uma solução inovadora na prevenção do território à frequência de incêndios florestais, recuperação do solo após o fogo, aproveitando as cadeias de valor dos produtos endógenos.

**Palavras-chave:** Infraestrutura húmida Sustentável, Incêndios florestais, Retenção de Água, Materiais Endógenos, Resiliência

## ABSTRACT

*This article is addressed primarily to entities with responsibilities in the field of urbanism and civil protection, provided an updated overview of the possibility to improve forest fire prevention and suppression strategies at the urban forest interface. The project of sustainable forest fire retardant wet infrastructure is presented as a land-use solution, aimed at increasing the resilience of forest ecosystems, especially in the Serra da Estrela, against forest fires. The integration in urban forest interface is an innovative solution that allows to create a physical separation between vegetation and built-up, in the extended interface, with decrease of fuel load and its flammability, preserving the humidity of fine fuels and, protecting the existing building against the severity of forest fires. The development of an infrastructure capable of minimizing soil moisture losses by evapotranspiration, allows an effective contribution to the preservation of the values of sub-indices of soil moisture content constituents of the Fire Weather Index (FWI), namely the Index of moisture of fine fuels, humus index and the dry index. The infrastructure is also an innovative solution in preventing the territory to the frequency of forest fires, recovery of soil after fire, taking advantage of the value chains of endogenous products.*

**Keywords:** Sustainable Wet Infrastructure, Forest Fires, Water Retention, Endogenous Materials, Resilience

## **1 INTRODUÇÃO**

Pelo termo “Infraestrutura” entendemos, de uma forma muito geral e empírica tudo aquilo que se situa debaixo de uma construção, que geralmente é invisível e se localiza abaixo da cota do terreno, que no domínio da engenharia civil que se materializa num conjunto de tubagens, cabos e dispositivos para o transporte de águas, gás, eletricidade e comunicações.

É assim, em primeiro lugar, e objetivo primeiro que a solução de ocupação no solo da infraestrutura permita alcançar simultaneamente a conservação da natureza e biodiversidade, promovendo estruturas de suporte à manutenção da vida selvagem. Em segundo lugar, alargar o âmbito dando visibilidade aos produtos endógenos, com características de incorporação na infraestrutura, como os inertes de granito, biomassa florestal e o burel, estimulando o desenvolvimento e regeneração de um segmento económico existente, mas subaproveitado.

No processo de revisão de literatura e coleta de informações sobre os materiais endógenos com capacidade de incorporação na infraestrutura, e a intenção desta ser constituída em três camadas, primeira permitindo influenciar a fixação e retenção de água no solo, segunda retardar a evapotranspiração e terceira diminuir a carga de combustível disponível para combustão, os inertes de granito apresentam um valor acrescentado na obtenção dos objetivos propostos.

### **1.1 Utilidade prática de uma infraestrutura de retardante aos incêndios florestais**

A consolidação do sistema de proteção civil e a promoção da resiliência a catástrofes pelas populações encontram-se alicerçados na prevenção e preparação, integrando a visão e princípios da Proteção Civil Preventiva. É neste sentido que a prevenção se afigura como um conjunto de projetos e atividades, que levam em conta as linhas estratégicas orientadoras face a um conjunto de riscos coletivos, naturais, tecnológicos e mistos, com expressividade em Portugal para os incêndios florestais. A infraestrutura tem por objetivo a proteção de pessoas e bens, localizadas na interface urbano-florestal, zonas de proteção aos aglomerados e em infraestruturas estratégicas, pela sua incorporação pela ocupação do solo, como medida de autoproteção e de preparação face a incêndios rurais, por forma a reforçar a sua segurança.

## **2 MATERIAIS ENDÓGENOS - GRANITO**

As rochas naturais são um material de construção muito comum, e sua estabilidade desempenha um papel importante na segurança e durabilidade de túneis, encostas de talude e demais projetos de estruturas [1]. Os resultados mostram que os materiais rochosos apresentam diferentes graus de variação nas propriedades físicas e

mecânicas sob o efeito das altas temperaturas e da corrosão em soluções ácidas [1], como as características de superfície. A serra da estrela constitui-se como um maciço granítico de origem nos metassedimentos devido à deposição de areias e rochas muito finas em ambiente marinho. Segundo Zhen Huang é possível aferir a variação das características de superfície sob a influência da temperatura e erosão química recorrendo a TEST 135 A Calorímetro determinando a intensidade da cor na superfície do provete. Os dados medidos incluem três parâmetros de índice  $L$ ,  $a$  e  $b$ , correspondentes ao valor de cromaticidade da cor medida. Os índices  $L$  representam a luminosidade,  $a$  representa vermelho-verde e  $b$  representa amarelo-azul. A equação (1) é usada para calcular a diferença entre a cor da superfície do provete sob diferentes temperaturas e erosão de soluções químicas relativamente à temperatura ambiente.

---

$$\Delta E = \sqrt{(L_t - L_0)^2 + (a_t - a_0)^2 + (b_t - b_0)^2} \quad (1)$$

onde  $\Delta E$  é a variação de cor,  $L_0$ ,  $a_0$ ,  $b_0$  e  $L_t$ ,  $a_t$ ,  $b_t$  representa os parâmetros cromáticos de espécimes não tratados e espécimes após erosão química em alta temperatura, respetivamente.

Os valores de cromaticidade da cor da superfície dos provetes, como mostrado na Figura 1 com a exposição de três provetes (granito, arenito e mármore) à temperatura mostra a tendência óbvia em relação ao aumento da temperatura com alteração de cor atingindo 16.51 a 1000 °C.

**Figura 1 Mudança na alteração de cor da superfície dos diferentes provetes de rocha sob diferentes temperaturas**

Os resultados mostram que as altas temperaturas são o principal fator de alteração das mudanças na cor da superfície dos provetes de rocha, enquanto a exposição a soluções ácidas, corroem e promovem a fragmentação de partículas e o desenvolvimento de fissuração na superfície.

Quando as rochas sofrem erosão provocada pelo fogo ou água subterrânea, os cristais minerais internos, matrizes, cimentos e outros componentes são alterados pelos efeitos de alta temperatura e da ação química, como desidratação, mudança de fase, recristalização, e decomposição mineral, resultando em variações na massa e microestrutura interna da rocha. O dano aos materiais rochosos devido à exposição a alta temperatura é irreversível [2] [3].

A evaporação da água dentro da rocha e homogeneidade no aumento de volume das partículas minerais pode causar alterações na microestrutura interna da rocha. A perda de massa dos três tipos de rochas expostas a altas temperaturas e à erosão química, pode ser calculada pela equação (2).

$$\frac{m_t - m_0}{m_0} = K_m \quad (2)$$

onde  $K_m$  é a mudança relativa na massa dos provetes de rocha,  $m_0$  é a massa inicial do espécime de rocha, e  $m_t$  é a massa final de rocha sob diferentes temperaturas e erosão química. As mudanças relativas de massa dos três tipos de rocha apresentaram um aumento exponencial com a temperatura e erosão química ( $R^2$  maior que 0,85), conforme Figura 3.

**Figura 2 Variação da cor na superfície e grau de dano nos três tipos de rochas.**

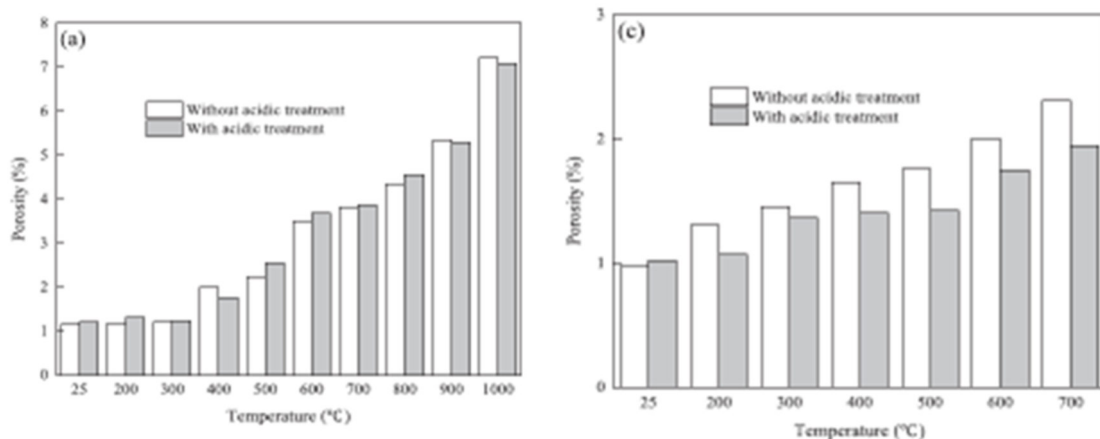
A tendência é a perda de massa com o aumento de temperatura, nos três tipos de rocha, no entanto o granito apresenta uma perda linearmente crescente com o incremento da temperatura, apresentando a 1000 °C uma perda de massa de apenas 1.31%, resultado da densidade, uniformidade e conexão forte entre os minerais que o constituem. Esta característica é uma das características na escolha como inerte na construção e obras de relevo como depósitos de resíduos nucleares subterrâneos [1].

### **Figura 3 Perda de massa de rocha sob alta temperatura**

**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

Os efeitos da temperatura na porosidade nos três tipos de rocha granito, arenito e mármore, mostram que esta aumenta com a exposição à temperatura. Como mostra a Figura 4 a porosidade inicial do granito é de aproximadamente 1,22% à temperatura ambiente, valor indicativo de uma boa compactação. No entanto após a exposição à temperatura a valores na ordem dos 1000 °C a porosidade aumenta na ordem dos 7,08%. A massa das rochas pode alterar sob o efeito de alta temperatura, esta variação é causada por alterações internas, nomeadamente nos micróporos internos, microrroturas resultando em mudanças de porosidade e volume de vazios. Através de ensaios não destrutivos como a ressonância magnética nuclear é possível a caracterização estrutural microscópico interior das rochas com correlação no parâmetro da porosidade [4] [5] [6].

**Figura 4 Variação da porosidade (a) Granito (b) Mármore sob os efeitos da alta temperatura**



**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

A Figura 4 explicita os resultados da literatura sobre a porosidade e exposição à alta temperatura e, respetivamente com e sem tratamento ácido. Os resultados mostram que a porosidade do granito pode ser dividida em dois grupos principais, os granitos densos com uma porosidade inicial de aproximadamente 1% e granitos com porosidade de 5,3% com aumento da porosidade até 7,00% a 1000°C. O mármore, no entanto, é o que apresenta menores variações à temperatura com porosidades iniciais na faixa dos 0,23%-1,03% até valores finais de 2,30% [3] [7] [8] [9] [10] [11] [12].

A condutividade térmica é uma propriedade física natural dos materiais rochosos. Seu valor numérico reflete a integridade da estrutura interna das amostras de rocha. Quanto mais completa a estrutura interna das amostras de rocha, maior sua condutividade térmica. A comparação da condutividade térmica do granito com outras rochas é mostrada na Figura 5. Os resultados mostram que a condutividade térmica geralmente aumenta com um aumento na exposição à temperatura, com pequenas variações entre todas. O granito contém os minerais de feldspato mais abundantes e a condutividade térmica destes varia de 2 a 2,7 W/mK [9], portanto, a condutividade térmica inicial do granito é ligeiramente inferior à do arenito, com 3,57 W/mk e superior ao mármore. Para o granito, a condutividade térmica inicial varia na faixa de 1,83-3,57 W/mK, diminuindo finalmente para 0,74-1,43 W/mK sob o efeito da alta temperatura, com uma diminuição média de 56% [9] [13] [14] [15].

A evolução das tensões de cedência no deslocamento, em função da temperatura correspondem ao valor máximo da resistência à tração, conforme mostrado na Figura 6, a resistência à tração do granito diminuiu significativamente com o aumento da temperatura de ação e a imersão em soluções ácidas.



**Figura 5 Variação na condutividade térmica da rocha sob o efeito de temperatura.**

**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

A resistência à tração diminuiu para 1,10 MPa após ter experimentado a alta temperatura de 1000 °C , que era 88% menor em comparação com a resistência à tração de amostras de granito à temperatura ambiente ( $\sigma_t = 9,24$  MPa), e quando as amostras de granito experimentaram o efeito da imersão em solução ácida e a alta temperatura a 1000 ° C , a resistência à tração diminuiu para 0,99 MPa, resultado 89% menor que as características iniciais.

**Figura 6 As curvas de tensão-deslocamento do granito. (a) Sem corrosão ácida, e (b) com corrosão ácida.**

**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

### 3 DISCUSSÃO

O granito exposto a altas temperaturas e sob o efeito da erosão pelas soluções ácidas, levam ao aparecimento de fissuras que destroem a estrutura e enfraquecem a ligação entre as partículas. Estas patologias levam ao início, propagação e penetração de fissuras, resultando em um aumento na porosidade e uma diminuição na sua integridade física. Assim, quaisquer propriedades físico-mecânicas do granito são em última análise determinadas pela escala atômica ou molecular e pelo tamanho estrutural dos micro defeitos [16] [17] [18].

**Tabela 1 Principais reações físico-químicas do granito exposto a altas temperaturas**

Litologia	Temperatura [°C]	Alterações Físicas	Reação química
Granito	25-300	Evaporação de água livre e combinada.	$H_2O \rightarrow H_2O \uparrow$
	500-900	Transição de fase do quartzo.	$\alpha\text{-quartz} \rightarrow \beta\text{-quartz} \rightarrow \beta\text{-tridymite}$
	300-1000	Transição de feldspato para microclina.	Feldspato $\rightarrow$ Microcline

**Fonte:** Adaptado de Construction and Building Materials (2021)

Um resumo das alterações químicas do granito está visível na Tabela 1. Esta alteração química e física altera também a condutividade térmica e finalmente a variação dos minerais e o desenvolvimento de microfissuras nas rochas levará à diminuição da sua resistência à tração.

### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da revisão da literatura evidenciam as boas propriedades físicas e mecânicas do granito para incorporação na terceira camada da infraestrutura (camada que fica em contacto com o ar), reduzindo significativamente a carga de combustível disponível para combustão, (uma vez que não contribui para esta). Esta disposição física na infraestrutura permite aos inertes de granito constituírem uma barreira isolante, apresentando valores de condutibilidade térmica de 0,74-1,43 W/mK mesmo sob os efeitos das altas temperaturas. Este fator favorece a mitigação da fase de secagem/pré-aquecimento da segunda camada da infraestrutura que será constituída por materiais com contribuição para o fogo limitada, mas que podem acelerar a sublimação a partir dos 150°C e conseqüente emissão de materiais voláteis. Os poucos resultados da resistência à tração diminuindo para 1,10 MPa após ter

experimentado altas temperatura de 1000 °C, não tem influência no design da infraestrutura uma vez que esta se comportará em termos de esforços somente à compressão, com residual impacto em termos de estabilidade. No que concerne ao aumento da porosidade com o aumento da temperatura, esta poderá ser de residual significância uma vez que o sequestro da água nos poros no granito não permite a infiltração no solo beneficiando a preservação dos valores dos sub-índices de teor de humidade no solo constituintes do *Fire Weather Index*. Importa referir que a disposição de diferentes granulometrias de inertes de granito na infraestrutura podem influenciar a evapotranspiração do solo ocupado pela infraestrutura, preservando a taxa de infiltração da água, fator benéfico conservação da natureza, biodiversidade e do *Fire Weather Index*.

## REFERÊNCIAS

- [1]C. David, B. Menendez, M. Darot. " Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite." **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 36 (1999): 433-448.
- [2]Chao Lü, Qiang Sun†, Weiqiang Zhang, Jishi Geng, Yueming Qi, Liangliang Lu. "The effect of high temperature on tensile strength of sandstone." **Applied Thermal Engineering** 111 (2017): 573-579.
- [3]Hao Li, Zuliang Zhong, Xinrong Liu, Yong Sheng, Dongmin Yang. "Micro-damage evolution and macro-mechanical property degradation of limestone due to chemical effects." **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 110 (2018): 257-265.
- [4]Hao Lia, Dongmin Yanga, Zuliang Zhongb, Yong Shenga, Xinrong Liub. " Experimental investigation on the micro damage evolution of chemical." **International Journal of Fatigue** 129 (2018): 23-32.
- [5] Hu Wen, Jun-hui, Lu. Yang Xiao, jung Deng. "Temperature Dependence of thermal conductivity, diffusion and specific heat capacity for coal and rocks from coalfield." **Thermochimica Acta** 619 (2015): 41-47.
- [6] I. M. Abdulagatov, Z. Z. Abdulagatova, S. N. Kallaev , A. G. Bakmaev, P. G. Ranjith. "Thermal-Diffusivity and Heat-Capacity Measurements of Sandstone at High Temperatures Using Laser Flash and DSC Methods ." **International Journal of Thermophysics** 36 (2015): 658-691.
- [7] Jianjun Hua, Qiang Suna, Shen-en Chenb, Weiqiang Zhanga. "The thermodynamic properties variation of cemented clay." **Construction and Building Materials** 182 (2018): 523-529.
- [8] Jingjing Li, Jianling Jiao, Yunshu Tang. "An evolutionary analysis on the effect of government policies on electric vehicle diffusion in complex network." **Energy Policy** 129 (2019): 1-12.

- [9] LianYing Zhang, XianBiao Mao & AiHong Lu. "Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature." *Science in China Series E: Technological Science* 52 (2009): 641-646.
- [10] Qiang Sun, Weiqiang Zhang, Lei Xue, Zhizhen Zhang, Tianming Su. "Thermal damage pattern and thresholds of granite ." *Environmental Earth Sciences* 74 (2015): 2341-2341.
- [11] Qiang Suna, Chao Lüa,n, Liwen Caoa, Weichao Lib, Jishi Genga, Weiqiang Zhanga. "Thermal properties of sandstone after treatment at high temperature." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 85 (2016): 60-66.
- [12] S. Q. Miao, H. P. Li & G. Chen. "Temperature dependence of thermal diffusivity, specific heat capacity, and thermal conductivity for several types of rocks." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 115 (2013): 1057-1063.
- [13] Shengjun Miaoa, Meifeng Caia, Qifeng Guoa, Peitao Wang, Mingchun Liang. "Damage effects and mechanisms in granite treated with acidic." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 88 (2016): 77-86.
- [14] Shi Liu, Jinyu Xu. "Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 71 (2014): 188-193.
- [15] Weiqiang Zhang, Qiang Sun, Shuyun Zhu, Bo Wang. "Experimental study on mechanical and porous characteristics of limestone affected by high temperature." *Applied Thermal Engineering* 110 (2017): 356-362.
- [15] X.L. Xua, M. Karakusb. "A coupled thermo-mechanical damage model for granite ." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 103 (2018): 195-204.
- [16] Zhao Hongbao, Yin Guangzhi, Chen, Lunjian. "Experimental study on effect of temperature on sandstone damage." *Journal of Rock Mechanics and Engineering* 28 (2009): 2784-2788.
- [17] Zhen Huang, Wei Zeng, Qixiong Gu, Yun Wu, Wen Zhong , Kui Zhao. "Investigations of variations in physical and mechanical properties of granite, sandstone, and marble after temperature and acid solution treatments." *Construction and Building Materials*, 2021.
- [18] Zhou, Sheqiang Miao & Yongsheng. "Temperature dependence of thermal diffusivity and conductivity for sandstone and carbonate rocks." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 131 (2017): 1647-1652.



## **INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS COM RECURSO A GEOMÁTICA E VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)**

NERY, DAYANE (1); SANTOS, BERTHA (2); ALMEIDA, PEDRO G. (3)

(1) Universidade da Beira Interior, GeoBioTec-UBI, E-mail:  
oliveira.nery.dayane@gmail.com

(2) Universidade da Beira Interior, GeoBioTec-UBI, E-mail: bsantos@ubi.pt

(3) Universidade da Beira Interior, GeoBioTec-UBI, E-mail:  
galmeida@ubi.pt

### **RESUMO**

Os pavimentos rodoviários deterioram-se com o tempo devido às cargas do tráfego e às condições ambientais a que estão sujeitos. Sendo uma componente fundamental das infraestruturas de transporte, é de extrema importância garantir o seu bom estado de forma a assegurar condições adequadas de circulação e a segurança de utentes, bens e veículos. Para avaliar o estado do pavimento são realizadas inspeções que têm como intuito determinar o nível de degradação da sua superfície e a necessidade de programar operações de reparação ou reconstrução. Neste contexto, o trabalho apresentado visa verificar a utilização da geomática e de veículos aéreos não tripulados (VANT) como opção tecnológica inovadora para a realização de operações de inspeção de pavimentos rodoviários que permitam obter os dados necessários para aferir o estado dos pavimentos. Para verificar esta abordagem foram estudados um conjunto de dados obtidos na inspeção de um trecho de pavimento rodoviário realizada com recurso a VANT. Foram analisados os dados recolhidos a duas alturas de voos diferentes: 3m e 20m. Para determinar o estado do pavimento da secção estudada foram utilizados modelos 3D do pavimento, o que permitiu identificar e medir as degradações superficiais no software Agisoft Viewer e com base nessa informação calcular os índices de qualidade 'Present Serviceability Index' (PSI) e 'Pavement Condition Index' (PCI). Com o objetivo de determinar a melhor altura de voo para a realização de operações de inspeção de pavimentos com recurso a VANT, os valores obtidos nas medições das degradações e os resultados alcançados na determinação dos índices de qualidade do pavimento, para as duas alturas de voo, foram comparados. Os resultados permitiram concluir que a realização de inspeções com recurso a VANT, efetuadas para uma altura de voo de 20m, é adequada para a avaliação do estado de pavimentos rodoviários.

**Palavras-chave:** Veículos aéreos não tripulados (VANT), geomática, inspeção de pavimentos rodoviários, degradações superficiais, modelo 3D.

## ABSTRACT

Road pavements deteriorate over time due to traffic loads and environmental conditions. As a fundamental component of transport infrastructure, it is extremely important to ensure pavements condition to warrant adequate traffic circulation and the safety of users, goods and vehicles. For pavement condition assessment, inspections are carried out to determine the level of surface damage and the need to schedule repair or reconstruction operations. In this context, this article aims to evaluate the use of geomatics and unmanned aerial vehicles (UAVs) as an innovative technological option to perform road pavement inspection and obtain the necessary data for assessing pavement condition. To verify this approach, a set of data collected in a road pavement section using UAV was studied. Data from different flight heights, 3m and 20m, was analyzed. To determine the pavement condition of the studied section, 3D models of the surface were built from the captured images. The 3D models allowed to identify and measure surface distresses using Agisoft Viewer software. Based on such information the global pavement quality indexes 'Present Serviceability Index' (PSI) and 'Pavement Condition Index' (PCI) were determined. Aiming to assess the optimum flight height for pavement inspection using UAVs, distresses measurements and pavement quality indexes, for the two flight heights, were compared. Results allowed to conclude that performing inspections using UAVs, at a flight height of 20m, is suitable for the evaluation of road pavements condition.

**Keywords:** Unmanned aerial vehicles (UAVs), geomatic, road pavement inspection, surface distresses, 3D model.

## 1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários apresentam diminuição na sua qualidade ao longo do tempo, o que se traduz no aparecimento de degradações que são causadas pela ação contínua das cargas do tráfego e das condições ambientais. Para garantir a segurança dos utilizadores e dos veículos é necessário adotar estratégias de preservação dos pavimentos de modo a garantir boas condições de circulação. Para este fim, são realizadas inspeções para a recolha de dados sobre o estado da superfície dos pavimentos.

Com o avanço tecnológico, várias técnicas de inspeção de infraestruturas têm vindo a ser aprimoradas de modo a facilitar este tipo de operação e melhorar o nível de desempenho. Uma tecnologia que

vem ganhando espaço nesta área são os veículos aéreos não tripulados (VANT). Estes são usados em diversos campos de aplicação que recorrem à geomática, sendo uma opção atual e em grande expansão devido ao rápido desenvolvimento do hardware e software associado quando comparados com os veículos terrestres multifuncionais usados na inspeção de pavimentos, apresentando ainda custos consideravelmente mais reduzidos de aquisição e de operação.

Neste contexto, o trabalho apresentado pretende estudar a utilização de VANT como uma técnica alternativa de inspeção de pavimentos rodoviários, nomeadamente através da identificação dos diversos requisitos a considerar na operação destes equipamentos para a obtenção de dados representativos e fiáveis sobre o estado da superfície de pavimentos. Pretende-se assim controlar vários aspetos relacionados com a geomática, especificamente aqueles envolvidos na adequada aquisição e captura de dados, o seu tratamento e modelagem, a análise e exploração da informação, e a sua representação e disseminação. Os requisitos recomendados são ainda validados com recurso ao desenvolvimento de um caso de estudo.

O seguinte artigo está dividido em cinco secções. A primeira, a introdução, apresenta a pertinência do tema proposto. Na secção seguinte, refere-se à análise de dados sobre o estado dos pavimentos. O terceiro capítulo apresenta as condições e fatores a considerar na aquisição e tratamento de imagens da superfície do pavimento com recurso a VANT. O quarto capítulo apresenta o caso de estudo onde serão analisados os dados levantadas em um trecho de pavimento flexível com a utilização de um VANT. Por fim, o quinto capítulo apresenta as principais conclusões.

## **2 AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS PAVIMENTOS**

Para definir programas eficazes de manutenção e reabilitação de pavimentos, as agências rodoviárias recorrem à implementação de sistemas de gestão de pavimentos (SGP). Um SGP é uma ferramenta de planeamento que tem como objetivo auxiliar os gestores de uma rede rodoviária a manter em bom estado os pavimentos, de forma eficiente, em tempo útil e a um custo reduzido, garantindo assim o conforto e a segurança dos utilizadores (RAGNOLI et al., 2018; ROBERTS et al., 2020).

Para avaliar o estado dos pavimentos, os SGP incluem uma componente de avaliação da qualidade dos pavimentos, que recorre à determinação de índices os quais refletem a qualidade do pavimento em termos de desempenho estrutural e operacional. Esses índices combinam informações sobre diversos tipos de degradações, classificadas por tipo, nível de gravidade (severidade) e extensão, para fornecer uma medida do estado do pavimento. As características das degradações superficiais fendilhamento, pele de crocodilo, covas, peladas, rodeiras, reparações e irregularidade longitudinal são

geralmente as usadas na determinação destes índices. Entre os índices mais utilizados para determinação da qualidade da superfície de pavimentos estão o *Pavement Serviceability Index* (PSI) e o *Pavement Condition Index* (PCI).

O *Pavement Serviceability Index* (PSI) resultou dos estudos realizados no ensaio rodoviário da AASHO e estabelece uma estimativa da qualidade de serviço dos pavimentos analisando características de irregularidade longitudinal e de degradações da superfície (fendilhamento, pele de crocodilo, covas, peladas, rodeiras e reparações) (BRANCO et al., 2008). O PSI classifica a qualidade do pavimento numa escala de 0 a 5, sendo um índice de 0 – 1 considerado muito mau, 1 – 2 mau, 2 – 3 regular, 3 – 4 bom e 4 – 5 muito bom. Em Portugal, a expressão (1), adaptada da original, foi utilizada para o cálculo do PSI da rede rodoviária de Lisboa (SANTOS, 2002).

$$PSI = 5 \times e^{-0,000259 \times \frac{1}{4} \times IRI} - 0,002139 \times \frac{1}{4} \times R^2 - 0,03 \times 7 \times (Ct + St + Pt)^{0,5} \quad (1)$$

Onde,

- IRI = irregularidade longitudinal (mm/km);
- R = rodeiras (mm);
- Ct = área total degradada com fendilhamento e pele de crocodilo (% de área degradada);
- St = área total degradada com cova e pelada (% de área degradada);
- Pt = área total degradada com reparação (% de área degradada).

O *Pavement Condition Index* (PCI) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA e é adotado como procedimento padrão por agências rodoviárias em todo o mundo. É baseado no levantamento visual das degradações superficiais do pavimento, sendo o grau de deterioração uma função do tipo de degradação, do seu nível de gravidade e da quantidade ou densidade da degradação. O PCI apresenta o estado do pavimento numa escala de 0 a 100, em que 100 representa as condições perfeitas de funcionamento e 0 representa falha estrutural do pavimento. A norma que descreve o procedimento a adotar para determinação do PCI é a ASTM D6433 (ASTM D6433 - 18, 2018), sendo a expressão (2) a utilizada na fase final do cálculo do PCI.

$$PCI = 100 - Máx CDV \quad (2)$$

Onde, CDV = máximo valor de dedução.

O procedimento para a determinação do valor de CDV inicia-se pela obtenção do valor de dedução DV para cada uma das degradações e níveis de gravidade identificados. O DV é determinado a partir da análise dos ábacos apresentados no anexo X3 da norma ASTM D6433 em função da densidade de cada uma das degradações identificadas e dos respetivos níveis de gravidade. Após a obtenção dos valores de DV para cada degradação, estes são organizados por ordem decrescente, sendo o maior dos valores encontrados o valor de dedução individual máximo



HDV. O valor de HDV é utilizado para determinar o número de valores deduzidos ( $m$ ) com valor superior a 2 ( $q$ ) a considerar. Em seguida utiliza-se os valores de HDV e de  $q$  para encontrar o valor de CDV no ábaco X3.27 da norma ASTM D6433. Deve-se iterar o cálculo de CDV até que  $q$  seja igual a 1. O CDV a considerar na expressão (2) é o maior dos valores de CDV determinados nas várias iterações. A descrição detalhada e um exemplo do procedimento descrito pode ser consultado na norma ASTM D6433.

### **3 CONDIÇÕES E FATORES A CONSIDERAR NA INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS COM RECURSO A VANT**

Para determinar os principais fatores a ter em conta na utilização de VANT para inspeção de pavimentos, foram analisados 15 artigos científicos publicados entre 2016 e 2022, considerados os mais relevantes numa pesquisa efetuada na base de dados Scopus (CONGRESS et al., 2021; HUANG et al., 2019; KAAMIN et al., 2022; NAPPO et al., 2021; PAN et al., 2017, 2018; ROMERO-CHAMBI et al., 2020; SILVA et al., 2020; TAN & LI, 2019; WANG et al., 2019; ZHANG et al., 2016; ZHONG et al., 2022; ZHU et al., 2021; GARILLI et al., 2020; MASLAN & CICMANEC, 2021). A maioria das pesquisas focam os seus estudos na captação de imagem e deteção automática de degradações em pavimentos flexíveis (betuminoso) sendo as efetuadas em pavimentos rígidos (betão) e em pedra em número bastante reduzido.

As degradações mais comuns estudadas são as covas e o fendilhamento. Estudos mais recentes (GARILLI et al., 2020; TAN & LI, 2019; NAPPO et al., 2021, KAAMIN et al., 2022) consideram para além destas reparações, pele de crocodilo, exsudação, depressões, elevações, ondulações, sulcos, deformações e fraturas de blocos de pedra. No que respeita às alturas de voo adotadas na inspeção, estas variam entre 15 a 30m. As alturas de voo devem respeitar os regulamentos em vigor nos locais de inspeção e o grau de detalhamento desejado. Alturas de voo mais elevadas captam imagens com menor detalhe, não sendo possível determinar degradações de níveis de gravidade mais baixo. No entanto, podem ser feitos de forma automática e são mais seguros, uma vez que evitam obstáculos fixos, como árvores e postes de iluminação. Para alturas de voo mais baixas o detalhe e a precisão melhoram, mas verificam-se problemas com o sinal de GPS devido à presença de obstáculos e, é necessário realizar voos manuais, tornando o procedimento mais demorado.

O processamento dos dados reportado nos 15 estudos analisados recorre, em geral à utilização de técnicas de reconstrução 3D, com uso de softwares de fotogrametria e geomática, assim como as técnicas de processamento de dados com recurso ao SfM (Structure from Motion). Para identificação das degradações são geralmente utilizados algoritmos de classificação automática como o YOLO (You Only Look

Once), o RF (Random Forest), as ANN (Artificial Neural Network) e o KNN (K-Nearest Neighbours), entre outros.

No geral, os estudos analisados foram capazes de alcançar os objetivos inicialmente propostos. Apesar de algumas dificuldades para identificar degradações com nível de gravidade baixo, a taxa de identificação das degradações observadas para níveis de gravidade médio e alto são significativas.

A maioria dos estudos recorre à utilização de VANT de pequeno porte equipados com tecnologia capaz de captar imagens que permitem a construção de modelos 2D e 3D e a medição nestes das dimensões mínimas que caracterizam o nível de gravidade baixo das degradações. A inspeção deve ser programada tendo em conta a autonomia de voo do veículo, reportada nos estudos como sendo de aproximadamente 30 minutos por bateria, com tendência para aumentar devido aos avanços tecnológicos no campo de armazenamento de energia. Os voos devem ser feitos em condições climáticas favoráveis, com captação de imagem na vertical e taxas de sobreposição lateral e frontal de 60 a 70% e 75 a 80%, respetivamente. Devem ser considerados ainda pontos de controle fixos localizados junto ou na estrada para auxiliar na construção dos modelos 2D e 3D da superfície do pavimento.

Existe consenso entre os autores de que em comparação com a inspeção tradicional efetuada a pé, a inspeção de pavimentos com recurso a VANT reduz os custos de inspeção e economiza tempo e mão de obra, sendo também uma técnica mais objetiva.

Tendo em conta à análise efetuada à literatura serão apresentados na Tabela 1, um conjunto de requisitos a ter em conta na inspeção de pavimentos com a utilização de VANT.

**Tabela 1 – Requisitos a ter em conta na inspeção de pavimentos com recurso a VANT**

Atributos	Requisitos
Degradações	É necessário identificar na imagem a dimensão planimétrica e altimétrica mais pequena considerada no catálogo de degradações adotado. Por exemplo, para a determinação do PCI (ASTM D6433 - 18, 2018) em pavimentos flexíveis: fendas longitudinais e transversais de largura mínima de 10mm; rodeiras com profundidade de 6mm.
Condições climáticas	O levantamento de dados com VANT não deve ser efetuado em condições de chuva, neve, calor intenso ou humidade.
Tipo de VANT	VANT de pequeno porte (quadricóptero ou hexacóptero).
Altura de voo	Entre 15 e 30m. Alturas menores permitem resoluções milimétricas.
Autonomia de voo	Aproximadamente 30 minutos (por bateria)
Câmaras / sensores	Câmaras digitais de alta resolução, geralmente acompanhadas de um sensor (ex: CMOS de 20MP e a tecnologia LiDAR).
Ângulo de aquisição de imagens	Ângulo vertical (90°).
Taxa de sobreposição das imagens	Sobreposição lateral de 60 a 70% e sobreposição frontal de 75 a 80%
Recursos humanos	No mínimo 2 pessoas
Pontos de controlo	Devem ser identificados ao longo da estrada marcas estáveis com características geográficas conhecidas, utilizando-os como pontos de controlo de solo (GCPs – <i>ground control points</i> ) que auxiliam a modelagem 3D e a extração de características do pavimento.

Com a verificação dos requisitos necessários para a utilização de VANT, é possível estabelecer esta tecnologia como uma técnica de inspeção de pavimentos.

## 4 CASO DE ESTUDO

### 4.1 Enquadramento

O caso de estudo foi desenvolvido utilizando os dados levantados com VANT numa secção da estrada N18, localizada no Fundão, Portugal (ver Figura 1). Para levantamento dos dados foi utilizado um quadricóptero Mavic 2 Pro, que oferece uma autonomia de voo de 20 minutos por bateria e se encontra equipado com uma câmara com resolução de 5472×3648 pixéis. A área do trecho estudado é de 179m<sup>2</sup>. Os modelos 3D construídos a partir das imagens recolhidas foram processados no software Agisoft Metashape e as medições das características das degradações do pavimento (comprimento, profundidade, áreas e volumes) foram realizadas no software Agisoft Viewer.

Foram realizados vários levantamentos com diferentes alturas de voo, nomeadamente 3m, 10m e 20m. Foram também estabelecidos pontos

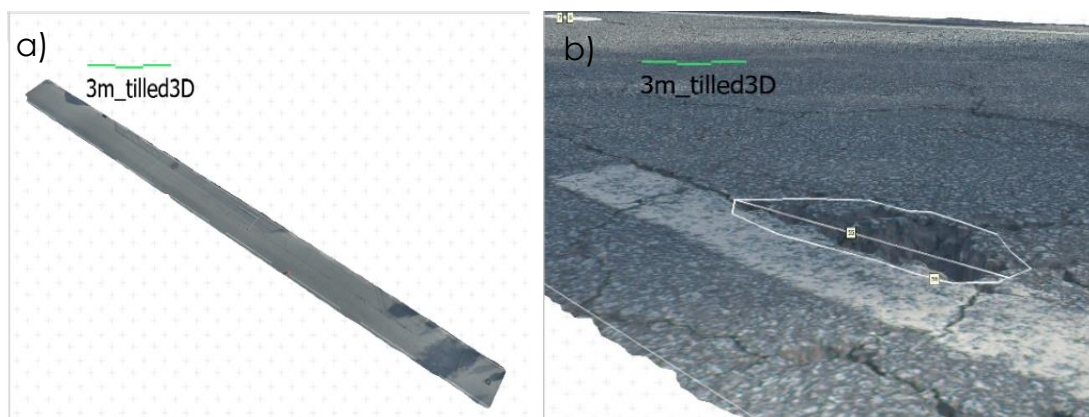
de controle *in situ* com o intuito de garantir a precisão dos modelos 3D criados. Neste estudo são analisados os dados levantados a alturas de voo de 3m e 20m para avaliar o nível de detalhe alcançado nos dois levantamentos.



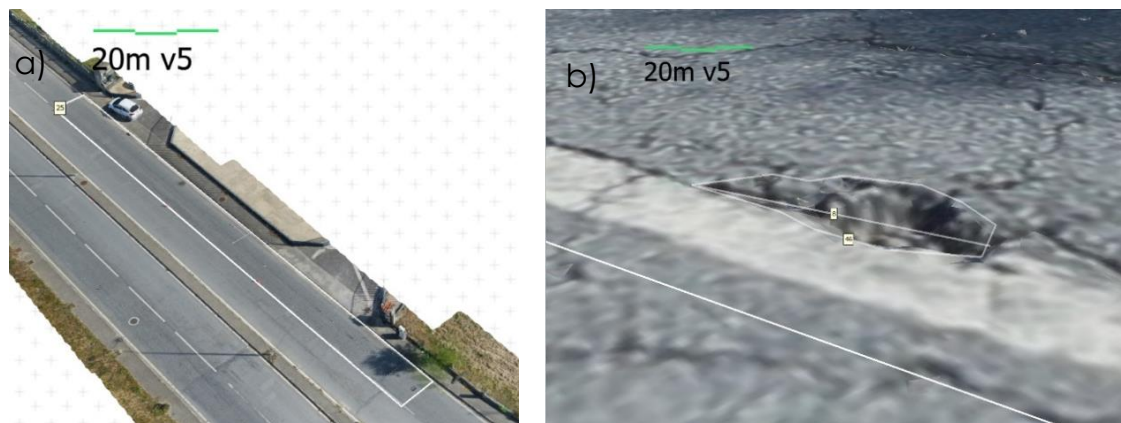
**Figura 1.** Imagem da secção da estrada N18 estudado. Fonte: Google Earth

As Figuras 2 e 3 apresentam um extrato dos modelos 3D do pavimento estudado, construídos com as imagens captadas a alturas de voo de 3m e 20m, respetivamente.

Para garantir a precisão das medições realizadas no programa utilizado, foram considerados alguns pontos de referência, os quais foram medidos no Agisoft Viewer as duas alturas de voo e comparadas com as medidas reais. Em seguida foram calculados os índices PSI e PCI com os dados levantados a 3m e 20m e comparados entre si para verificar a existência de diferenças significativas em imagens captadas a diferentes alturas de voo.



**Figura 2.** a) Modelo 3D construído no Agisoft Viewer a partir das imagens captadas a 3m de altura. b) Pormenor de medição de uma cova no modelo 3D – 3m.



**Figura 3.** a) Modelo 3D construído no Agisoft Viewer a partir das imagens captadas a 20m de altura. b) Pormenor de medição de uma cova no modelo 3D – 20m.

## 4.2 Critérios de identificação e medição das degradações

Para o cálculo dos índices PSI e PCI, as degradações foram identificadas e medidas segundo as indicações fornecidas pelos catálogos de degradações adotados para a avaliação da Rede Rodoviária de Lisboa (SANTOS, 2002) e pela norma ASTM D6433-18 (ASTM D6433 - 18, 2018), respetivamente. Ao analisar o pavimento rodoviário no Agisoft Viewer foram identificados quatro tipos de degradações: fendilhamento, pele de crocodilo, covas e reparações.

Para validar as medições realizadas na ferramenta informática Agisoft Viewer relativas às características geométricas das degradações, foram comparadas medições obtidas de alguns elementos nos modelos 3D com as medições *in situ*. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos. Verifica-se que as diferenças entre as medições realizadas no modelo 3D-3m, relativamente à medição real, divergem aproximadamente em 1mm em planta e em 2-3mm em profundidade. Para as imagens captadas a 20m, esta variação é de 0 a 20mm em planta e de 2 a 8mm em profundidade.

Os elementos medidos com dimensões até 5cm possuem no modelo 3D-3m um erro de 1 a 9% em planta e de 5 a 6% em profundidade. No modelo 3D-20m, este erro é de 1 a 5% em planta e de 5 a 13% em profundidade. Relativamente às medições que possuem dimensões maiores do que 5cm, o erro no modelo 3D em planta é praticamente nulo nas imagens captadas a 3m, e de 0 a 2% nas imagens captadas a 20m. Não foram recolhidos dados de elementos com dimensões superiores a 5cm para a profundidade.

**Tabela 2 – Comparação de medições reais com medições efetuadas nos modelos 3D – 3m e 3D – 20m**

Elementos e dimensão medida	Medição real	Medição no modelo 3D - 3m	Diferença entre a medição real e no modelo 3D - 3m		Medição no modelo 3D - 20m	Diferença entre a medição real e no modelo 3D - 20m	
	m	m	m	%	m	m	%
Comprimento da régua	0,200	0,2000	0,0000	0%	0,2000	0,0000	0%
Largura da régua	0,015	0,0148	0,0002	1%	0,0145	0,0005	-3%
Comprimento da mira 1 – 1m	1,000	0,9990	0,0010	0%	0,9850	0,0150	-2%
Comprimento da mira 1 – 10cm	0,100	0,1000	0,0000	0%	0,0965	0,0035	-4%
Comprimento da mira 1 – 1cm	0,010	0,0092	0,0008	8%	0,0099	0,0001	-1%
Comprimento da mira 2 – 1m	1,000	1,0000	0,0000	0%	0,9800	0,0200	-2%
Comprimento da mira 2 – 10 cm	0,100	0,1000	0,0000	0%	0,0932	0,0068	-7%
Comprimentos da mira 2 – 1cm	0,010	0,0091	0,0009	9%	0,0096	0,0004	-4%
Largura da mira	0,053	0,0498	0,0032	6%	0,0503	0,0027	-5%
Profundidade da mira	0,032	0,0300	0,0020	6%	0,0303	0,0017	-5%
Profundidade da Cova	0,059	0,0555	0,0030	5%	0,0507	0,0078	13%
Tampa de saneamento	0,600	0,6000	0,0000	0%	0,5960	0,0040	-1%

### 4.3 Determinação do estado do pavimento

#### 4.3.1 Determinação do *Present Serviceability Index (PSI)*

O PSI do pavimento analisado foi determinado a partir da expressão (1). As áreas e comprimentos das degradações identificadas foram determinadas pela medição das degradações no modelo 3D.

A tampa de saneamento presente no trecho inspecionado foi considerada como uma reparação de nível de gravidade elevado, uma vez que o pavimento ao redor desta se encontrava bastante degradado. O trecho foi dividido em 11 perfis transversais cuja variação altimétrica foi determinada no Agisoft Viewer. Após análise detalhada de cada um dos perfis concluiu-se a não existência de rodeiras. Foram encontradas quadro tipos de degradações: fendilhamento com os níveis de

gravidade baixo, médio e elevado, pele de crocodilo com o nível de gravidade elevado, covas com os níveis de gravidade baixo, médio e elevado e reparações com o nível de gravidade elevado. As degradações foram identificadas tendo como base o catálogo de degradações usado na rede rodoviária de Lisboa (SANTOS, 2002). De seguida foram calculadas as áreas Ct (fendilhamento e pele de crocodilo), St (covas e peladas) e Pt (reparações), e determinadas as respetivas percentagens conforme o valor da área total do pavimento analisado. A análise dos níveis de gravidade das degradações fendilhamento, pele de crocodilo, covas e rodeiras, permitiu concluir, utilizando as orientações propostas em (MAGANINHO, 2013), que a irregularidade longitudinal do trecho pode ser considerada de nível de gravidade médio, correspondendo a um IRI de 3500mm/km.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos na medição das degradações e no cálculo do PSI. Como pode ser observado, os valores de PSI obtidos a partir das imagens captadas a 3m e 20m são muito próximos.

**Tabela 3 – Valores obtidos na medição das degradações no cálculo do PSI.**

Degradações	PSI 3D – 3m		PSI 3D – 20m	
	Área total degradada (m <sup>2</sup> )	Área total degradada (%)	Área total degradada (m <sup>2</sup> )	Área total degradada (%)
Ct	167,051	93,210	157,010	87,607
St	0,203	0,113	0,194	0,108
Pt	0,671	0,374	0,654	0,365
(Ct+St+Pt)	93,698		88,080	
R (mm)	0,000		0,000	
IRI (mm/km)	3500		3500	
PSI	1,951		2,012	

#### 4.3.2. Determinação do *Pavement Condition Index* (PCI)

Para o cálculo do PCI foi utilizado o procedimento descrito na norma ASTM D6433-18. O trecho estudado possui degradações com níveis de gravidade baixo, médio e elevado. Foram encontrados quatro tipos de degradações: fendilhamento com níveis de gravidade baixo e médio, pele de crocodilo com níveis de gravidade médio e elevado, covas com níveis de gravidade baixo, médio e elevado e reparações com nível de gravidade elevado. As características geométricas das degradações foram medidas nos modelos 3D. Para o caso da degradação do tipo rodeira, o procedimento usado foi o mesmo que o descrito na secção anterior, pelo que foi considerado que o trecho não apresenta rodeiras.

A tabela 4 apresenta um resumo dos valores das densidades de degradação e dos PCI calculados a partir das medições efetuadas nos modelos 3D-3m e 3D-20m.

**Tabela 4 – Valores para o cálculo do PCI no modelo 3D – 3m.**

Degradações e níveis de gravidade	PCI 3D – 3m		PCI 3D – 20m	
	Quantidade Total	Densidade (%)	Quantidade Total	Densidade (%)
Fendilhamento (baixo) (m)	5,220	2,913	3,090	1,724
Fendilhamento (médio) (m)	7,400	4,129	6,070	3,387
Pele de crocodilo (médio) (m <sup>2</sup> )	35,473	19,793	34,192	19,078
Pele de crocodilo (elevado) (m <sup>2</sup> )	96,389	53,782	93,532	52,188
Cova (baixo) (unidade)	3	1,674	3	1,674
Cova (médio) (unidade)	1	0,558	1	0,558
Cova (elevado) (unidade)	3	1,674	3	1,674
Reparação (elevado) (m <sup>2</sup> )	0,574	0,320	0,569	0,317
CDV máx	94,80		94,40	
PCI final	5		6	

Os resultados de PCI obtidos a partir da informação retirada das imagens captadas às duas alturas de voo, também neste caso, são muito similares.

#### **4.4 Análise e discussão de resultados**

Os resultados obtidos nas medições das características geométricas das degradações e para os índices PSI e PCI foram comparados e analisados para avaliação da viabilidade da realização de inspeções da superfície de pavimentos rodoviários com VANT a 20m de altura. A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos, assim como a variação e o erro relativo para as medições efetuadas no modelo 3D-20m relativamente às medições efetuadas no modelo 3D-3m e para os índices PSI e PCI.



**Tabela 5 – Comparação das medições das degradações superficiais e dos índices PSI e PCI**

Degradações		Nível de gravidade	Medição no modelo 3D – 3m (m <sup>2</sup> )	Medição no modelo 3D – 20m (m <sup>2</sup> )	Variação (m <sup>2</sup> )	Erro relativo (%)	
PSI	Fendilhamento	Baixo	0,620	0,090	0,530	-85,484	
		Médio	7,440	4,200	3,240	-44,548	
		Elevado	27,489	24,354	3,135	-11,405	
	Pele de crocodilo	Elevado	131,502	128,366	3,136	-2,385	
	Covas	Baixo	0,006	0,006	0,001	12,404	
		Médio	0,144	0,138	-0,005	-3,648	
		Elevado	0,054	0,049	-0,005	-9,425	
	Reparações	Elevado	0,671	0,654	-0,017	-2,566	
	IRI	Médio	3500	3500	0,000	0,000	<b>Erro relativo (%) 0 - 5</b>
PSI	-	1,951	2,012	0,062	3,172	1,238	
PCI	Fendilhamento	Baixo	5,220	3,090	2,130	-41,805	
		Médio	7,400	6,070	1,330	-17,973	
	Pele de crocodilo	Médio	35,473	34,192	-1,281	-3,611	
		Elevado	96,000	94,000	-2,000	-2,083	
	Covas	Baixo	3	3	0,000	0,000	
		Médio	1	1	0,000	0,000	
		Elevado	3	3	0,000	0,000	
	Reparações	Elevado	0,574	0,569	-0,006	-0,967	<b>Erro relativo (%) 0 - 100</b>
PCI	-	5	6	1	20,000	1,000	

\* Para o caso da degradação do tipo cova é registado o número de covas identificadas em cada nível de gravidade.

Da análise dos valores apresentados na tabela 5 é possível verificar que as imagens captadas a uma altura de 20m apresentam maior dificuldade na identificação de degradações com nível de gravidade baixo. No entanto, essas diferenças, para o trecho analisado, representam pouca variação na determinação do PSI, apresentando um erro relativo de apenas 1,238% na escala de medição do índice, quando comparado com o PSI obtido a partir das medições efetuadas no modelo 3D-3m.

Para o índice PCI verificam-se variações pequenas nas medições obtidas para as degradações para as duas alturas de voo. Como o valor do PCI varia entre 0 e 100, o erro relativo do índice é de apenas 1%.

Da análise feita é possível verificar que a variação entre os valores de PSI e PCI obtidos a partir da informação recolhida para as alturas de voo de 3m e 20m é reduzida. Conclui-se, portanto, que apesar dos dados

recolhidos a 3m serem mais precisos, é possível considerar uma altura de voo de 20m para a inspeção de pavimentos rodoviários com a utilização de VANT. A validação desta abordagem apresenta as seguintes vantagens: realização de voos automáticos; menor tempo de inspeção; maior área inspecionada por passagem do VANT; segurança das operações de inspeção (pelo menor número de obstáculos existentes a 20m); e operações de inspeção sem interrupção do trânsito sempre que não existam obstáculos nas bermas da estrada, possibilitando realizar a captação das imagens a partir das bermas em fotografia oblíqua próxima da vertical.

## **5 CONCLUSÕES**

Manter os pavimentos num estado de conservação adequado é importante para garantir a qualidade de circulação e a segurança dos utentes e veículos que os utilizam. Para este fim são realizadas inspeções visuais para avaliar o estado da sua superfície de modo a determinar o grau de deterioração do pavimento, e em função deste, a necessidade de efetuar intervenções de reparação ou reconstrução.

A aplicação de conceitos de geomática associados a utilização da tecnologia VANT vem sendo cada vez mais aplicada no campo da inspeção de pavimentos rodoviários e tratamento de dados, apresentando resultados satisfatórios. De entre as vantagens da sua utilização destacam-se os custos mais acessíveis e tempos mais reduzidos de inspeção, quando comparados com a utilização de veículos terrestres multifuncionais e inspeções realizadas a pé. Apresentam também uma alta flexibilidade, fácil manobrabilidade e um menor impacto no ambiente comparativamente às outras técnicas de inspeção. Possibilitam também a construção de modelos 3D a partir das imagens recolhidas, que permite a análise posterior dos dados obtidos nas mesmas condições existentes no momento do levantamento. No entanto, existem algumas desvantagens na sua utilização, como a perda de precisão nas medições efetuadas em imagens captadas a alturas de voo mais elevadas, que dificultam a visualização dos níveis de gravidade baixos das degradações; a autonomia de voo limitada, que pode requerer interrupções ao longo das operações de inspeção; e a necessidade de se verificarem condições climáticas favoráveis, pois não se recomenda a sua operação em circunstâncias de temperaturas extremas, chuva ou neve, ventos fortes ou nuvens de poeira.

No que respeita à análise de dados recolhidos com recurso a VANT, a revisão bibliográfica revelou que existem várias técnicas de processamento e classificação automática. Geralmente são construídos modelos 3D com recurso à fotogrametria e técnicas de processamento como o SfM. Como técnicas de classificação automática são utilizados algoritmos como o YOLO, RF, ANN e KNN, que apresentam bons níveis de precisão na classificação das degradações.

No que respeita ao caso de estudo, as variações percentuais verificadas na comparação das medições efetuadas nos modelos 3D-3m e 3D-20m apresentam valores satisfatórios, correspondendo a 0 a 9% nas medições planimétricas para dados recolhidos a 3m de altura e de 0 a 5% para 20m, 5 a 6% para medições em profundidade para 3m e 5 a 13% para 20m, o que permitiu verificar a precisão do modelo e validar a sua utilização para a extração de medições das degradações identificadas. Da análise comparativa dos índices de qualidade verifica-se um erro relativo na escala de medição do índice 1,238% para o PSI e de 1,000% para o PCI, e que o pavimento da secção da estrada analisada se encontra em mau estado e deve ser reconstruído.

Tendo em conta os resultados obtidos, é possível concluir que, apesar das medições realizadas no modelo construído a partir de imagens captadas a 3m de altura serem mais detalhadas, o modelo 3D construído com imagens captadas a 20m se mostra completamente capaz na determinação dos índices de qualidade do pavimento. As inspeções com alturas de voo maiores permitem que os voos sejam efetuados de forma automática, o que reduz o tempo de trabalho de campo e permite melhores condições de segurança para utentes, veículos e outros bens que estejam na estrada. Para trabalhos futuros sugere-se o estudo de uma área maior de pavimento que inclua vários trechos, permitindo uma abordagem estatística de comparação de resultados e de determinação de erros mais sustentada. Sugere-se ainda a análise de dados recolhidos a alturas de voo intermédias, nomeadamente de 10m e 15m, assim como alturas de voos maiores, como 30m, bem como a análise de modelos gerados com imagens captadas fora da vertical do pavimento.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Universidade de Investigação GeoBioTec, através dos projetos estratégicos e UIDB/04035/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04035/2020>) e UIDP/04035/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/04035/2020>) financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, IP/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC).

## REFERENCES

- ASTM D6433 - 18. Designation: D6433 – 18 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys 1. 2018.
- BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos Rodoviários**. Edições Almeida, SA. ed. Coimbra: v. 3, 2008.
- CONGRESS, S., et al. Assessment of Pavement Geometric Characteristics Using UAV - CRP Data. 2021.
- GARILLI, E. et al. Automatic detection of stone pavement's pattern based on UAV photogrammetry. **Automation in Construction**, v. 122, n. December 2020, p. 103477, 2020.

HUANG, H. et al. A Robust Pavement Mapping System Based on Normal-Constrained Stereo Visual Odometry. 29 out. 2019.

KAAMIN, M. et al. **Unmanned Aerial Vehicle Technology Use in Visual Road Inspection at Ft005, Johor Bahru-Melaka***International Journal of Nanoelectronics and Materials*. *International Journal of Nanoelectronics and Material*. V. 15, p. 37-48, 2022.

MAGANINHO, L. **Desenvolvimento de uma base de dados de patologias para a avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso a GPS, imagem vídeo e SIG**. Covilhã, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.6/3483>>. Acesso em: 4 set. 2024.

MASLAN, J.; CICMANEC, L. **Setting the Flight Parameters of an Unmanned Aircraft for Distress Detection on the Concrete Runway**. 2021 8th International Conference on Military Technologies, ICMT 2021 - Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 8 jun. 2021.

NAPPO, N. et al. Use of UAV-based photogrammetry products for semi-automatic detection and classification of asphalt road damage in landslide-affected areas. **Engineering Geology**, v. 294, 5 dez. 2021.

PAN, Y. et al. **Object-based and supervised detection of potholes and cracks from the pavement images acquired by UAV**. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 26 set. 2017.

PAN, Y. et al. Detection of Asphalt Pavement Potholes and Cracks Based on the Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 10, p. 3701–3712, 2018.

RAGNOLI, A.; DE BLASIS, M. R.; DI BENEDETTO, A. **Pavement distress detection methods: A review**. **Infrastructures**. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 19 dez. 2018.

ROBERTS, R.; INZERILLO, L.; DI MINO, G. Exploiting low-cost 3D imagery for the purposes of detecting and analyzing pavement distresses. **Infrastructures**, v. 5, n. 1, 14 jan. 2020.

ROMERO-CHAMBI, E. et al. Analysis of optimal flight parameters of unmanned aerial vehicles (UAVs) for detecting potholes in pavements. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 12, p. 1–33, 1 jun. 2020.

SANTOS, B. **Implementação de um Sistema de Gestão da Conservação de Pavimentos Rodoviários para a Cidade de Lisboa**. Coimbra, 2002.

SILVA, L. A. et al. An architectural multi-agent system for a pavement monitoring system with pothole recognition in uav images. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 21, p. 1–23, 1 nov. 2020.

TAN, Y.; LI, Y. UAV photogrammetry-based 3D road distress detection. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 9, 12 set. 2019.

WANG, Y.; HUANG, Y.; HUANG, W. Crack junction detection in pavement image using correlation structure analysis and iterative tensor voting. **IEEE Access**, v. 7, p. 138094–138109, 2019.

ZHANG, S. et al. Characterizing pavement surface distress conditions with hyper-spatial resolution natural color aerial photography. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.

ZHONG, J. et al. Multi-scale feature fusion network for pixel-level pavement distress detection. **Automation in Construction**, v. 141, 1 set. 2022.

ZHU, J. et al. Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. **Automation in Construction**, v. 133, 1 jan. 2021.



## **POST-OCCUPANCY EVALUATION OF FIVE CASE STUDIES ON THERMAL COMFORT: EVALUATION AND ANALYSIS OF BEDROOM VS. LIVING ROOM**

NETO, MARIANA (1); PINTO, ARMANDO (2); SILVA, CARLOS A. (3)

**(1) LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, E-MAIL:  
MRNETO@LNEC.PT**

**(2) LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, E-MAIL:  
APINTO@LNEC.PT**

**(3) INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, E-MAIL:  
CARLOS.SANTOS.SILVA@TECNICO.ULISBOA.PT**

### **ABSTRACT**

*Indoor building environments influence people's comfort and well-being. These concepts are increasingly being studied holistically, and some methods exist for their study, such as post-occupancy evaluation and sensor measurements. The current study presents the results obtained from five homes using a survey and air temperature measurements in winter and summer. This study aims to verify if there are significant differences in temperature in the main bedroom and the living room and to understand whether the occupants' perception of the indoor thermal comfort in these rooms is the same. It is also discussed whether measuring the air temperature in the two rooms is relevant, considering the answers obtained by the survey and which range of air measurements is relevant for the analysis. The study concludes that occupant perception of the bedroom and the living room thermal sensation does not always coincide in all the case studies despite the recorded temperatures not being significantly different between the rooms. Occupants indicate different perceptions of similar measured temperatures, and the relationship between measured temperature and occupant perception is complex to study since people's perceptions are subjective. The measurement intervals more relevant to this study are the time window for answering the survey and the closest hour the occupants answered the survey.*

**Keywords:** *Comfort, Well-being, POE, Experimental methodology.*

### **RESUMO**

Os ambientes interiores dos edifícios influenciam o conforto e o bem-estar das pessoas. Estes conceitos estão a ser cada vez mais estudados de forma holística, existindo alguns métodos para os estudar, como a avaliação pós-ocupação e medições através de sensores. O presente

estudo apresenta os resultados obtidos em cinco habitações através da implementação de um questionário e de medições da temperatura do ar no inverno e no verão. Este estudo tem como objetivo verificar se existem diferenças significativas de temperatura no quarto principal e na sala de estar e perceber se a percepção dos ocupantes do conforto térmico interior nestes compartimentos da sua habitação é a mesma. É também discutido se a medição da temperatura do ar nos dois compartimentos é relevante, tendo em conta as respostas obtidas pelo questionário e qual a gama de medições do ar é relevante para a análise. O estudo conclui que a percepção dos ocupantes da sensação térmica do quarto e da sala de estar nem sempre coincide em todos os estudos de caso, apesar de as temperaturas registadas não serem significativamente diferentes entre os compartimentos. Os ocupantes indicam percepções diferentes para temperaturas medidas semelhantes, e a relação entre a temperatura medida e a percepção dos ocupantes é complexa de estudar, uma vez que as percepções das pessoas são subjectivas. Os intervalos de medição mais relevantes para este estudo são a janela de tempo para responder ao questionário e a hora mais próxima em que os ocupantes responderam ao questionário.

**Palavras-chave:** Conforto, Bem-estar, Metodologia experimental.

## 1 INTRODUCTION

People spend much of their time inside buildings. The building's indoor environment influences the comfort, productivity, health and well-being of occupants (BRAGER; ZHANG; ARENS, 2015)(ANDARGIE; TOUCHIE; O'BRIEN, 2019)(PISELLO et al., 2021)(ALHARR et al., 2016). The concepts of comfort, well-being, and quality of life in buildings have become relevant (PINTO et al., 2017). Commonly, comfort and well-being are used interchangeably and are presented as concepts related to the quality of life (PINTO et al., 2017). Current research and standards have mainly focused on establishing acceptable ranges of indoor environmental conditions to provide comfort (thermal, air quality, light, and acoustics). Acceptable indoor climates are essential to the success of a building, not only in making it comfortable but also in deciding its energy consumption and ensuring its sustainability (NICOL; HUMPHREYS, 2002).

Comfort sensation/perception/evaluation results from the interaction between the environmental and physiological conditions, the occupants' perception of psychological, social and cultural conditions/rights, architecture, clothing, eating habits and climate (FABBRI, 2015). Occupant comfort depends on personal variables and is defined by an absence of unpleasant sensations, thus positively affecting well-being and is highly subjective (ALHARR et al., 2016). It is complex, defining and achieving comfort because it responds to the physical state created by the combined effect of the environment's physical characteristics. Well-being consists of physical, mental and social factors, and overall satisfaction (ŠUJANOVÁ et al., 2019), positive psychological experiences that occur in life and reflect an individual's good psychological

functioning (GASPAR, 2011). It relates to concepts of happiness, positive experiences or ideas, life satisfaction, pleasure, and prosperity (LAMBERT; PASSMORE; HOLDER, 2015)(COELHO DO VALE; MOREIRA, 2016). Well-being is broader than comfort and refers to a neutral, durable, basic, relaxed, or pleasant state (ZITARS et al., 2021).

To evaluate comfort and well-being, besides personal aspects that condition this evaluation, there are different aspects and variables of comfort and well-being that must be taken into account, namely thermal comfort, acoustics, air quality, lighting (ORTIZ; KURVERS; BLUYSSSEN, 2017)(MONIKA; WARGOCKI, 2011) (MATEUS, R.; PINTO, A; PEREIRA, J. M.C, 2024)(PISELLO et al., 2021) and space-functional aspects (PASTORE; ANDERSEN, 2019)(UC DAVIS - STUDENT COMMUNITY CENTER, 2014)(MANGAN et al., 2020) (MATEUS, R.; PINTO, A; PEREIRA, J. M.C, 2024a). The factors related to the architecture and construction of buildings must also be considered since they influence the comfort and well-being felt indoors and the occupants' ability to adapt (MONIKA; WARGOCKI, 2011). Comfort and well-being are interconnected, broad and deep phenomena of a subjective nature. Also, they had contextual dynamism since they were influenced by multiple factors.

Comfort, well-being, productivity, preferences and behaviour of the occupants can be known through post-occupancy evaluation (RANDALL; CORP; SELF, 2014)(PAONE; BACHER, 2018)(HOXHA; LIARDET; JUSSELME, 2020)(DUARTE ROA; SCHIAVON; PARKINSON, 2020)(LI; FROESE; BRAGER, 2018) combined with sensor measurements (ALHORR et al., 2016)(ZHANG; ZHANG; KHAN, 2019)(WILLEMS; SAELENS; HEYLIGHEN, 2020)(KO et al., 2020). Post-occupancy evaluation (POE) evaluates buildings after being constructed and occupied (RASHEED; BYRD, 2018)(GONZALEZ-CACERES; BOBADILLA; KARLSHØJ, 2019). This evaluation aims to understand how the building functions, whether it meets the occupants' needs, whether it is satisfactory from the occupant's perspective and whether the comfort goals are achieved (ALHORR et al., 2016)(UK GREEN BUILDING COUNCIL, 2016). It is a general approach to obtain feedback about a building's performance in use, including energy performance, indoor environment quality, occupants' satisfaction, productivity, and others (LI; FROESE; BRAGER, 2018). POE also permits the discovery of solutions to detected problems, highlights what should be repeated and avoided, and disseminates design guidelines to improve future projects (GONZALEZ-CACERES; BOBADILLA; KARLSHØJ, 2019). This evaluation uses three sources for data collection: occupant feedback through questionnaires and interviews, billing and measurement collection, and measurement of indoor environmental conditions (ALHORR et al., 2016)(JONES; GOODHEW; DE WILDE, 2016).

Interviews and questionnaires are methods of gathering information by asking occupants questions (ALHORR et al., 2016)(PAONE; BACHER, 2018)(ANDARGIE; TOUCHIE; O'BRIEN, 2019). Interviews are used in a detailed study where the sample is very low, while surveys collect information remotely from multiple participants. Surveys are widely used



to obtain information by sending a questionnaire to multiple people (ALHARR et al., 2016). Depending on the type of study, long-term or right-now evaluations can be applied (WILLEMS; SAELENS; HEYLIGHEN, 2020)(LI; FROESE; BRAGER, 2018). Point-in-time or right-now surveys should be required during the representative time of the building's occupancy. It may also be relevant to conduct the survey during the two periods of the year when the environmental conditions are more disparate to ascertain the level of satisfaction with the indoor environment during the two seasons (summer and winter) (PASTORE; ANDERSEN, 2019)(ZHANG; ZHANG; KHAN, 2019)(PAZHOOHESH; ZHANG, 2018)(RUPP et al., 2018)(ASHRAE, 2017). Other authors apply surveys on weekdays for about two months (DUARTE ROA; SCHIAVON; PARKINSON, 2020), while others occur over a month (KO et al., 2020) or even 4 years (RIJAL; HUMPHREYS; NICOL, 2019).

Interviews and surveys can include personal questions since they can affect the comfort and well-being of the occupants (ALHARR et al., 2016)(ZHANG; ZHANG; KHAN, 2019)(DUARTE ROA; SCHIAVON; PARKINSON, 2020)(RUPP et al., 2018)(PASTORE; ANDERSEN, 2019)(ORNSTEIN, 1995). This data can be requested at the beginning or end of the survey. However, answering at the end may help avoid conditional answers (SANT'ANNA et al., 2018). Other questions should be present in the survey to allow the evaluation of the comfort and well-being parameters. It is crucial to have a well-planned communication approach and to use an optimised survey regarding duration and content (ASHRAE, 2017). Different surveys that evaluate satisfaction, comfort, and well-being are available and can be applied to residential buildings and/or commercial and service buildings. Several building standards and surveys/questionnaires focus on energy consumption and occupant comfort (ALHARR et al., 2016). These surveys developed by organisations and/or presented in norms and scientific articles that evaluate comfort and well-being contributed to developing the survey intended to apply in this study.

Devices and sensors are used to measure indoor environmental conditions. Sometimes, they are already integrated into buildings (ALHARR et al., 2016), but in other cases, sensors are used and placed in the spaces to be studied. Measuring the indoor environmental conditions of the building can be done with many types of sensors. Usually, is used humidity and temperature sensors (PAZHOOHESH; ZHANG, 2018)(DUARTE ROA; SCHIAVON; PARKINSON, 2020)(RUPP et al., 2018)(STOPPS; TOUCHIE, 2020)(RIJAL; HUMPHREYS; NICOL, 2019) and sensors that detect different indoor gases (ALHARR et al., 2016)(PASTORE; ANDERSEN, 2019)(ELNAKLAH; WALKER; NATARAJAN, 2021)(LI; FROESE; BRAGER, 2018). Sensors for lighting and acoustics can also be used (LI; FROESE; BRAGER, 2018), and to obtain external data, it is from a meteorological station near the study (RIJAL; HUMPHREYS; NICOL, 2019)(RUPP et al., 2018) or using proper sensors. The period of measurements was typically every 5 minutes (ALHARR et al., 2016)(JONES; GOODHEW; DE WILDE, 2016)(PASTORE; ANDERSEN, 2019)(ASHRAE, 2017). It is also important to say that the sensors/loggers

should be sited away from heat sources and direct sunlight (JONES; GOODHEW; DE WILDE, 2016)(DARTEVELLE et al., 2021).

The Appendix Table summarises the comfort and well-being parameters and the methods of measuring and obtaining data from the bibliographic studies consulted on housing. Generally, a survey is the most commonly used method for obtaining feedback from occupants. Sensors are also widely used to extract data from the indoor environment. However, the way in which these methods are applied, the size, the type of questions, the scale of assessment and the frequency with which it is applied varies significantly depending on the type of study.

## **2 PROBLEM STATEMENT AND CONTRIBUTIONS**

This paper will mention comfort and well-being when it pretends to refer to concepts of comfort, well-being, satisfaction and perception of occupants about the indoor environment. This study presents part of a more extensive study, which is under development, that aims to develop a holistic method for assessing comfort and well-being in its multiple aspects and its relationship with the energy efficiency of buildings. This more extensive study uses a methodology in which two types of survey are used for two different but complementary analyses: the right-now survey to assess comfort and well-being in the main bedroom and living room but with a focus on thermal comfort; the extensive survey to take a general approach to the dwelling in terms of the different comfort parameters (personal aspects, thermal comfort, acoustics, indoor air quality, lighting, functional space and architecture and construction aspects). This methodology also carries out measurements of the indoor environment and energy simulation of the case studies buildings.

That said, the current research aims to present part of the methodology applied in the more extensive study. This study presents and explores the results obtained using the right now survey and the indoor environment measurements in winter and summer and aims to verify:

- Whether people's perception of the indoor environment differs between the living room and the bedroom;
- Whether it is relevant to measure the temperature of the air in the bedroom and living room, taking into account the answers obtained by the right now survey;
- Whether people's perception of comfort and well-being in the indoor environment is different in the year's more extreme/cooler seasons;
- Which range of measurements of the indoor environment is relevant for the analysis of the two points above (all day, 9 p.m.-12 a.m., the time closest to when they answered the survey);
- Relationship between measured indoor temperature and people's perception.

Generally, this current study intends to determine whether there are significant differences in temperature in the main bedroom and the living room and to understand whether the occupants' perception of the indoor environment in these two rooms is the same or different. The living room and bedroom are typically where people spend the most time in a home and seek to feel comfortable and have a sense of well-being.

### **3 METHODOLOGY**

#### **3.1 Data collection**

The right-now survey and the respective monitoring of indoor environmental parameters lasted two weeks and did not occur simultaneously in all the case studies due to the geographical location of the case studies and for reasons related to the amount of equipment available. This methodology was applied to 5 homes in Portugal.

The right-now survey is quick to complete and focuses essentially on one aspect of comfort: thermal comfort. It addresses questions relating to the bedroom and living room when the occupant fills out the survey and throughout the day. The key questions in this survey are thermal sensation and perceived discomfort when the person is filling out the survey. The occupants answered this survey every day from 9 p.m. for two continuous weeks. This survey was applied at two different times: two weeks in winter and two weeks in summer. The right-now survey can be found in the Appendix. It is mandatory to answer all the questions, and there is no anonymity since the goal is to study a specific house and a specific occupant. Only one person answered for each dwelling because these are dwellings where only one person lives permanently.

At the same time as this right-now survey, measurements were taken of the indoor environment to compare the answers given with the temperature values recorded during the day and night in the living room and in the main bedroom of each case study. The values were recorded every 5 minutes.

#### **3.2 Case studies**

In this study, 5 case studies were selected to apply the presented methodology. They are all residential buildings in Portugal, some apartments, others villas. The climatic zones and the characteristics of the construction and systems vary. The occupants of these dwellings have lived there for at least a year, and their ages range from 28 to 80 years old.

The intention was to ensure diversity in terms of the occupant's profile, the building characteristics, and the use of the dwelling since the aim was to test the method developed with different inputs, homogeneity and generalisation are not of interest in this study because it is not intended to study relationships or correlations between certain characteristics of the occupants and/or the dwelling. Statistical validation is not the aim of this study. This study aims to respond to each case's different needs and

specific characteristics, i.e., housing and occupants. Table 1 describes the various case studies.

**Table 1 - Case studies characteristics**

Case study	Climate zone	Construction year	Envelope characteristics		Energy systems	
			Opaque	Glazed	Heating	Cooling
1	I1;V2	2000	Double brick wall with air gap and insulation and inclined reinforced concrete roof	Simple double-glazed windows with metal frames	Electric	-
2	I1;V2	2000	Double brick wall with air gap and insulation and inclined reinforced concrete roof with insulation	Simple double-glazed windows with metal frames	Electric	Electric
3	I2;V1	2010/2011	Double brick wall with air gap and insulation and inclined reinforced concrete roof with lusa tiles	Simple double-glazed windows with metal frames	Biomass, electric	-
4	I1;V2	≈1960	Simple brick wall and inclined reinforced concrete roof with lusa tiles	Simple double-glazed windows with metal frames	Electric	-
5	I2;V1	≈1960	Simple brick wall and inclined reinforced concrete roof with lusa tiles	Simple single-glazed windows with wooden frames	Electric	-

## 4 RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1 Range of indoor environment measurements

As mentioned above, it was not possible to simultaneously measure the indoor environment in the five case studies. This fact must be taken into account when analysing the results obtained. Table 2 shows the bedroom mean temperature ( $T_B$ ), living room mean temperature ( $T_{LR}$ ), mean outdoor temperature ( $T_{Out}$ ) and the difference between the mean temperature values measured in the living room and outdoor ( $\Delta T$ ) during the period in which the right now survey was applied. Table 3 shows the bedroom ( $T_B$ ), living room ( $L_R$ ) and outdoor minimum and maximum temperatures recorded during the period in which the right now survey was applied.

Table 2 shows that during the application period of the right now survey, the difference in mean outdoor temperatures is not very significant, with a maximum of 2.5°C in winter and 3.5°C in summer ( $T_{Out}$ ). Table 3 also shows that the minimum outside temperatures in winter are similar, with a difference between them of 1.7 °C and the maximum with a difference of 3.4°C. In summer, these differences are 2.9 °C for minimum outside temperatures; for the maximum, the value is 8.1°C. In this sense, it is possible to compare the results obtained since the difference in the outside temperatures recorded is not very significant between cases. Although the difference between the maximum outside temperatures in summer is significant.

In winter, the difference in average living room and bedroom temperatures is 0.6°C in two cases, 0.5°C in another and less than 0.2°C in the others. In summer, this difference is 1°C in one case study, 0.5°C and 0.4°C in others and less than 0.2°C in the others. The temperature difference between the room and the outside ( $\Delta T$ ) in winter is less than 4°C in all case studies, and in summer, less than 2°C, as shown in Table 2.

**Table 2 – Mean indoor and outdoor measured temperatures during the right now survey [°C]**

Case study	Winter				Summer			
	$T_B$	$T_{LR}$	$T_{Out}$	$\Delta T$	$T_B$	$T_{LR}$	$T_{Out}$	$\Delta T$
1	17.5	16.9	13.1	3.8	25.2	24.7	26.2	1.5
2	18.4	19.0	15.6	3.4	24.2	25.2	23.2	2.0
3	16.5	17.0	13.4	3.6	23.3	23.2	22.7	0.5
4	16.2	16.1	13.5	2.6	26.5	26.3	26.2	0.1
5	16.5	16.3	15.2	1.1	24.9	24.5	24.0	0.5

**Table 3 - Measured minimum and maximum indoor and outdoor temperatures during the right now survey [°C]**

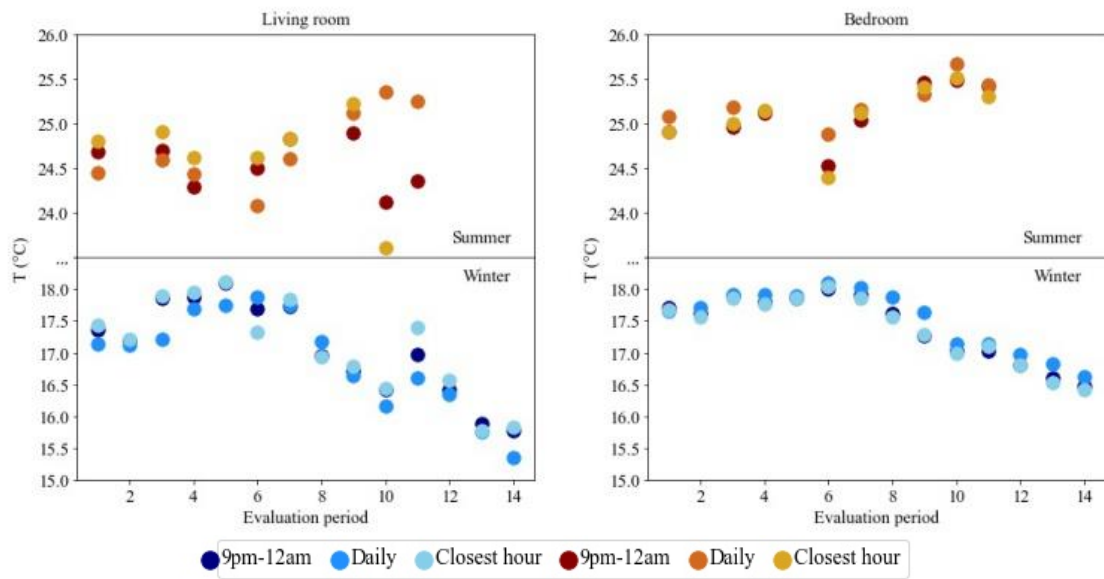
Case study	Winter						Summer					
	T min			T max			T min			T max		
	B	LR	Out	B	LR	Out	B	LR	Out	B	LR	Out
1	16.3	12.3	6.7	18.7	18.4	19.0	23.7	21.4	20.5	26.4	27.9	37.5
2	14.3	15.6	6.4	20.6	21.3	22.4	23.1	23.4	18.9	25.1	27.4	30.0
3	14.2	13.4	6.1	18.5	20.2	20.6	21.7	21.3	17.6	24.2	25.3	29.4
4	14.1	13.3	6.7	17.8	22.7	19.0	25.1	24.4	20.5	28.3	28.7	37.5
5	10.9	10.0	5.0	20.2	20.2	21.6	22.4	22.1	19.2	27.9	27.4	30.2

The living room and bedroom temperature values were recorded every 5 minutes. To process the data, it was found that there could be different time intervals that could be considered: during the time the occupants could answer the survey (9 p.m.-12 a.m.); throughout the day (Daily); at the time closest to when the occupant filled in the survey (Closest hour). By averaging the recorded indoor temperatures, graphical representations were obtained for each case study by compartment (living room and main bedroom) and by season (winter and summer), as shown in Figures 1 to 5. Some case studies do not have the 14 days of evaluation period (x-axis) completed as they did not answer the survey on that day.

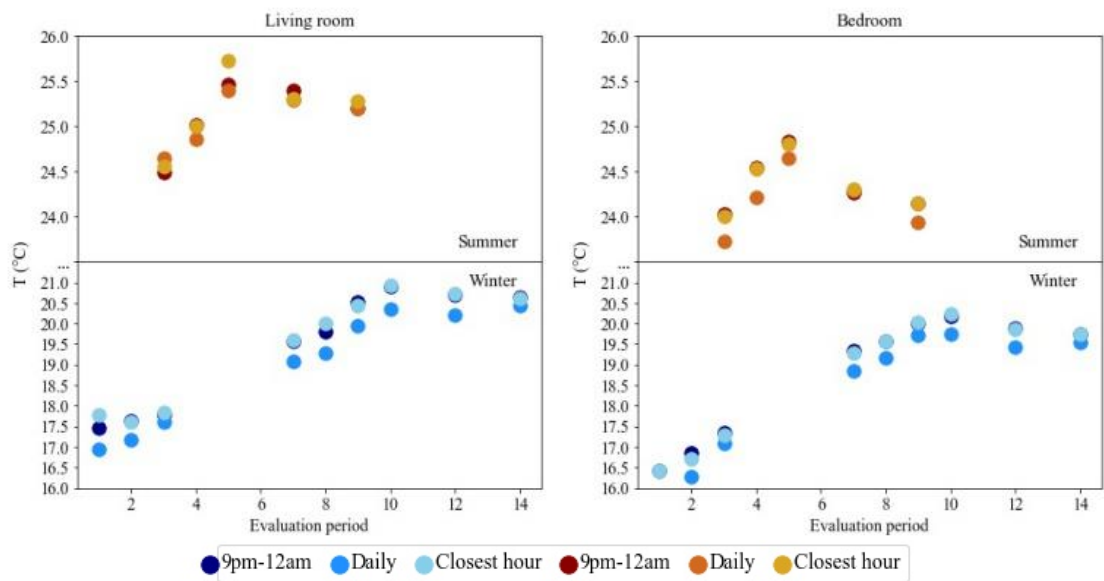
Both in summer and winter, the measurement intervals that have the closest values, in general, are between 9 a.m. and 12 p.m. and the closest hour the occupants answered the survey. On certain days when the occupants answered the survey, the daily values were closer to these two other intervals, but this happens less often. This analysis applies to all the case studies. The fact that the "daily" time interval is generally further away from the others may be because it is a longer interval (24 hours) and may not reflect the use of HVAC equipment (heating and cooling). It should also be noted that in most of the cases analysed, the difference in temperature between these three time intervals is around 0.5°/1° or less. In some cases, some days of the evaluation period have a greater difference and may reflect the use of air conditioning equipment or other actions carried out by the occupant.

Figures 1 to 5 show that the temperature profile of the three measurement periods in the living room does not always correspond to that of the bedroom in summer and winter. This is more evident in some of the case studies. However, as mentioned above in the analysis of Tables 2 and 3, when comparing the temperatures obtained from the measurements in the living room and the bedroom, it turns out that there are no significant differences in mean temperature in the main bedroom and the living room.

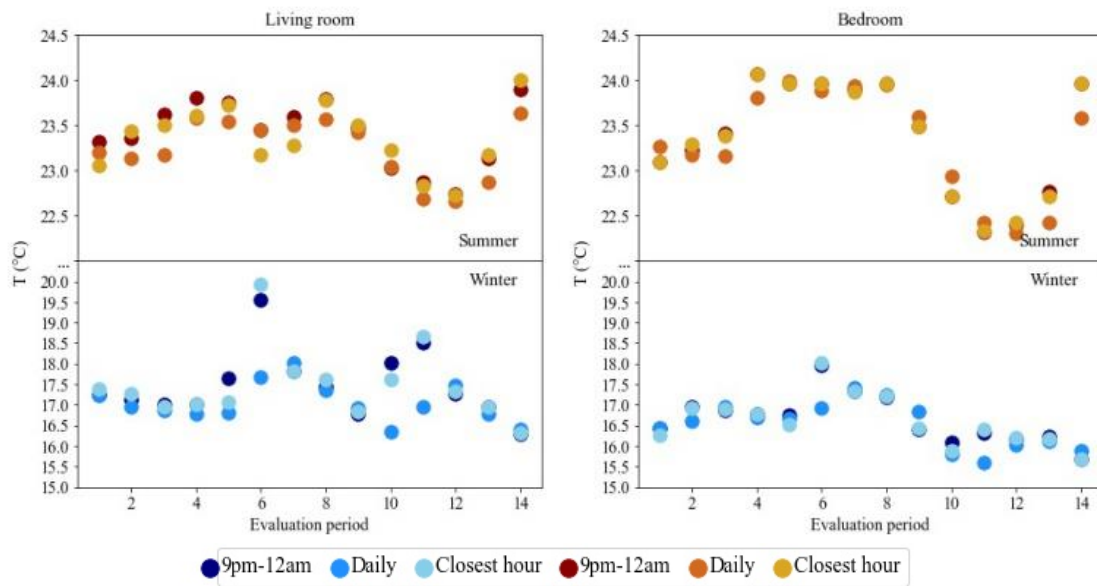
**Figure1 – Graphical representation of air temperature measurement intervals for each case study 1 by compartment and season**



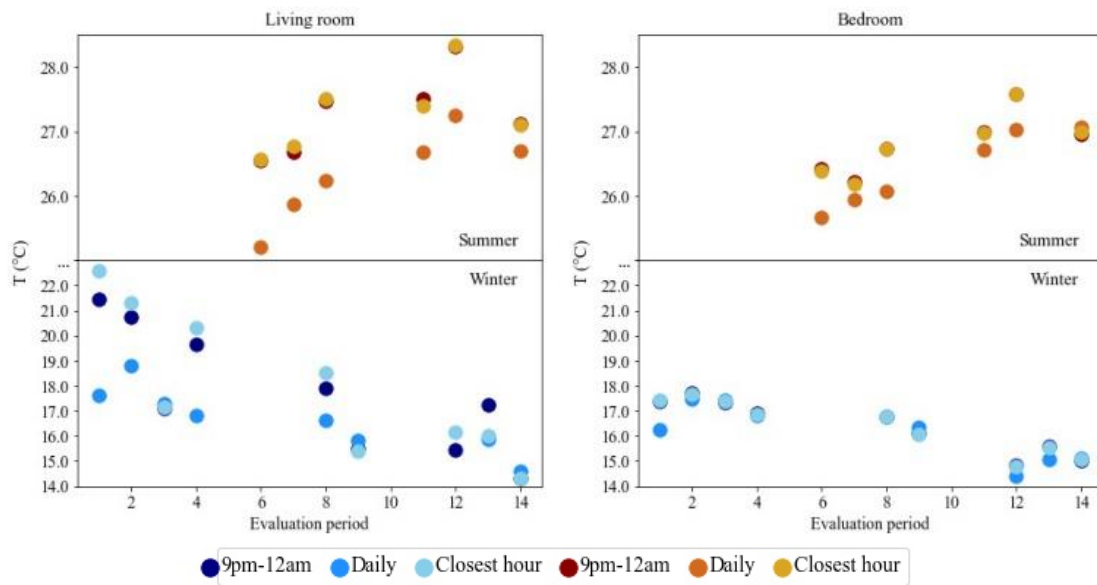
**Figure2 – Graphical representation of air temperature measurement intervals for each case study 2 by compartment and season**



**Figure3 – Graphical representation of air temperature measurement intervals for each case study 3 by compartment and season**

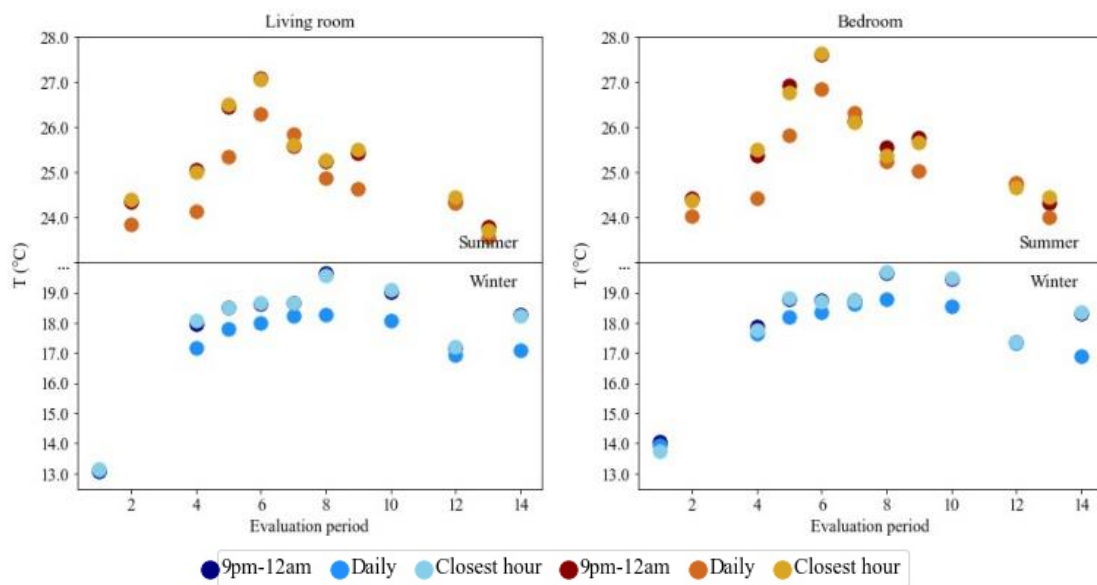


**Figure4 – Graphical representation of air temperature measurement intervals for each case study 4 by compartment and season**





**Figure5 – Graphical representation of air temperature measurement intervals for each case study 5 by compartment and season**



## 4.2 Measured indoor temperature and people's perception

Knowing that one of the intentions of this study is to understand whether the occupants' perception of the indoor environment in the living room and bedroom is the same or different, it is necessary to consider the measured temperatures and the responses obtained in the survey. The temperature closest to the time when the occupants started answering the survey (Closest hour) was the range measurement selected to perform this analysis. The occupant's response to the thermal sensation at that moment and thermal comfort or discomfort were the variables considered to be obtained for each case study, the graphical representation shown in Figures 6 to 10.

### 4.2.1 Relationship between measured indoor temperature and people's perception

In case study 1, it can be seen that the occupant always indicates being slightly cool in the living room in the winter. In contrast, the occupant indicates being comfortable only a few times in the bedroom. However, they never said they felt uncomfortable with the temperature. The temperatures recorded when the occupant started filling in the survey varied between 15.8°C and 18.1°C in the living room and bedroom. Note that the occupant indicates being slightly cool and comfortable in the bedroom at the same/similar temperatures. In the summer, the occupant indicates that they are always comfortable with recorded temperatures of 23.6°C to 25.5°C in the bedroom and living room.

In case study 2, it can be seen that the occupant in both winter and summer indicates that he is more often in the slightly cold and slightly warm room, respectively. In winter, he said he was always comfortable in

the living room, and in the bedroom, the occupant said that it was slightly cold and comfortable. The temperatures recorded when the occupant started filling in the survey varied between 16.4°C and 20.9°C in the living room and bedroom. Note that the occupant indicates being slightly cool and comfortable in the bedroom at the same/similar temperatures. In the summer, the occupant indicates that they are sometimes comfortable and sometimes slightly hot (more so in the bedroom), with temperatures recorded between 24.0°C and 25.7°C in the bedroom and living room. The occupant never said they felt uncomfortable with the living room and bedroom temperature.

In case study 3, it can be seen that the occupant indicates being slightly cold, slightly warm and comfortable in the living room in the winter. In the bedroom, he said he was slightly cool but more often comfortable. The temperatures recorded when the occupant started filling in the survey varied between 15.7°C and 19.9°C in the living room and bedroom. In the summer, the occupant indicates that he is more often comfortable and sometimes slightly hot, with recorded temperatures between 22.3°C and 24.1°C in the bedroom and living room. However, they never indicate feeling uncomfortable with the bedroom and living room temperature. It should also be noted that the occupant indicates being slightly cold, slightly warm and comfortable in the living room for the same/similar temperatures in winter and slightly warm and comfortable in the bedroom and living room in summer.

In case study 4, it can be seen that the occupant in winter indicates that the living room is slightly cold, slightly warm and comfortable. In the bedroom, they said they were slightly cold more often and comfortable once. Sometimes, the occupant indicated feeling uncomfortable in terms of temperature in the bedroom and the living room when they indicated feeling slightly cold and even when they indicated feeling comfortable. The temperatures recorded when the occupant started filling in the survey varied between 14.3°C and 22.6°C in the living room and bedroom. In summer, the occupant indicates that they are sometimes comfortable and sometimes slightly warm and hot in the living room and slightly warm and hot in the bedroom, with temperatures recorded between 26.2°C and 28.3°C in the bedroom and living room. It should also be noted that the occupant indicates being slightly cold and comfortable in the living room and bedroom for the same/similar temperatures in winter and slightly warm, hot and comfortable in the living room in summer.

Finally, in case study 5, it can be seen that in winter, the occupant indicates that the living room and bedroom are always comfortable, with temperatures recorded at the time the occupant started filling in the survey varying between 13.2°C and 19.7°C in the living room and bedroom. In the summer, the occupant indicated that they were always comfortable in the living room and mostly in the bedroom, although once they indicated that they were slightly warm. The temperatures recorded range from 23.7°C to 27.6°C in the bedroom and living room. It should also be noted that when the occupant says they are in the bedroom, they

report the same/similar temperatures in the winter and slightly warm, warm and comfortable in the living room in the summer.

By analysing the recorded temperature and the perception of the occupants, it can be seen that in the case studies analysed, the occupants indicate two different perceptions of the same temperature; that is, sometimes, it is comfortable, and other times indicates, for example, slightly cool/hot. It also happens in other cases, indicating that they feel comfortable at a higher/lower temperature, and at an intermediate temperature, they indicate that they feel, for example, slightly cold or warm. It can also be seen that in case study 4, for the question "Do you feel uncomfortable in terms of the temperature felt?" sometimes "yes" and sometimes "no" are said for the same perception. Therefore, this relationship between measured temperature and occupant perception is challenging to study and understand. However, this was expected since the literature already indicates that people's perception is subjective as it is affected by different variables (mood, experiences, among others).

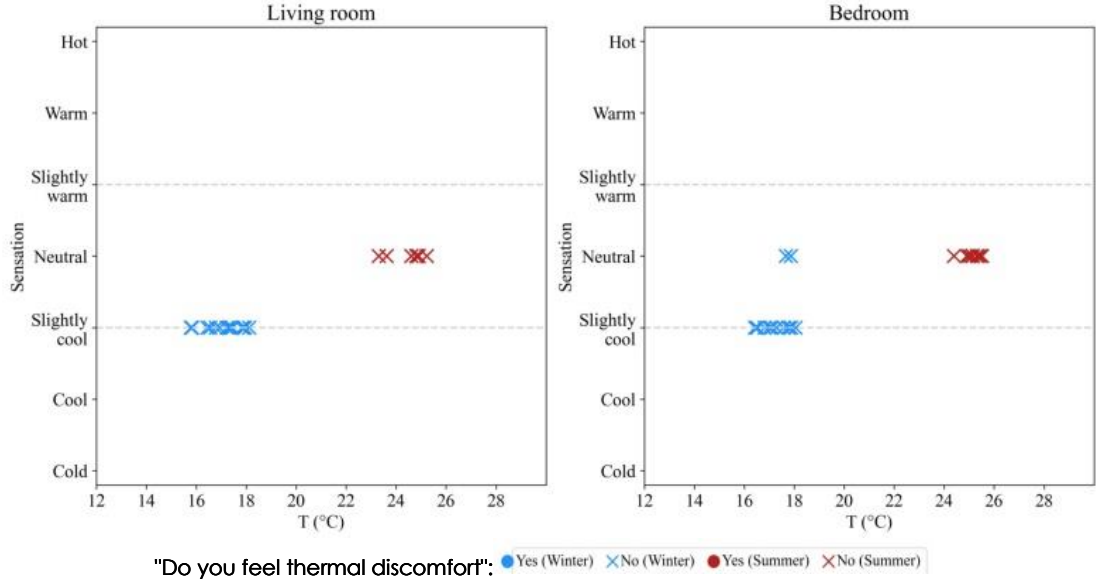
#### **4.2.2 People's perception of the indoor environment (living room vs bedroom) and air temperature measurements considering the right now survey**

When the perceptions obtained by the right-now survey are analysed between the bedroom and the living room, it can be seen that the perception of the thermal sensation felt in the living room and bedroom does not always coincide in all the case studies. This difference in responses occurs in the winter in case studies 1,2,3, and 4 and in the summer in case studies 2,3,4 and 5. Still, even when the recorded temperatures are analysed, there is no clear justification regarding the difference in temperature between the bedroom and the living room as to why these perceptions are different. Possible justifications could be that people's perceptions are influenced by their state of mind, their mood, their experiences, the way they have lived through the day and also the way they view their home. In other words, a person may have the intrinsic feeling that the bedroom is colder than the living room, or vice versa, and in fact, the temperature recorded does not show this.

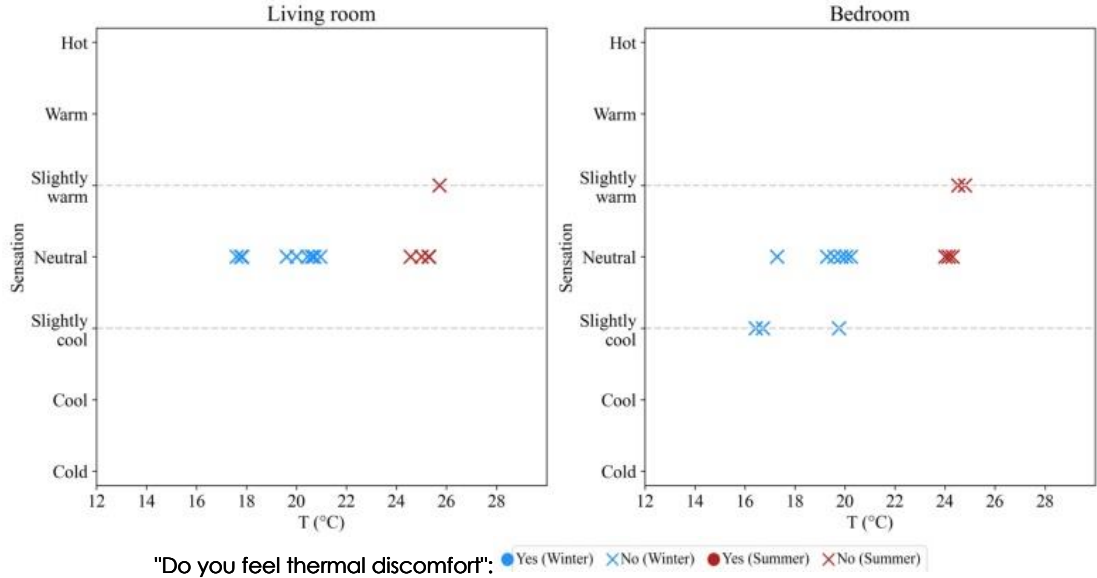
#### **4.2.3 People's perception of comfort and well-being in the indoor environment in the year's more extreme/cooler seasons**

Analysing the perception of comfort in terms of the temperature felt in the interior environment, from the data collected, it is impossible to say clearly whether the houses under analysis provide greater comfort or discomfort in summer or winter. However, in case study 1, it can be seen that the occupant feels more discomfort in winter than in summer.

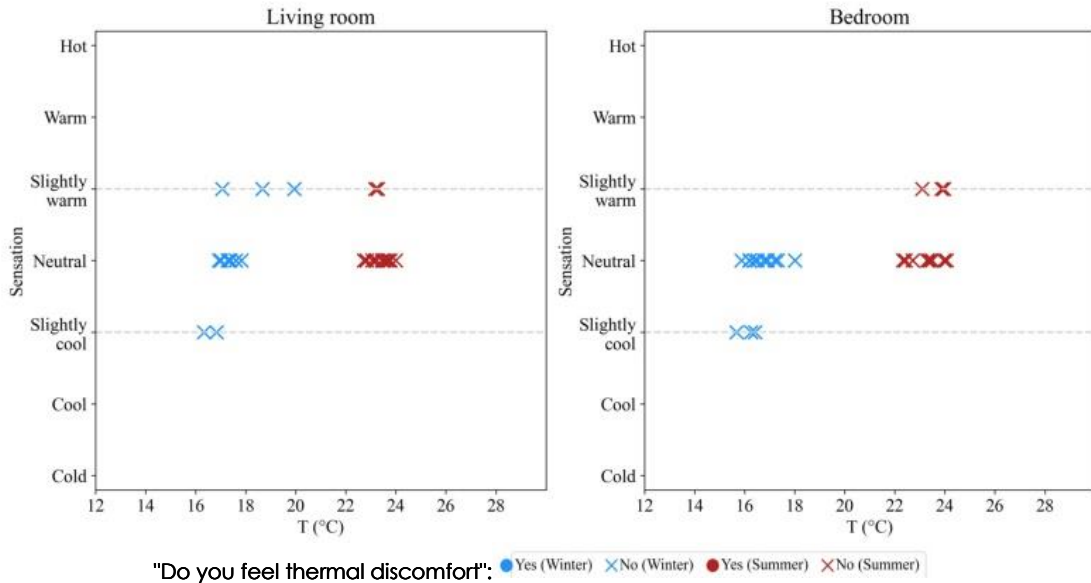
**Figure6 – Graphical representation of air temperature measurements and sensation for case study 1 by compartment and season**



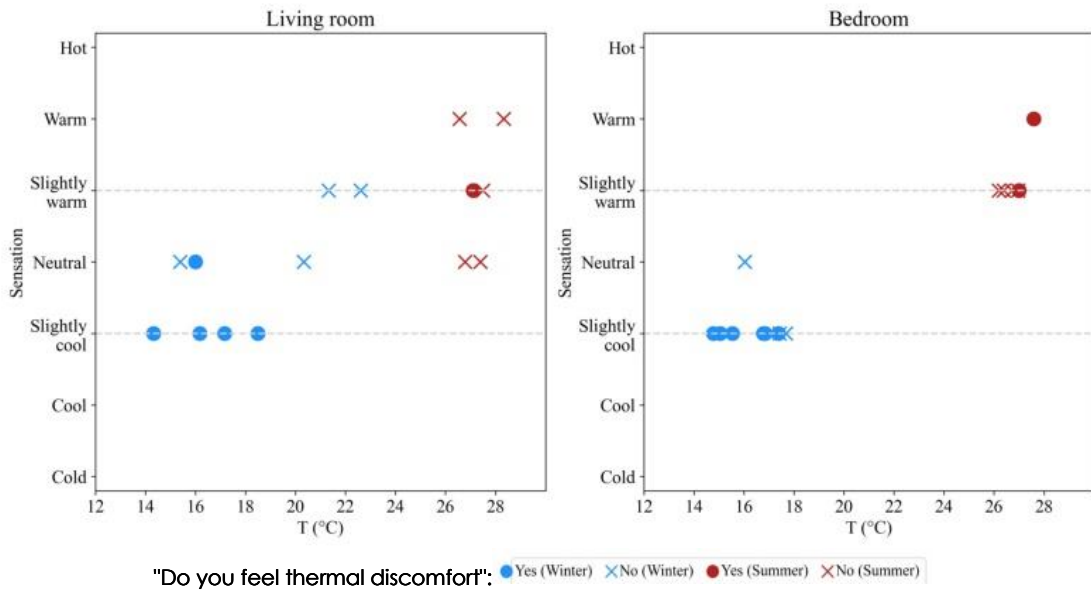
**Figure7 – Graphical representation of air temperature measurements and sensation for case study 2 by compartment and season**



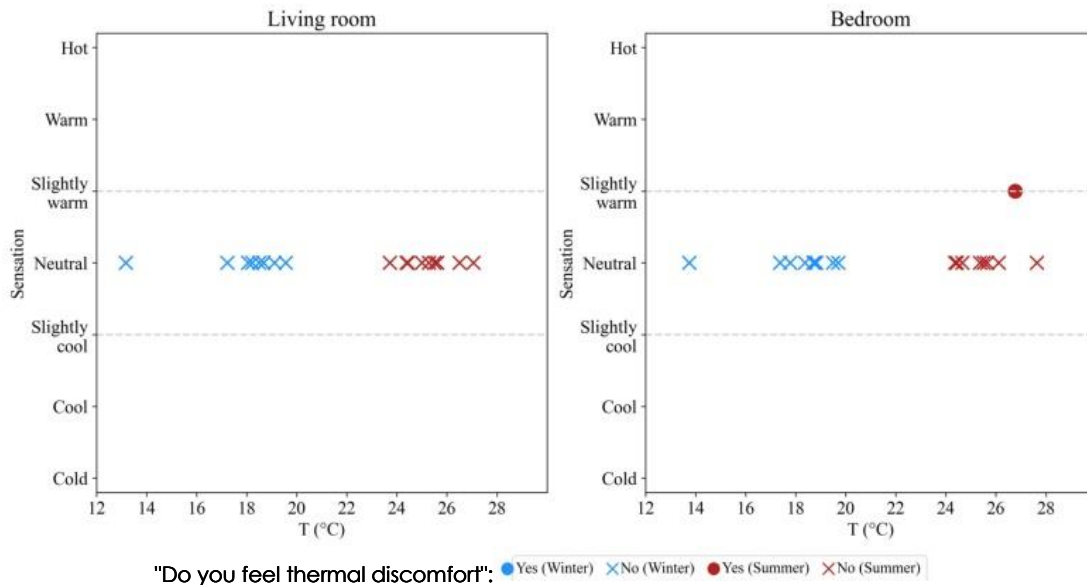
**Figure8 – Graphical representation of air temperature measurements and sensation for case study 3 by compartment and season**



**Figure9 – Graphical representation of air temperature measurements and sensation for case study 4 by compartment and season**



**Figure10 – Graphical representation of air temperature measurements and sensation for case study 5 by compartment and season**



Although we have case studies with different constructions and locations, it is impossible to say that better constructions bring greater comfort to a given person. For example, case study 5 presents, for the winter measurement period, a minimum temperature of 10.9°C in the bedroom and a maximum temperature of 27.9 °C in the summer (Table 3) and indicated that it always felt comfortable in the right now survey monitoring period, winter and in summer except one day in the summer in the bedroom. Also, in case study 1, being a more recent construction, the occupant indicates that it is always slightly cold in the winter in the living room and practically always in the bedroom, and this is the case study where the minimum temperature recorded in winter is the highest in the room, 16.3 °C (Table 3). It is known that the conditions of more recent constructions may be better, not allowing the house to reach such low minimum temperatures or such high maximum temperatures. Still, the perception of the person who lives in the house depends a lot on that specific person, their perception of your home, and what your demands and life experiences are.

## 5 CONCLUSIONS

Comfort and well-being inside buildings, particularly homes, are increasingly important for construction and renovation. According to the literature, temperature is one factor that most influences home comfort. Therefore, this study aimed to investigate how to assess home thermal comfort. Knowing that the methodology used involved measurements of the indoor environment and daily surveys for 14 consecutive days in summer and winter, some conclusions were reached in the case studies analysed:

- The measurement intervals that have the closest values, in general, are between 9 a.m. and 12 p.m. and the closest hour the occupants answered the survey, both in summer and winter. The fact that the "daily" time interval is generally further away from the others may be because it is a longer interval (24 hours) and may not reflect the use of HVAC equipment during the day.
- Temperature profile of the three measurement periods in the living room does not always correspond to that of the bedroom, both in summer and winter. This is more evident in some of the case studies. However, when comparing the temperature measurements in the living room and the main bedroom, there are no significant differences in mean temperature in these two rooms.
- Occupants indicate different perceptions of the same/similar measured temperature. It also happens that they feel comfortable at a higher/lower temperature. At an intermediate temperature, they indicate that they feel, for example, slightly cold, warm or other sensations.
- Therefore, the relationship between the measured temperature and occupant perception is difficult to study and understand because people's perception is subjective as it is affected by different variables (mood, experiences, among others).
- In winter, the average temperature of the living room and bedroom difference is 0.6°C in two cases, 0.5°C in another and less than 0.2°C in the others. In summer, this difference is 1°C in one case study, 0.5°C and 0.4°C in others and less than 0.2°C in the others. Therefore, measuring two of the most used house rooms for this study may not be justified since the temperature differences are not very significant.
- Occupant perception of the bedroom and the living room thermal sensation does not always coincide in all the case studies despite the recorded temperatures not being significantly different between the bedroom and the living room. Possible justifications could be that people's perceptions are influenced by their state of mind, their mood, their experiences, how they have lived through the day, and how they view their home.
- From the data collected, it is not possible to say clearly whether the houses under analysis provide greater comfort or discomfort to the occupants in summer or winter.
- Although we have case studies with different constructions and locations, it is impossible to say that better constructions bring greater comfort to a given person. It is known that conditions can be better by not allowing the home to reach such low minimum or high maximum temperatures. Still, the perception of the person who lives in the house depends a lot on that specific person and the perception they have of their home.

Although this study does not intend to be generalist, that is, it aims to analyse each house with the occupant who lives there to understand how they feel in their home, this study may present limitations in some conclusions due to the small number of study cases. For conclusions to be more solid, increasing the number of case studies would be necessary.

## REFERENCES

ALHORR, Y. et al. Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. **Building and Environment**, v. 105, n. February 2017, p. 369–389, 2016.

ANDARGIE, M. S.; TOUCHIE, M.; O'BRIEN, W. A review of factors affecting occupant comfort in multi-unit residential buildings. **Building and Environment**, v. 160, n. June, p. 106182, 2019.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. [s.l.: s.n.].

BRAGER, G.; ZHANG, H.; ARENS, E. Evolving opportunities for providing thermal comfort. **Building Research and Information**, v. 43, n. 3, p. 274–287, 2015.

COELHO DO VALE, R.; MOREIRA, I. **Estudo de Satisfação e Bem-estar à Sociedade Portuguesa**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.clsbe.lisboa.ucp.pt/pt-pt/system/files/assets/files/osp-estudo-de-satisfacao-e-bem-estar.pdf>>. Acesso em: 9 fev. 2018.

DARTEVELLE, O. et al. Long-term evaluation of residential summer thermal comfort: Measured vs. perceived thermal conditions in nZEB houses in Wallonia. **Building and Environment**, v. 190, n. December 2020, p. 107531, 2021.

DUARTE ROA, C.; SCHIAVON, S.; PARKINSON, T. Targeted occupant surveys: A novel method to effectively relate occupant feedback with environmental conditions. **Building and Environment**, v. 184, n. June, p. 107129, 2020.

ELNAKLAH, R.; WALKER, I.; NATARAJAN, S. Moving to a green building: Indoor environment quality, thermal comfort and health. **Building and Environment**, v. 191, n. January, p. 107592, 2021.

FABBRI, K. **Indoor Thermal Comfort Perception. A Questionnaire Approach Focusing on Children**. [s.l.] Springer International Publishing AG Switzerland, 2015.

GASPAR, S. **O impacto do suporte no trabalho percebido pelos trabalhadores**. [s.l.] Instituto Superior de Psicologia Aplicada, 2011.

GERHARDSSON, K. M.; LAIKE, T.; JOHANSSON, M. Leaving lights on – A conscious choice or wasted light? Use of indoor lighting in Swedish homes. **Indoor and Built Environment**, v. 30, n. 6, p. 745–762, 2020.

GONZALEZ-CACERES, A.; BOBADILLA, A.; KARLSHØJ, J. Implementing post-occupancy evaluation in social housing complemented with BIM: A case study in Chile. **Building and Environment**, v. 158, n. May, p. 260–280, 2019.

HOXHA, E.; LIARDET, C.; JUSSELME, T. Office densification effects on comfort, energy, and carbon lifecycle performance: An integrated and exploratory study. **Sustainable Cities and Society**, v. 55, n. January, 2020.

JONES, R. V.; GOODHEW, S.; DE WILDE, P. Measured indoor temperatures, thermal comfort and overheating risk: Post-occupancy evaluation of low energy houses



in the UK. **Energy Procedia**, v. 88, p. 714–720, 2016.

KO, W. H. et al. The impact of a view from a window on thermal comfort, emotion, and cognitive performance. **Building and Environment**, v. 175, n. February, p. 106779, 2020.

LAMBERT, L.; PASSMORE, H. A.; HOLDER, M. D. Foundational Frameworks of Positive Psychology: Mapping Well-Being Orientations. **Canadian Psychology**, v. 56, n. 3, p. 311–321, 2015.

LI, P.; FROESE, T. M.; BRAGER, G. Post-occupancy evaluation: State-of-the-art analysis and state-of-the-practice review. **Building and Environment**, v. 133, n. February, p. 187–202, 2018.

MANGAN, S. D. et al. Evaluation of settlement textures in terms of building energy , economic performance , and outdoor thermal comfort. **Sustainable Cities and Society**, v. 56, n. October 2019, p. 102110, 2020.

MATEUS, R.; PINTO, A; PEREIRA, J. M.C. Dynamics of thermal plumes for large spaces: A comparative study of in-situ smoke test and a CFD model, **Energy and Buildings**, v. 319, 114512, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114512>, 2024.

MATEUS, R.; PINTO, A; PEREIRA, J. M.C. Natural ventilation in large spaces: CFD simplified model validated with full-scale experimental data of Roman Baths, **Building and Environment**, v. 266, 112077, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112077>, 2024.

MATIAS, L.; SANTOS, C. Conforto térmico adaptativo no setor residencial em portugal. **Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono**, n. November, p. 1–12, 2013.

MONIKA, F.; WARGOCKI, P. **Human comfort and self-estimated performance in relation to indoor environmental parameters and building features**. [s.l: s.n.].

MORALES-BRAVO, J.; NAVARRETE-HERNANDEZ, P. Enlightening well-being in the home: The impact of natural light design on perceived happiness and sadness in residential spaces. **Building and Environment**, v. 223, n. June, p. 109317, 2022.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563–572, 2002.

ORNSTEIN, S. W. Avaliação Pós-Ocupação aplicada em edifícios de escritórios: Alguns aspectos metodológicos e resultados. 1995.

ORTIZ, M. A.; KURVERS, S. R.; BLUYSSSEN, P. M. A review of comfort, health, and energy use: Understanding daily energy use and well-being for the development of a new approach to study comfort. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 323–335, 2017.

PAONE, A.; BACHER, J. P. The impact of building occupant behavior on energy efficiency and methods to influence it: A review of the state of the art. **Energies**, v. 11, n. 4, 2018.

PASTORE, L.; ANDERSEN, M. Building energy certification versus user satisfaction with the indoor environment: Findings from a multi-site post-occupancy evaluation (POE) in Switzerland. **Building and Environment**, v. 150, n. January, p. 60–74, 2019.

PAZHOOHESH, M.; ZHANG, C. A satisfaction-range approach for achieving thermal comfort level in a shared office. **Building and Environment**, v. 142, n. June,

p. 312–326, 2018.

PINTO, S. et al. Comfort, well-being and quality of life: Discussion of the differences and similarities among the concepts. **Porto Biomedical Journal**, v. 2, n. 1, p. 6–12, 2017.

PISELLO, A. L. et al. Test rooms to study human comfort in buildings: A review of controlled experiments and facilities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, n. May, p. 111359, 2021.

RANDALL, C.; CORP, A.; SELF, A. Measuring National Well-Being: Life in the UK. **Office for National Statistics**, n. February, p. 1–52, 2014.

RASHEED, E. O.; BYRD, H. Can a naturally ventilated office outperform a mixed mode office? Pilot study on occupants' comfort. **Building and Environment**, v. 137, n. April, p. 34–40, 2018.

RIJAL, H. B.; HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. Adaptive model and the adaptive mechanisms for thermal comfort in Japanese dwellings. **Energy and Buildings**, v. 202, n. August, p. 109371, 2019.

RUPP, R. F. et al. Associations of occupant demographics, thermal history and obesity variables with their thermal comfort in air-conditioned and mixed-mode ventilation office buildings. **Building and Environment**, v. 135, n. January, p. 1–9, 2018.

SANT'ANNA, D. O. et al. Indoor environmental quality perception and users' satisfaction of conventional and green buildings in Brazil. **Sustainable Cities and Society**, v. 43, n. May, p. 95–110, 2018.

STOPPS, H.; TOUCHIE, M. F. Managing thermal comfort in contemporary high-rise residential buildings: Using smart thermostats and surveys to identify energy efficiency and comfort opportunities. **Building and Environment**, v. 173, n. November 2019, p. 106748, 2020.

ŠUJANOVÁ, P. et al. A healthy, energy-efficient and comfortable indoor environment, a review. **Energies**, v. 12, n. 8, p. 1–37, 2019.

UC DAVIS - STUDENT COMMUNITY CENTER. Average Scale Scores by Category - CBE Survey. 2014.

UK GREEN BUILDING COUNCIL. Health and Well-being in Homes. **UK Green Building Council**, n. July, p. 1–37, 2016.

WILLEMS, S.; SAELENS, D.; HEYLIGHEN, A. Comfort requirements versus lived experience: combining different research approaches to indoor environmental quality. **Architectural Science Review**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 2020.

ZHANG, Z.; ZHANG, Y.; KHAN, A. Thermal comfort of people from two types of air-conditioned buildings - Evidences from chamber experiments. **Building and Environment**, v. 162, n. April, p. 106287, 2019.

ZITARS, J. et al. Understanding the psycho-environmental potential functions of a green building to promote employee health, well-being and productivity: A theoretical perspective. **Building and Environment**, v. 205, n. June, p. 108268, 2021.

## APPENDIX

**Table A – Methods for analysing the indoor environment**

Survey/Interviews		Loggers/Sensors			Ref
Parameter	Type	Parameter	Location	Recorded period	
-	-	Air temperature	Living rooms and main bedrooms and outdoor	Every 5 minutes during almost 2 summer months	(JONES; GOODHEW; DE WILDE, 2016)
Thermal comfort	Questionário após o período de medição	Air temperature, average radiant temperature, relative humidity, air speed	Home (don't specify)	Summer and winter Every 1 minute during one hour	(MATIAS; SANTOS, 2013)
Thermal comfort	Surveys before, during and after the monitoring period	Temperature and relative humidity Wind speed and solar radiation	Roof-top weather station Living area Suite	Every 5 minutes during 14 months	(STOPPS; TOUCHIE, 2020)
Moisture and mould	Surveys and questionnaires	Air temperature, humidity, and CO <sub>2</sub> levels.	Main bedrooms	-	(GONZALEZ-CACERES ; BOBADILLA; KARLSHØJ, 2019)
Thermal comfort	Face-to-face semi-structured interviews Questionnaire	Air temperature	Living rooms and in the main bedrooms	Every 10 minutes during an entire year.	(DARTEVELLE et al., 2021)
Emotional well-being Natural lighting	Adaptation of the Watson and Clark PANAS-X	-	-	-	(MORALES-BRAVO; NAVARRETE-HERNANDEZ, 2022)

Survey/Interviews		Loggers/Sensors			Ref
Parameter	Type	Parameter	Location	Recorded period	
	questionnaire				
Thermal Comfort	Long-term survey six times a day in the living rooms and twice in the bedroom 5 survey periods	Air temperature and relative humidity	Bedrooms and living rooms Closest meteorological station	During 4 years	(RIJAL; HUMPHREYS; NICOL, 2019)
Lighting: artificial light	Interviews: open-ended and photo album	Light exposure	Home	During the day and night over six consecutive weeks	(GERHARDSSON; LAIKE; JOHANSSON, 2020)



## REABILITAÇÃO NÃO ESTRUTURAL DE EDIFÍCIO HABITACIONAL: CASO DE ESTUDO NO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU - PORTUGAL

### NON-STRUCTURAL REHABILITATION OF A HOUSING BUILDING: CASE STUDY IN THE HISTORIC CENTER OF VISEU - PORTUGAL

PINTO, MANUEL<sup>(1)</sup>; OLIVEIRA, ANTÓNIO<sup>(2)</sup>; HOLSTEN, ANA<sup>(3)</sup>; LANZINHA, JOÃO<sup>(4)</sup>

(1) Viseu Polytechnic Institute (C-MADE/UBI), E-mail: mpinto@estgv.ipv.pt

(2) Viseu Polytechnic Institute (C-MADE/UBI), E-mail: amffo@estgv.ipv.pt

(3) Forte - Desenvolvimento Sustentável, E-mail: anam.holsten@gmail.com

(4) University of Beira Interior (UBI) (C-MADE/UBI), E-mail: jcgl@ubi.pt

#### RESUMO

A “reabilitação como regra” de uma edificação tornou-se pela via legislativa e sustentabilidade construtiva uma opção fundamental para responder à crise habitacional vivida atualmente em Portugal.

Passar a reabilitação da exceção à regra implica uma intervenção integrada em diversas áreas técnicas. A atual legislação, adequada às especificidades da reabilitação, pretende conciliar a adequação aos atuais padrões de segurança (estrutural e contra incêndios), habitabilidade, conforto, com os princípios da sustentabilidade ambiental.

Considerando que cada reabilitação é única e possui as suas próprias especificações, o artigo que se apresenta pretende contribuir para os estudos acerca da análise de critérios de uma intervenção de reabilitação habitacional. O Caso de estudo tem especial relevância pois enquadra-se num Centro Histórico no qual as reabilitações têm que se sujeitar também ao Regulamento de Salvaguarda e Revitalização local.

Pode concluir-se que não é fácil estabelecer alternativas de reabilitação que melhorem as suas características de conforto habitacional sem que estas interfiram nas demais exigências, alterem os traços arquitetónicos ou colidam com a legislação em vigor.

**Palavras-chave:** Reabilitação habitacional, Exigências, Compatibilização, Centro histórico

#### ABSTRACT

The RCR (Rehabilitation as a Rule) of a building has become, through legislative means and constructive sustainability, a fundamental option to address the current housing crisis in Portugal.

Shifting rehabilitation from the exception to the rule requires an integrated intervention in various technical areas. The current legislation in Portugal, tailored to the specifics of rehabilitation, intends to balance adherence to modern safety standards (structural and fire safety), habitability, and comfort with principles of environmental sustainability.

Considering that each rehabilitation project is unique and has its own specifications, the present text aims to contribute to the studies on the analysis of criteria for a housing rehabilitation intervention. The case study is particularly relevant as it is situated in a Historic Center where rehabilitations must comply with the ruling local Regulamento de Salvaguarda e Revitalização (Safeguard and Revitalization Regulations).

It can be concluded that it is not easy to establish rehabilitation alternatives that improve characteristics of residential comfort without interfering with other requirements, altering architectural features, or conflicting with existing legislation.

**Keywords:** Housing rehabilitation, Requirements, Compatibility, Historic center

## **1 INTRODUÇÃO**

A “reabilitação como regra” de uma edificação tornou-se pela via legislativa e sustentabilidade construtiva uma opção fundamental para responder à crise habitacional vivida atualmente em Portugal.

Passar a reabilitação da exceção à regra implica uma intervenção integrada em diversas áreas técnicas. A atual legislação, adequada às especificidades da reabilitação, pretende conciliar a adequação aos atuais padrões de segurança (estrutural e contra incêndios), habitabilidade, conforto, com os princípios da sustentabilidade ambiental.

Considerando que cada reabilitação é única e possui as suas próprias especificações, o artigo que se apresenta pretende contribuir para os estudos acerca da análise de critérios de uma intervenção de reabilitação habitacional. O Caso de estudo tem especial relevância pois enquadra-se num Centro Histórico no qual as reabilitações têm que se sujeitar também ao Regulamento de Salvaguarda e Revitalização (Ramalho, 2017).

Pode concluir-se que não é fácil estabelecer alternativas de reabilitação que melhorem as suas características de conforto habitacional sem que estas interfiram nas demais exigências, alterem os traços arquitetónicos ou colidam com a legislação em vigor.

## **2 APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO – CASO DE ESTUDO**

O edifício em estudo (Figura 1) encontra-se localizado no Centro Histórico de Viseu, na proximidade ( $\approx 115$  m em linha reta) da Sé Catedral de Viseu e admite-se, com base na informação prestada por antigos moradores, que se trate de uma construção da primeira metade do século XX, pois não foi possível encontrar outras evidências documentais. As principais características arquitetónicas são:

- 4 pisos (1 piso enterrado não útil, 2 pisos habitacionais e um desvão de cobertura não útil);
- fachada principal e posterior com vãos e paredes meeiras (sem vãos) para edifícios adjacentes;
- 1 sala no 1.º piso e 1 quarto no 2.º piso sem iluminação natural (compartimentos sobrepostos);
- área útil: 109,7 m<sup>2</sup> (3 quartos, 3 salas, 2 cozinhas e 1 instalação sanitária);
- largura útil interior média: 5,5 m; profundidade (interior) no 1.º piso: 18,9 m;
- pé-direito: 3,2 m (1.º e 2.º pisos);
- elevação média da soleira: 0,20 m.

As principais características construtivas são:

- envolvente vertical exterior: alvenaria de granito revestida com argamassa de cal aérea (esp.: 0,30 - 0,60 m); 0,16 no parapeito das janelas;
- paredes meirais: alvenaria ordinária de granito revestida com argamassa de cal aérea (esp.: 0,16 - 0,47 m);
- paredes divisórias: tabique de madeira de pinho com argamassa bastarda de argila e cal (esp.: 0,12 m; Figura 2);
- estrutura e revestimento de pavimentos e forros: em madeira de pinho ou também forros revestidos a estafe;
- vãos e claraboia (sobre escadas): caixilharia em madeira pintada com vidro simples (muito degradada) com portada interior em madeira nas janelas; sistema de abrir no alçado principal, sistema de guilhotina no alçado posterior e claraboia com sistema fixo (não acessível pelo interior);
- cobertura inclinada: em laje aligeirada pré-esforçada de blocos de betão leve e revestimento em telha cerâmica do tipo lusa;
- cobertura em terraço (da cozinha e hall posterior do 1.º piso): laje maciça de betão armado.

O edifício foi identificado como potencial residência de estudantes segundo o Plano de Ação para a Revitalização do Centro Histórico de Viseu (C. Municipal de Viseu, 2014).

### **3 ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO LOCAL**

As principais disposições do Regulamento de Salvaguarda e Revitalização do Centro Histórico de Viseu (Edital, 2002) com interesse para este artigo e aplicáveis ao caso de estudo são as seguintes (art.ºs 12.º, 13.º, 14.º, 26.º e 27.º):

- a substituição de portas e janelas com características tradicionais só é permitida por outras idênticas em material, forma e cor .....
- os caixilhos das janelas devem ser subdivididos;
- é interdita a aplicação de estores ou persianas no exterior. Preconiza-se a aplicação de portadas de madeira no interior;
- as claraboias existentes devem ser sempre recuperadas e mantidas na sua forma original;
- a substituição de rebocos em fachadas deve ser feita de forma a recuperar a aparência original do edifício e a receber acabamento de pintura a cal ou pintura a tinta não texturada de cor apropriada;
- a instalação de aparelhos de ar condicionado carece de licenciamento prévio.

**Figura 1 - Planta do 1.º (a), 2.º (b) e 3.º (c) pisos**



Fonte: (Holsten, 2024)

**Figura 2 - Paredes divisórias interiores em tabique**



Fonte: (Holsten, 2024)



#### **4 PROPOSTA ARQUITETÓNICA E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS**

Considerando que a segurança estrutural se encontra assegurada (Decreto-Lei n.º 95/2019) e que é possível outra utilização que não a residência de estudantes referida no ponto 3., preconiza-se a conservação estrutural das paredes exteriores, pavimentos e cobertura. Complementarmente, as paredes divisórias serão mantidas em termos de posicionamento e materiais, exceto nas salas do 1.º piso e nas novas instalações sanitárias do 2.º piso. Pontualmente, serão abertos/fechados os vãos interiores necessários à alteração da utilização dos compartimentos.

As propostas de alterações na compartimentação interior são as seguintes (Figura 3):

- piso 1: junção de duas salas (3 e 4); alteração de utilização de quarto (2) para cozinha; alteração de utilização de cozinha (1) para instalação sanitária; eliminação de 2 portas interiores (de acesso às escadas e no corredor);
- piso 2: alteração de utilização de quarto “interior” (8) em duas instalações sanitárias (uma comum e outra privativa); alteração de utilização de cozinha (7) para quarto e anulação de instalação sanitária da marquise (5), transformando-a em varanda aberta.

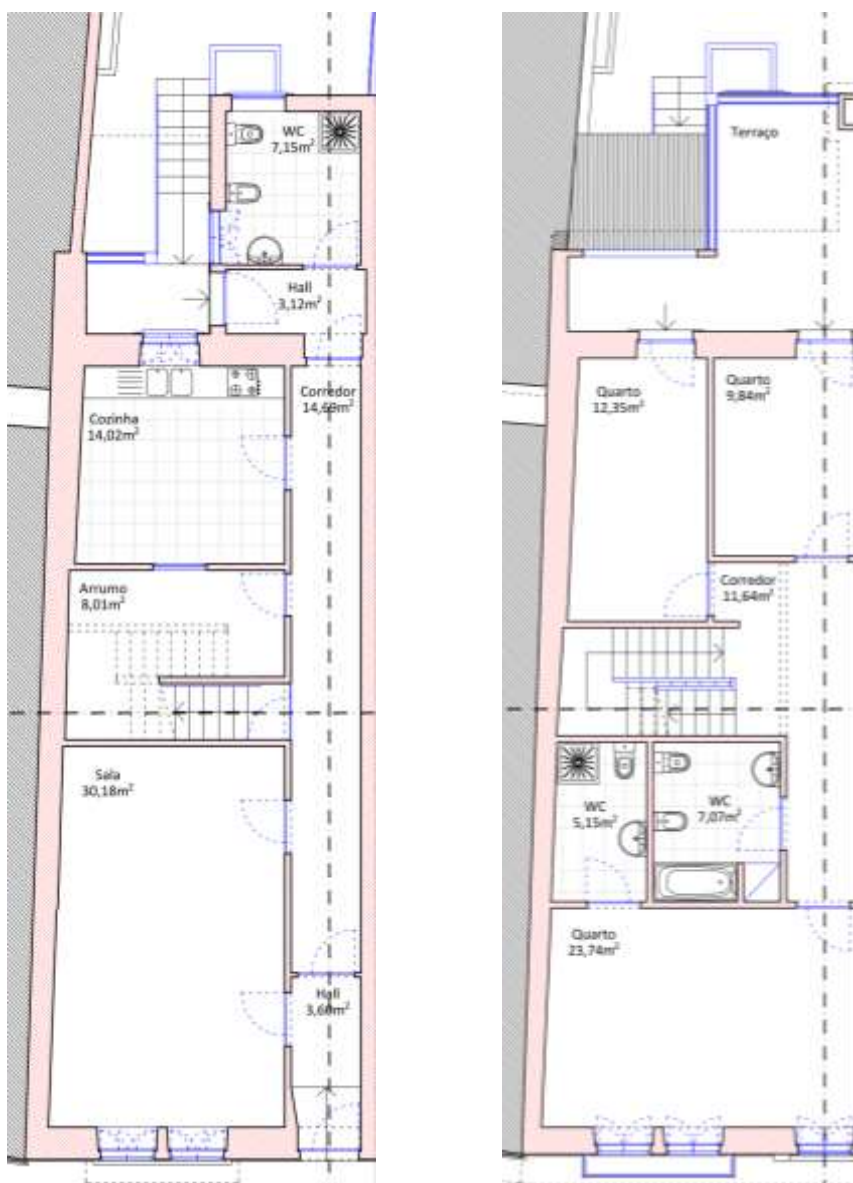
Realça-se que a alteração da utilização das cozinhas e instalações sanitárias, em face das novas redes prediais de águas e esgotos a instalar, pode levar à reformulação estrutural dos respetivos pavimentos. Em alternativa, estas redes prediais poderão ser instaladas em teto falso.

Em face das molduras das janelas e porta da fachada principal serem constituídas por granito com reduzida saliência em relação ao reboco (Figura 4) estas poderão ficar ocultas com a aplicação de sistema ETICS ou argamassa térmica com a inconveniente adulteração dos pormenores construtivos (Silva; Torres, 2009; Abalada, 2009). Sendo assim e em face das restrições existentes (Edital, 2002), preconizam-se as seguintes soluções construtivas:

- substituição de todas as argamassas e pinturas por novas, por materiais idênticos; substituição do forro em estafe ou madeira por teto falso em gesso cartonado;
- aplicação pelo interior de lã mineral em sistema semidireto com estrutura metálica e placas laminadas de gesso cartonado em todas as paredes da envolvente interior (para desvão não útil na cobertura), envolvente exterior e nas paredes meeiras;
- isolamento térmico em lã mineral (em face da incombustibilidade) sobre a esteira do sótão e sob pavimento do 1.º piso (em teto falso); isolamento da cobertura da instalação sanitária e hall do 1.º piso (em teto falso);

- substituição das caixilharias por novas de madeira, com forma e pintura de cor igual; com vidro duplo de baixa emissividade, com quadrícula e com panos de espessura diferente; aplicação de proteção interior com portadas de madeira e persiana elétrica de tecido claro na claraboia (sobre escadas). Deve prestar-se especial atenção aos vedantes de todas as frinchas (ex.: vedante inferior das portas exteriores);
- sistema de climatização: aparelhos exteriores de ar condicionado nas varandas posteriores ou no logradouro; aquecimento das AQS no desvão sanitário.

**Figura 3 - Compartimentação proposta para o 1.º (a) e 2.º (b) pisos**



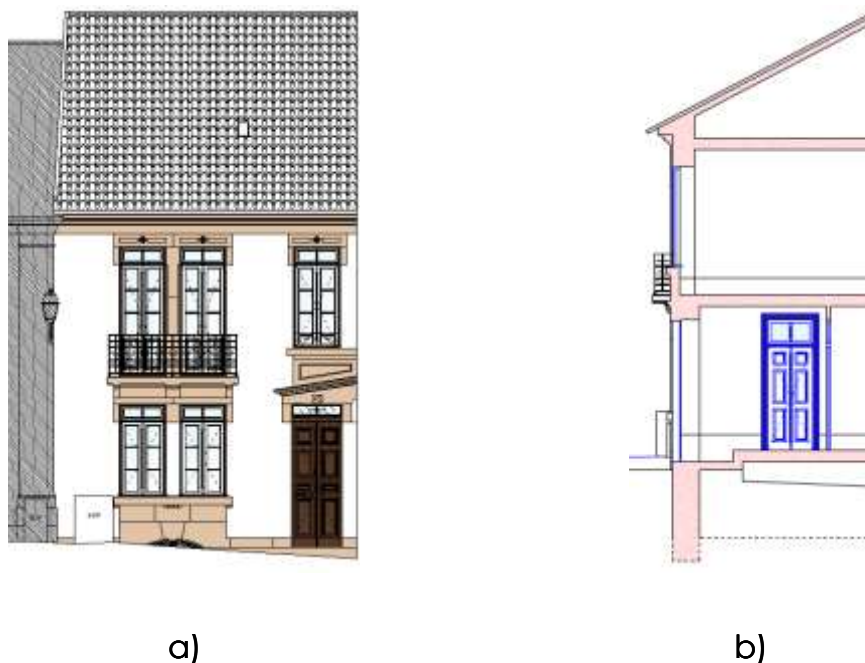
a)

b)

**Fonte:** (Autoria própria)

Qualquer solução de reabilitação tem sempre condicionantes e vantagens. Apresenta-se no Quadro 1 uma análise às principais soluções adotadas no caso em estudo.

**Figura 4 - Fachada Principal (a) e corte (b)**



Fonte: (Holsten, 2024)

**Quadro 1 - Caracterização das principais soluções de reabilitação  
[adaptado de (Mouraz, 2016)]**

<b>Solução de intervenção</b>	<b>Principais características técnicas</b>	<b>Principais vantagens e condicionantes</b>
Isolamento pelo interior e reparação mínima pelo exterior	Aplicação de isolamento térmico pelo interior com revestimento de gesso cartonado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inexistência de intervenção na fachada;</li> <li>- Diminuição do espaço interior;</li> <li>- Impossibilidade de manter decorações originais interiores;</li> <li>- Diminuição da inércia térmica</li> </ul>
Substituição da caixilharia existente reproduzindo desenho original usando novos materiais	Substituição da caixilharia existente por nova solução reinterpretando ou reproduzindo de forma integral o desenho original	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhor desempenho da nova solução;</li> <li>- Tentativa de adaptação às características arquitetónicas da envolvente caso se reproduza o desenho original;</li> <li>- Dificuldade de quantificação de desempenho por ser desenho único</li> </ul>

Fonte: (Autoria própria)

As intervenções mais benéficas de reabilitação devem respeitar um conjunto de critérios distribuídos por três perspectivas (Mouraz, 2016):

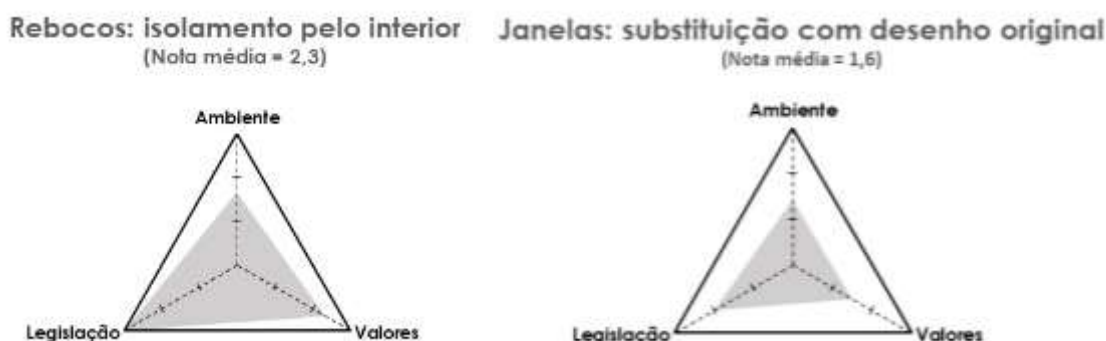
- valores ambientais - 8 critérios;
- valores urbanísticos, patrimoniais e culturais - 4 critérios;
- legislação local - 6 critérios.

A título exemplificativo, os critérios relativos aos “valores urbanísticos, patrimoniais e culturais” são os seguintes:

- condicionantes arquitetónicas / construtivas;
- condicionantes de uso;
- autenticidade;
- integração urbanística.

Associando-se os valores 1, 2 e 3 ao mau desempenho, médio desempenho e bom desempenho, respetivamente, em cada critério calculou-se uma “nota” média para as duas soluções de reabilitação descritas no Quadro 1. Apresenta-se na Figura 5 a quantificação das três perspectivas (Mouraz, 2016).

**Figura 5 - Comportamento de soluções de reabilitação segundo três perspectivas**



**Fonte:** (Autoria própria)

Pode concluir-se que as soluções ótimas serão aquelas que apresentem o triângulo perfeitamente preenchido, atingindo pontuações máximas ou pelo menos equilibradas entre todos os domínios, de preferência associadas a intervenções com custos reduzidos e grande facilidade de execução (Mouraz, 2016).

## 5 VERIFICAÇÃO REGULAMENTAR

O Decreto-Lei n.º 95/2019 introduz pequenas, mas importantes, alterações ao articulado de quase todos os principais regulamentos de desempenho das construções. Estas alterações têm, na sua maioria,

como principal objetivo permitir novas filosofias e métodos de intervenção, incorporando os princípios da proteção e valorização do existente, da sustentabilidade ambiental e da melhoria proporcional e progressiva.

Em geral, a nova legislação é aplicável aos edifícios anteriores às alterações regulamentares que, em cada área, introduziram alterações mais significativas no modo de conceber, de projetar e de construir. Algumas das novas normas são facultativas (pode optar-se pela legislação corrente) e outras obrigatórias (como no caso dos eurocódigos e da vulnerabilidade sísmica).

### **5.1 Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU)**

Para o enquadramento nas "Obras de pequena reorganização espacial", previstas na Portaria n.º 304/2019 (Decreto-Lei n.º 95/2019), o ponto i), da alínea a), do art.º 2.º refere, nomeadamente, que a obra "*Não altera a localização, forma ou dimensão de mais do que um terço do número total de compartimentos*". Neste caso, alterou-se a dimensão de dois compartimentos (junção de duas salas do 1.º piso), num total de nove compartimentos (22%). As exigências mais significativas para o caso de estudo são as seguintes e aplicam-se apenas aos espaços, instalações e elementos construtivos que forem objeto de intervenção (art.º 9.º):

- os compartimentos habitáveis devem ser iluminados e ventilados por um ou mais vãos em comunicação direta com o exterior, cuja área total não seja inferior a um duodécimo da área do compartimento;
- os compartimentos habitáveis podem ser, em situações excecionais, iluminados e ventilados através de outros compartimentos desde que, quer a área total dos vãos em comunicação direta com o exterior, quer a área total dos vãos de ligação dos compartimentos, não sejam inferiores a um décimo da área total dos compartimentos.

Uma vez que a recompartimentação prevê a instalação suplementar de uma instalação sanitária comum no 2.º piso (Figura 3 b)), optou-se por permitir a iluminação direta no quarto confinante com instalação sanitária (alçado posterior), passando a marquise a varanda aberta.

### **5.2 Acessibilidade a pessoas com mobilidade condicionada**

O presente caso de estudo enquadra-se nas "intervenção simples" previstas na Portaria n.º 301/2019 (Decreto-Lei n.º 95/2019). Deste modo, as mais relevantes para o caso de estudo são as seguintes e aplicam-se apenas aos espaços, instalações e elementos construtivos que forem objeto de intervenção (Procedimento alternativo - Quadro 3):

- alteração da área de cada compartimento acessível essencial - As larguras dos percursos acessíveis não devem ser inferiores a 0,80 m e o diâmetro das zonas de manobra não deve ser inferior a

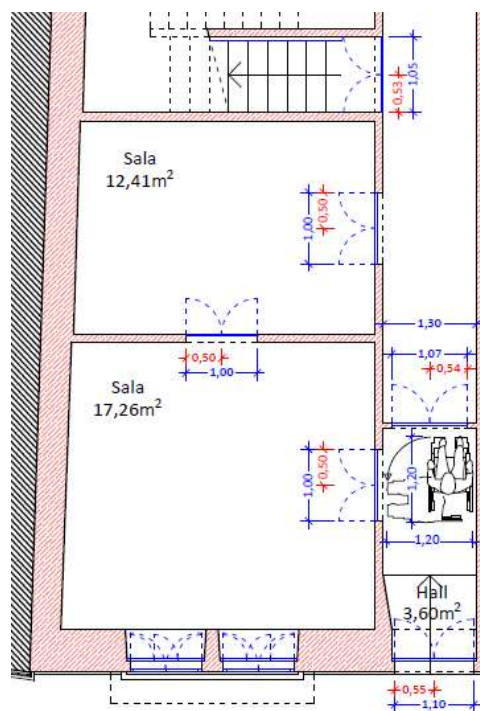
1,20 m (zonas de manobra de 360° a verificar no hall, cozinha e instalação sanitária (Decreto-Lei n.º 163/2006));

- alteração de vãos de acesso ao exterior, incluindo soleira, tipo de abertura, materiais e/ou dimensões - garantir os valores mínimos dimensionais de 0,77 m de largura útil e 2 m de altura útil. No caso de portas de duas ou mais folhas operadas independentemente, a exigência é aplicável a pelo menos uma das folhas;

- alteração de localização, forma e/ou dimensões de vãos interiores, de acesso a compartimentos acessíveis - garantir os valores mínimos dimensionais de 0,77 m de largura útil e 2 m de altura útil. No caso de portas de duas ou mais folhas operadas independentemente, a exigência é aplicável a pelo menos uma das folhas.

Preconiza-se a alteração de todas as portas com 2 folhas ( $\geq 1,00$  m de largura), para portas com folha fixa e folha móvel no mínimo com 0,85 m de largura (Figura 6 - situações não regulamentares de larguras de portas assinaladas a vermelho).

**Figura 6 - Dimensões das portas e da zona de manobra do piso 1**



Fonte: (Autoria própria)

### 5.3 Conforto Térmico e Acústico

No Plano Diretor do município de Viseu (Aviso n.º 5793/2023) foi elaborada a carta de classificação das zonas mistas e sensíveis na qual se deduz que a moradia pertence à “Zona mista”.

No Quadro 2 apresenta-se a verificação regulamentar da envolvente no que diz respeito aos requisitos térmicos e acústicos. Para efeitos

comparativos também se apresentam os valores correspondentes para a construção nova.

## Quadro 2 - Verificação Regulamentar da envolvente: análise comparativa construção nova vs reabilitação

Envolvente	Tipo de construção	Verificação regulamentar		
		Térmica <sup>1</sup> $U - [Wm^2 \cdot ^\circ C]$	Sol. adotada $U - [Wm^2 \cdot ^\circ C]$	Acústica <sup>3</sup> $D_{2m, n\bar{t}, w} - [dB]$
Fachada principal e posterior (8 cm de isolamento)	Nova	$U \leq 0,4$		$\geq 33$ dB
	Reabilitação	$U \leq 1,5$	0,39 (Santos; Matias, 2006)	$\geq 33$ dB
Parede meeira direita - env. interior (3 cm de isolamento)	Nova	$U \leq 2,0$		$\geq 50$ dB
	Reabilitação	$U \leq 1,5$	0,70 (Santos; Matias, 2006)	$\geq 47$ dB
Parede meeira esquerda (3 cm de isolamento)	Nova	-	-	$\geq 50$ dB
	Reabilitação	-	-	$\geq 47$ dB
Parede divisória para desvão da cobertura - env. Interior (3 cm de isolamento)	Nova	$U \leq 2,0$		-
	Reabilitação	$U \leq 1,5$	0,67 (Pereira, 2015)	-
Cobertura em terraço (8 cm de isolamento)	Nova	$U \leq 0,35$		$\geq 33$ dB
	Reabilitação	$U \leq 0,7$	0,35 <sup>5</sup>	$\geq 30$ dB
Cobertura inclinada - env. interior (6 cm de isolamento)	Nova	$U \leq 1,3$		-
	Reabilitação	$U \leq 0,7$	0,73 (Santos; Matias, 2006)	-
Pavimentos - env. Interior (6 cm de isolamento)	Nova	$U \leq 1,3$		-
	Reabilitação	-	0,46 <sup>5</sup>	-
Vãos envidraçados <sup>2, 4</sup>	Nova	$U \leq 2,4$		-
	Reabilitação	$U \leq 4,0$	??	-

1- Zona Climática I2; Verificação regulamentar: Portaria n.º 138-I/2021 e Decreto-Lei n.º 95/2019;  
2- Preconiza-se a substituição dos elementos de caixilharia e envidraçados por novos materiais reproduzindo o desenho original;  
3- Zona mista conforme PDM; Verificação regulamentar: Decreto-Lei n.º 129/2002 e Decreto - Lei n.º 95/2019;  
4- Não se apresentam as estimativas de  $U$  para a solução adotada por serem de difícil obtenção analítica;  
5- Valores calculados

Fonte: (Autoria própria)

### 5.4 Segurança contra Incêndios

O art.º 14.º-A do Decreto-Lei n.º 220/2008 refere que para os edifícios existentes pode ser dispensada a aplicação de algumas disposições do regulamento técnico, quando a sua aplicação seja manifestamente desproporcionada, ao abrigo dos princípios previstos no decreto-lei que

estabelece o regime aplicável à reabilitação de edifícios (Decreto-Lei n.º 95/2019), mediante decisão da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), quando da 1.ª categoria de risco (ANEPC, 2024; Coelho, 2019). Deste modo, o ponto 3 do mesmo artigo refere que na reabilitação de edifícios ou frações autónomas, o projetista determina as medidas de segurança contra incêndio a implementar no edifício, com fundamentação adequada na memória descritiva do projeto de Segurança Contra Incêndio (SI), recorrendo a métodos de análise das condições de segurança contra incêndio ou métodos de análise de risco, reconhecidos pela ANEPC ou por método a publicar pelo LNEC.

O método de avaliação da segurança ao incêndio em edifícios existentes ARICA:2019 (Coelho, 2019) permite determinar o nível de segurança ao incêndio de um edifício, ou de parte deste, contemplando as suas características próprias e possibilitando uma análise pormenorizada de todas as fases, no caso de ocorrência de incêndio (início, desenvolvimento, propagação, evacuação e combate), tendo por referencial a legislação em vigor. O método pode ser utilizado para dispensar o cumprimento de algumas disposições da legislação de segurança ao incêndio no caso de intervenções em edifícios existentes (Coelho, 2019). Este método contempla alguns critérios que são importantes numa avaliação de risco de incêndio nos edifícios dos centros históricos (Almeida, 2013), tais como o estado de conservação do edifício, as instalações elétricas e de gás. As principais fontes para obter esta informação são a vistoria ao edifício, o levantamento do edifício existente, o projeto de arquitetura e o projeto de Segurança Contra Incêndio (SI) (Coelho, 2019).

O método ARICA:2019 (Coelho, 2019) foi aplicado ao edifício em estudo, identificado como a unidade de análise (UA) e coincidindo com a área de intervenção (AI), considerando duas situações: as condições iniciais (CI), obtendo-se o índice de segurança ao incêndio nas condições iniciais ( $I_{SI,CI}$ ) igual a 1,01 e as condições de projeto (CP), obtendo-se o índice de segurança ao incêndio nas condições de projeto ( $I_{SI,CP}$ ) igual a 1,04. Nas condições iniciais teve-se principalmente em consideração a análise relativa ao início, desenvolvimento, propagação e evacuação - em relação ao combate a regulamentação não exige grande parte das condições. Nas condições de projeto foram tidas em consideração, nomeadamente, as informações relativas ao estado de conservação das instalações técnicas, as quais nas condições iniciais não existem (ex.: instalações de gás e de climatização) ou encontram-se muito degradadas (instalação elétrica).

De acordo com a profundidade das alterações previstas para o caso de estudo, considerou-se uma Intervenção-tipo 1, correspondendo a intervenções em que não se verificam: a alteração da utilização-tipo (UT) e da classe de risco (CR); a introdução de novos locais de risco B, C, D ou E; a redução do número nem da largura das saídas dos locais de risco



(LR); o aumento do efetivo dos LR e alteração das vias de evacuação (Coelho, 2019).

Apesar de não ser assim classificado na regulamentação, para efeitos de aplicação do ARICA:2019 o interior de uma habitação é considerado como um local de risco. Não lhe estão, contudo, associadas quaisquer exigências adicionais (Coelho, 2019).

No Quadro 3 apresenta-se a informação utilizada na aplicação do ARICA:2019.

**Quadro 3 - Informação utilizada na aplicação do ARICA:2019  
(Coelho, 2019)**

Características da unidade			
Tipo de local de risco		Utilização tipo	
Unidade de habitação		UTI - Habitação	
Categoria de risco			
1.ª Categoria de risco			
Condições de SI			
Início do incêndio			
Anomalias que podem provocar um incêndio		Instalações técnicas	
Não existem		Condições Iniciais	Condições de projeto
		Não existem	Regulamentares
Desenvolvimento e propagação do incêndio			
Materiais de revestimento do local de risco		Materiais de revestimento das vias de evacuação	
Paredes / tetos	A1 / A1 (Regulamentar: C-s3 d1)	Os materiais de revestimento são regulamentares (são iguais ao do local de risco)	
Pavimentos	Dfl-s1 (Regulamentar: Dfl-s3)		
Isolamento e proteção entre utilizações-tipo distintas		Propagação pelo exterior	
Na AI à qual pertence a UA só existe uma utilização-tipo		Materiais de revestimento	A1 (Regulamentar: D-s3, d0)
		Afastamento dos vãos das fachadas (m)	1,10
Evacuação em caso de incêndio			
Saídas do local de risco		Número de saídas	2
		Largura total das saídas	1,80
Dimensões dos locais e das vias horizontais de evacuação		Largura da via horizontal até à saída para o exterior	Largura da via
			1,30
		Largura do vão	1,07
Dimensões das vias verticais de evacuação		Número de vias verticais de evacuação	1
		Largura da via vertical de evacuação	Largura da via
			0,90
		Largura do vão	0,90
		Inclinação das vias verticais de evacuação (graus)	40

**Fonte:** (Autoria própria)

Da aplicação do ARICA:2019, constata-se que o edifício apresenta um índice de segurança ao incêndio nas condições de projeto superior a 1,00 (condição de cumprimento obrigatória), apresentando condições suficientes para o projeto de SI ser aprovado. Com a implementação de medidas simples (ex.: renovação da instalação elétrica), as quais não alteraram a imagem do edifício, foi possível diminuir o risco de incêndio.

## **6 CONCLUSÕES**

A aplicação do conceito “reabilitação como regra” de uma edificação tornou-se uma opção fundamental. A reabilitação de uma edificação implica uma intervenção integrada em diversas áreas técnicas. A atual legislação pretende conciliar a adequação dos atuais padrões regulamentares com os princípios da sustentabilidade ambiental.

O caso de estudo do presente artigo enquadra-se num Centro Histórico no qual as reabilitações também têm que se sujeitar ao Regulamento de Salvaguarda e Revitalização local.

A opção arquitetónica de remodelação interior pautou-se por uma intervenção mínima no sentido de se adequar os compartimentos às exigências atuais (ex.: cozinha e instalações sanitárias). As propostas de intervenção de reabilitação construtiva são de carácter bastante simples, sendo as mais “intrusivas” a colocação de isolamento térmico nas envolventes, a construção de paredes divisórias interiores nas novas instalações sanitárias do 2.º piso, a oclusão/abertura de portas e a instalação de novas redes técnicas (tubagem a colocar em tetos falsos).

Pode concluir-se que o caso de estudo revelou-se de fácil adequação à legislação atual, tendo sido possível manter em grande parte a compartimentação e as soluções construtivas iniciais. No entanto, optou-se por substituir os materiais de revestimento e as caixilharias por outros equivalentes.

## **REFERÊNCIAS**

Almeida, A., Análise do Risco de Incêndio no Centro Histórico de Viseu. O caso do Quarteirão da Rua Escura, Dissertação de Mestrado apresentada à ESTGV, 2013.

ANEPC - <https://prociv.gov.pt/pt/seguranca-contra-incendio/servicos/projetos/>. (Consultado em junho de 2024)

Aviso n.º 5793/2023, Alteração do Plano Diretor Municipal de Viseu, 17 de março, Diário da República, 2.ª série, 2023.

C. Municipal de Viseu, Plano de Ação para a Revitalização do Centro Histórico de Viseu, 2014.

Coelho, L. et al, ARICA:2019. Método de Avaliação da Segurança ao Incêndio em Edifícios Existentes. Descrição, Âmbito e Condições de Aplicação, Relatório LNEC 327/2019 - DED/NUT, LNEC, 2019.

Decreto-Lei n.º 129/2002 (e correspondentes atualizações), Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), 11 de maio, Diário da República, 1.ª série-A, 2002.

Decreto-Lei n.º 163/2006 (e correspondentes atualizações), Condições de Acessibilidade a Satisfazer no Projecto e na Construção de Espaços Públicos, Equipamentos Colectivos e Edifícios Públicos e Habitacionais, 8 de agosto, Diário da República, 1.ª série, 2006.

Decreto-Lei n.º 220/2008, Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RJSCIE) (e correspondentes atualizações), 12 de novembro, Diário da República, 1.ª série, 2008. (e demais legislação conexas).

Decreto-Lei n.º 95/2019, Regime Aplicável às Operações de Reabilitação de Edifícios ou de Frações Autónomas, 18 de julho, Diário da República, 1.ª série, 2019 (e demais legislação conexas).

Edital n.º 368-A/2002, Regulamento de Salvaguarda e Revitalização do Centro Histórico de Viseu, 1 de agosto, Diário da República, II Série, 2002.

Holsten, A., Requalificação de Edifício através de Reabilitação não Estrutural: Caso de Estudo no Centro Histórico de Viseu, Dissertação de Mestrado apresentada à ESTGV, 2024.

Mouraz, C., A Importância da Caracterização Construtiva e do Estado de Conservação na Sustentabilidade das Ações de Reabilitação: um caso de Estudo no Centro Histórico de Viseu, Dissertação de Mestrado apresentada à FCTUC, 2016.

Pereira, S. et al, Reabilitação Térmica de Paredes de Tabique com Recurso a Materiais Correntes de Isolamento, Patorreb 2015, FEUP, 2015.

Portaria n.º 138-I/2021, Requisitos Mínimos de Desempenho Energético Relativos à Envolvente dos Edifícios ....., 1 de julho, Diário da República, 1.ª série, 2021.

Ramalho, C., Análise Crítica aos Projetos de Reabilitação de Edifícios Antigos Pertencentes ao Centro Histórico de Viseu, Dissertação de Mestrado apresentada à ESTGV, 2017.

Santos, C.; Matias, L., Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios, ITE 50, LNEC, 2006.

Silva, M.; Torres, M.; Abalada, V., Vantagens e Condicionantes da Aplicação de "ETICS" na Reabilitação de Fachadas. Apoio à Decisão e Casos de Estudo, 3.º PATORREB, FEUP, 2009.



## **AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA DE QUEIMA DE BIOMASSA NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS**

JASPER, CATARINA MARCHI (1); GONILHO-PEREIRA, CRISTIANA (2);  
BETIOLI, ANDREA MURILLO (3); WALTRICK, LARISSA (4)

(1) DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL, INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL), [CATARINA.J@ALUNO.IFSC.EDU.BR](mailto:CATARINA.J@ALUNO.IFSC.EDU.BR)

(2) INSTITUTO POLITÉCNICO DE SETÚBAL, ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA DO BARREIRO (PORTUGAL),  
[CRISTIANA.PEREIRA@ESTBARREIRO.IPS.PT](mailto:CRISTIANA.PEREIRA@ESTBARREIRO.IPS.PT)

(3) DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL, INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL), [ANDREA.BETIOLI@IFSC.EDU.BR](mailto:ANDREA.BETIOLI@IFSC.EDU.BR)

(4) INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL),  
[LARISSAWALTRICK.05@ICLOUD.COM](mailto:LARISSAWALTRICK.05@ICLOUD.COM)

### **ABSTRACT**

*The present work aims to evaluate the feasibility of using ashes from biomass combustion as a partial substitute for Portland cement in mortar compositions, assessing the changes in the fresh and hardened states. The study involves a comparison between a reference mortar made of Portland cement (CEM I 42.5) with a mix ratio of 1:3 and a water/binder (W/B) ratio of 0.6, and mortars with partial substitution of cement mass by ashes at substitution rates of 5, 10, 15, 20, and 25%, maintaining the W/B ratio constant. In the fresh state, the workability of the mortars was evaluated through the flow table test, density, and air content. In the hardened state, compressive and flexural tensile strengths, density and open porosity were assessed.*

*It was found that the variation in properties, both in the fresh and hardened states, tends to be inversely proportional to the increase in the percentage of ash incorporation.*

**Keywords:** Biomass, Ash, Mortar.

### **RESUMO**

O presente trabalho visa avaliar a viabilidade da utilização de cinzas provenientes da queima de biomassa como um substituto parcial do cimento Portland na composição de argamassas. O estudo contempla a comparação entre uma argamassa de cimento Portland (CEM I 42,5)

de referência, ao traço 1:3, com água/ligante (A/L) de 0,6, e argamassas com substituição parcial da massa de cimento por cinzas, em teores de substituição de 5, 10, 15, 20 e 25%, mantendo a A/L constante. Avaliou-se, no estado fresco, a trabalhabilidade das argamassas através do ensaio da mesa de espalhamento, massa volúmica e teor de ar incorporado e, no estado endurecido, a resistência à compressão e à tração por flexão, massa volúmica e porosidade aberta. Constatou-se que a variação das propriedades, tanto no estado fresco, quanto endurecido, tendem a apresentar um comportamento inversamente proporcional ao aumento da percentagem de incorporação de cinzas e que, quando comparada com a argamassa de referência.

**Palavras-chave:** Biomassa, Cinza, Argamassa.

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos industriais é um problema amplamente reconhecido na Europa (Khan et al., 2022). A globalização do estilo de vida e da economia intensificou a produção de resíduos sólidos a níveis sem precedentes, exacerbando a deposição contínua desses resíduos em aterros sanitários e gerando preocupações ambientais críticas (Nanda & Berruti, 2021). Esse cenário é ainda mais complicado pela ausência de métodos eficazes de eliminação e tecnologias de tratamento adequadas, o que contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa e para a contaminação do solo e da água, configurando-se como um dos principais desafios para a sustentabilidade global (Saxena et al., 2020).

Em termos gerais, os resíduos referem-se a materiais resultantes de atividades humanas que são descartados por serem considerados indesejáveis, incluindo resíduos de construção, demolição, agrícolas e industriais. No entanto, é importante destacar que o conceito de resíduo é relativo, uma vez que o que é tratado como resíduo em um determinado contexto pode ser considerado um recurso valioso em outro (D'Adamo et al., 2022).

Neste cenário, a indústria da construção destaca-se como um dos maiores setores da sociedade, e o interesse por materiais de construção alternativos e mais sustentáveis tem aumentado significativamente. A substituição de matérias-primas virgens por resíduos sólidos na produção de materiais de construção de valor acrescido emerge como uma abordagem promissora (Tang et al., 2020). Em particular, os materiais de construção à base de cimento têm atraído atenção especial, pois enfrentam simultaneamente os desafios da eliminação de resíduos sólidos e da produção de cimento (Li et al., 2022). A produção de cimento, que gera grandes quantidades de dióxido de carbono, é reconhecida como uma das principais fontes de poluição ambiental e de aquecimento global (Ghosh et al., 2018).

Entre os desafios relacionados à gestão de resíduos, destaca-se o destino das cinzas volantes e de fundo geradas pelas centrais de queima de

biomassa, que, em muitos países, são descartadas sem qualquer forma de reutilização, ocupando grandes áreas de solo e poluindo o ar e a água durante sua eliminação (Al-Ghouti et al., 2021). Nesse sentido, a reutilização dessas cinzas surge como uma opção ambientalmente preemente.

Estudos recentes indicam que o uso de cinzas volantes de biomassa como substituto parcial do cimento em materiais de construção não só minimiza a necessidade de recursos naturais para a produção de cimento (Tarelho et al., 2012), mas também contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e oferece uma solução eficiente para a gestão dessas cinzas. Além disso, estudos demonstram que as cinzas de biomassa apresentam bom desempenho em betão e argamassas.

Kępys (2018) investigou a utilização de cinzas pesadas provenientes da queima de biomassa em alto-forno de leito fluidizado como substituto parcial da areia, analisando teores de 25%, 50% e 75% de substituição em massa. Os resultados indicaram que a incorporação das cinzas nas argamassas proporcionou melhorias nas propriedades mecânicas, sugerindo a viabilidade da sua utilização.

Teixeira et al. (2016) analisaram a incorporação de cinzas de biomassa como substituto do cimento em argamassas. Após caracterizar física e quimicamente as cinzas, os autores investigaram teores de 20% e 40% de substituição de cimento, em massa. O estudo concluiu que a substituição de 20% apresentou os melhores resultados em termos de resistência mecânica e absorção de água, confirmando que a utilização de cinzas de biomassa pode melhorar as propriedades das argamassas.

Já Cabrera et al. (2020) exploraram a influência das cinzas de biomassa nas propriedades físico-químicas, comportamento mecânico e durabilidade de materiais como argamassas e betões. Os autores ressaltaram que, embora as cinzas residuais de biomassa tenham potencial para aplicação na fabricação de materiais de construção, sua utilização em larga escala é dificultada pela variação nas propriedades físico-químicas, que dependem do tipo de biomassa utilizada e do processo de combustão.

Mediante estes e outros estudos, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar o uso de cinzas provenientes da queima de biomassa em alto-forno de leito fluidizado, oriundas de uma indústria de papel portuguesa, como substituto parcial do cimento Portland em argamassas. Os resultados apresentados foram obtidos por meio de uma caracterização físico-química detalhada das cinzas, bem como da análise da influência de diferentes teores de substituição nas propriedades das argamassas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental do presente artigo consistiu na análise das propriedades nos estados fresco e endurecido de argamassas, para aplicação como revestimento, com o objetivo de verificar a influência da substituição parcial de cimento Portland por cinzas pesadas provenientes da queima de biomassa.

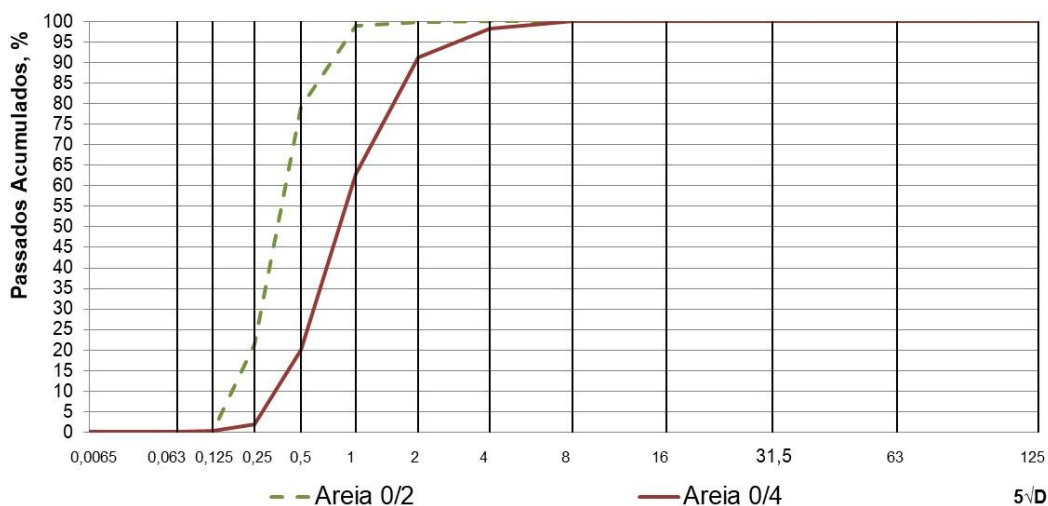
Os estudos com argamassas foram iniciados através da dosagem de uma argamassa de referência (REF, sem a utilização de cinzas), com trabalhabilidade suficiente para fins de aplicação como revestimento de parede (reboco). O traço dessa argamassa de referência foi de 1:3 (cimento Portland: combinação de areias, em massa) e relação água/ligante (A/L, em massa) de 0,6. A argamassa de referência teve sua trabalhabilidade avaliada visualmente e por meio do ensaio Flow-table (EN 1015-3, 1999).

Após a produção de uma argamassa de referência, foram produzidas argamassas com substituição de até 25% de cimento Portland por cinzas (relação em massa), considerando artigos acadêmicos e objetivando assim estabelecer um limite máximo de substituição, mantendo uma trabalhabilidade adequada para a aplicação escolhida.

### 2.1 Caracterização física e química

Os materiais utilizados na composição das argamassas avaliadas neste estudo foram: Cimento Portland Comum - CEM I 42,5 (massa volúmica específica de 3,14 g/cm<sup>3</sup> e baridade de 1,2 g/cm<sup>3</sup>), combinação de agregados finos, areias de grão fino 0/2 e de grão grosso 0/4 (massa volúmica específica do conjunto de 2,50 g/cm<sup>3</sup> e baridade do conjunto de 1,59 g/cm<sup>3</sup>, na proporção 1 para 2), com granulometria apresentada na Figura 01, e as cinzas pesadas fornecidas, ocorrendo uma variação na substituição de cimento Portland por estas.

As cinzas pesadas de biomassa foram fornecidas por uma indústria de papel portuguesa que recorre ao uso de fibra de eucalipto-comum. As amostras utilizadas foram recolhidas após processo de produção de pasta de papel, após queima de biomassa em alto forno de leito fluidizado. As cinzas foram caracterizadas quimicamente, através dos ensaios de teor de matéria orgânica (EN 196-2, 2013), teor de insolúveis em sais. Também foram caracterizadas, fisicamente, através dos ensaios de determinação da massa volúmica específica (1097-6) e da baridade (NP EN 1097-3, 2002). Considerando o intuito de utilizar as cinzas como substituição de cimento Portland, foram realizados ensaios para averiguação do potencial pozolânico das amostras, como o ensaio de condutividade elétrica, seguindo o método proposto por Luxán et al. (1989).



**Figura 01 – Curva granulométrica da combinação de areias utilizadas**

## 2.2 Formulação, produção e caracterização das argamassas

As cinzas utilizadas na produção das argamassas passaram por processo de peneiração e secagem em estufa a  $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , utilizando-se para a produção das argamassas a fração de material seco passante no peneiro 0,063 mm.

A sequência de mistura dos materiais seguiu a norma portuguesa NP EN 196-1 (IPQ, 2006).

Após a dosagem da argamassa sem substituição, argamassa de referência (REF), foram produzidas mais cinco argamassas, com teores de substituição de cimento por cinzas, em massa, de 5, 10, 15, 20 e 25% (C5, C10, C15, C20 e C25, respectivamente), para fins de avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido. A Tabela 01 apresenta o traço utilizado de cada material na produção das argamassas, em função da quantidade de aglomerante total, que foi composta pela soma da quantidade de cimento e de cinzas incorporadas na mistura.

**Tabela 01 – Traço das argamassas**

Materiais	REF	C5	C10	C15	C20	C25
Areia 0/4	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55
Areia 0/2	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
Cimento	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
Cinza	-	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Água	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Logo após a produção das argamassas, a fim de determinar a influência da adição das cinzas nas argamassas cimentícias no estado fresco das misturas, foram realizados ensaios para avaliação das seguintes propriedades: Índice de consistência por espalhamento (flow-table, conforme EN 1015-3, 1999), obtendo medidas de diâmetro expressa em



mm; Massa volúmica (conforme EN 1015-6, 1999) com resultados expressos em g/cm<sup>3</sup>; e Teor de ar incorporado (conforme EN 1015-7, 1999).

Após análise das propriedades no estado fresco, foram moldados, para cada argamassa produzida, um total de 15 provetes prismáticos de dimensões 40x40x160 mm, os quais após cura foram utilizados para a avaliação das seguintes propriedades: Massa volúmica (EN 1015-6, 1999), resistência à tração na flexão (EN 1015-11, 2019), resistência à compressão (EN 1015-11, 2019), e porosidade aberta (NP EN 1936, 2001). Os ensaios foram realizados nos provetes com idades de 7, 14 e 28 dias.

Por fim, realizou-se uma análise estatística comparativa com os resultados de resistência à compressão das argamassas com os diferentes teores de substituição de cimento por cinza de biomassa. Num primeiro momento, os resultados passaram por testes de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade da distribuição, a qual não foi obtida. Em sequência, foi aplicada a transformação de Box-Cox, para satisfação dos pressupostos de normalidade para que, por fim, fossem realizados a análise de variância (ANOVA), os testes de Correlação de Pearson e os testes de Correlação de Spearman, para avaliação da influência do teor de substituição e da idade na resistência à compressão das argamassas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização do Materiais

No que diz respeito às cinzas, os resultados obtidos da determinação do teor de matéria orgânica, teor de sais insolúveis, determinação da massa volúmica específica e baridade são apresentados na Tabela 02.

**Tabela 02 – Caracterização química e física das cinzas**

Ensaio Realizado	Resultado Médio Cinzas
Teor de Matéria Orgânica (EN 196-2, 2013)	20,8%
Teor de Sais Insolúveis (EN 196-2, 2013)	280,400 ppm
Massa volúmica específica (NP EN 1097-6, 2003)	2,169 g/cm <sup>3</sup>
Baridade (NP EN 1097-3, 2002)	0,909 g/cm <sup>3</sup>

Para verificação do potencial pozolânico das cinzas, foram realizados os ensaios de condutividade elétrica, conforme proposto por Luxán et al. (1989). São consideradas pozolanas, os materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só, possuem pouco ou nenhum valor aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de umidade, reagem quimicamente formando compostos com propriedades aglomerantes. Algumas cinzas, como a cinza de casca de arroz, apresentam atividade considerada pozolânica comprovada e, ao serem incorporadas em misturas cimentícias, geram alteração nas propriedades mecânicas das misturas, geralmente ocasionando um

aumento nas resistências à tração na flexão e à compressão. Portanto, a determinação de atividade pozolânica de um material é relevante para a definição quanto a sua utilização em misturas cimentícias.

O ensaio proposto por Luxán et al. (1989) tem como objetivo classificar a pozolanicidade de um material através da medição da condutividade elétrica durante os 120 segundos iniciais de ensaio. Com base na variação da condutividade, Luxán estabelece um modelo de classificação, conforme descrito na Tabela 03.

**Tabela 03 – Classificação da pozolanicidade de um material, segundo método de Luxán et al. (1989)**

Classificação do Material	Variação de Condutividade de acordo com o método proposto (mS/cm)
Não Pozolana	Menor que 0,40
Pozolana Variável	Entre 0,4 e 1,2
Boa Pozolana	Maior que 1,2

Através do método proposto, a medida de condutividade das cinzas analisadas resultou em 1,00 mS/cm, sendo as cinzas classificadas como pozolana variável. Considerando o comportamento das pozolanas, assim como a utilização de cinzas com atividade pozolânica na produção de cimentos, como a cinza de casca de arroz, o resultado obtido orienta o estudo para a análise da substituição de cimento Portland por cinzas de queima de biomassa, a fim de verificar esse efeito em argamassas.

O ensaio de teor de matéria orgânica, também conhecido como ensaio de teor perda ao fogo, mede a redução percentual de uma amostra de cinzas antes e depois do processo de calcinação, realizado a uma temperatura de 1000°C em estufa. O resultado obtido foi de 20,8% de perda da massa, conforme ABNT NBR NM 18:2012, que estabelece que esse valor não deve exceder 23%, sendo, portanto, considerado adequado. No entanto, quando comparado com outros estudos que avaliaram a utilização de cinzas em materiais cimentícios, como o de Teixeira et al. (2016), o valor pode ser considerado alto, já que o autor obteve um teor de perda ao fogo de aproximadamente 5%. Esse valor é superior ao de cimento e areia, como esperado, mas significativamente inferior ao resultado obtido no presente estudo.

Conforme descrito por Tafarel et al. (2016), a presença de matéria orgânica incorporada a misturas cimentícias, como concreto e argamassa, é motivo de preocupação, pois pode influenciar negativamente o processo de hidratação do cimento. Isso pode resultar num maior consumo de água, facilitar a entrada de agentes agressivos, possibilitar o desenvolvimento de manifestações patológicas e, além disso, comprometer a resistência mecânica da mistura.

Este resultado foi corroborado pela inspeção visual prévia realizada durante a manipulação da amostra, onde foi possível identificar a presença de materiais não completamente calcinados. A observação desses 'torrões' de material remanescente reforça a conclusão de que o processo de combustão da biomassa não foi concluído de forma integral, resultando em um resíduo com alta concentração de matéria orgânica. Estudos de outros autores, como os apresentados por Cabrera et al. (2020), apontam que as amostras de cinzas pesadas analisadas, oriundas da queima de biomassa, incluíam não apenas a fração grossa das cinzas produzidas no leito e câmara de combustão, mas também impurezas minerais contidas no combustível de biomassa e na escória, que não foram totalmente queimadas ao longo do processo.

Analisando os resultados obtidos através da caracterização física do material, especialmente o valor de massa volúmica específica (aproximadamente  $2,17\text{g/cm}^3$ ), pode-se constatar que as cinzas apresentam maior semelhança com o conjunto de agregados finos utilizados para a produção das argamassas (massa volúmica específica de  $2,50\text{g/cm}^3$ ) do que quando comparado ao do aglomerante, cimento CEM I 42,5 (massa volúmica específica de  $3,14\text{g/cm}^3$ ).

Keypys (2018), no seu estudo sobre a incorporação de cinzas pesadas, provenientes da queima de biomassa em leito fluidizado, ao analisar as características físicas das cinzas, obteve como valor para a massa específica volúmica específica  $2,58\text{g/cm}^3$  e classificou a amostra como agregado 0/2. Com base nesses resultados, o autor optou por utilizar as cinzas como substituto do agregado miúdo, na composição de argamassas.

Apesar da semelhança entre os materiais utilizados, tendo o autor avaliado cinzas de biomassa provenientes do mesmo processo de queima do presente artigo, optou-se aqui por analisar as cinzas como substituição do cimento Portland. Essa decisão foi tomada com base nos resultados dos ensaios de atividade pozolânica, que visaram confirmar o nível de atividade pozolânica do material. Contudo, para utilização como substituto do cimento, a amostra precisou passar por um processo de peneiração, de modo que fosse utilizada a fração de amostra com menor granulometria ( $< \text{peneiro } 0,063\text{ mm}$ ), de forma a se aproximar das dimensões das partículas do cimento, que é um material fino.

## **3.2 Propriedades das argamassas**

### **3.2.1 Propriedades no estado fresco**

Os resultados obtidos através da realização dos ensaios de determinação do índice de consistência por espalhamento, da massa volúmica e do teor de ar incorporado, executados no estado fresco das argamassas produzidas, se estão apresentados no Quadro 04.

#### Quadro 04 – Resultados de ensaios no estado fresco das argamassas

Argamassa	Cinzas (%)	Espalhamento (mm)	Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Ar (%)
Referência	0	165	2,097	8
Arg. C5	5	137	2,108	9
Arg. C10	10	144	2,080	9
Arg. C15	15	132	2,072	8
Arg. C20	20	131	2,072	10
Arg. C25	25	120	2,011	11

A análise dos dados revelou que o aumento do teor de substituição de cimento por cinzas de biomassa resulta em uma diminuição na trabalhabilidade das misturas, bem como na massa volúmica, e em um aumento do teor de ar incorporado. Especificamente, o teor máximo de substituição estabelecido no estudo, que corresponde a 25% da massa de cimento substituída por cinzas, apresentou o menor espalhamento médio das misturas (120 mm), a menor massa volúmica (2,011 g/cm<sup>3</sup>) e o maior teor de ar incorporado (11%).

Esses resultados podem ser explicados pelas características das cinzas de biomassa utilizadas. Segundo Teixeira et al. (2016), a irregularidade das partículas das cinzas contribui para a redução da trabalhabilidade das misturas. Essa observação é corroborada por outros estudos, como o de Bumrongjaroen (1999), que indicam que a redução na massa volúmica e no espalhamento médio está diretamente relacionada à taxa de incorporação de resíduos, o que gera um aumento no teor de finos das misturas. Bumrongjaroen (1999) destaca que esse efeito está vinculado à granulometria e ao módulo de finura das cinzas utilizadas.

A presença de material orgânico nas cinzas também exerce influência na trabalhabilidade da mistura, promovendo a absorção de moléculas de água, o que contribui para a diminuição do espalhamento (Teixeira et al, 2016).

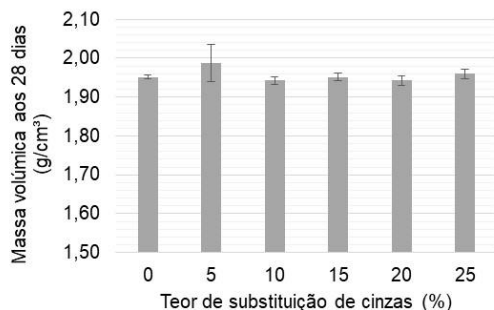
Para manter a trabalhabilidade em misturas cimentícias com diferentes teores de substituição de cimento por cinzas pesadas de biomassa, Cabrera et al (2020) sugere a incorporação de aditivos superplastificantes.

#### 3.2.2 Propriedades no estado endurecido

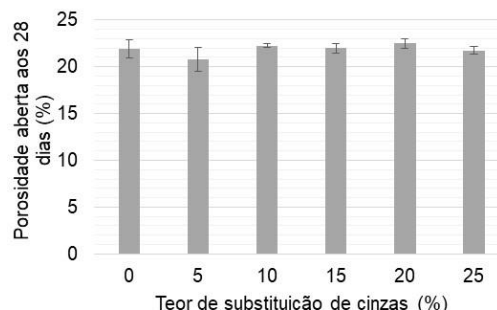
Os resultados dos ensaios de determinação da massa volúmica e da porosidade aberta estão apresentados na Figura 02 e Figura 03, respectivamente.

Aos 28 dias, a argamassa C5 apresentou a maior massa volúmica e menor porosidade aberta, enquanto a argamassa C20 possuiu a menor massa volúmica e a porosidade aberta mais elevada.

Em geral, observou-se um aumento na massa volúmica com o tempo, particularmente em algumas argamassas como a C10, sugerindo uma densificação progressiva. A variação na porosidade entre as argamassas indica que as estruturas internas das misturas sofreram alterações, as tornando menos densas e possivelmente mais permeáveis.

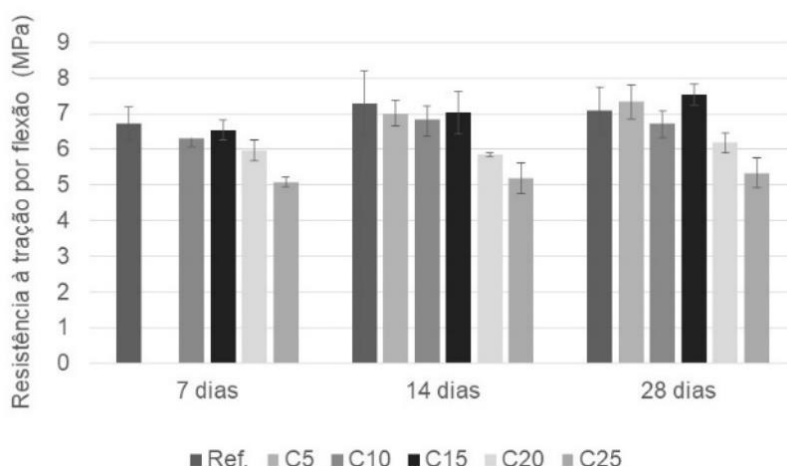


**Figura 02 - Massa volúmica aparente média aos 28 dias**



**Figura 03 - Porosidade aberta média aos 28 dias**

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias são apresentados na Figura 04 e Figura 05, respectivamente.



**Figura 04 - Resistência à tração por flexão das argamassas aos 7, 14 e 28 dias de idade**

A resistência à tração por flexão das argamassas variou com o tempo e o teor de substituição de cinzas. Aos 7 dias, a argamassa C15 apresentou a maior resistência, enquanto a C25 exibiu a menor. De modo geral, houve uma tendência de redução da resistência com o aumento da substituição de cinzas, exceto para a argamassa C15, que superou a C10, mas ficou abaixo da argamassa de referência.

Os resultados obtidos apresentam grau de concordância com os estudos de Teixeira et al. (2016) que constataram que, as argamassas contendo cinzas apresentaram valores inferiores de resistência à tração na flexão nas idades iniciais de cura, quando comparadas à argamassa de

referência, observando uma redução significativa na resistência para as argamassas com maior teor de cinzas de biomassa.

Aos 14 dias de idade, a argamassa REF e a C15 mantiveram as resistências mais elevadas. A adição de cinzas parece ter impactado negativamente ou até mesmo não ter influenciado a resistência à tração, como observado nas argamassas C20 e C25, que apresentaram resistências menores em comparação com as de menor teor de cinzas, C5 e C15.

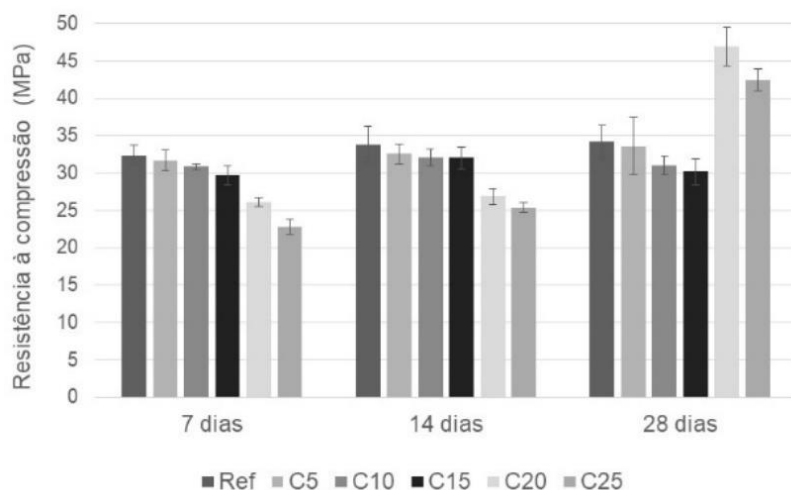
Já aos 28 dias, a maior resistência média à tração foi registrada para a argamassa C15, seguida pela argamassa C5. A tendência observada indicou que, com o aumento da substituição de cimento por cinzas, houve uma redução da resistência, sendo a argamassa C25, com maior teor de substituição, a que apresentou a menor resistência. Embora exista a possibilidade de melhoria ou estabilidade inicial da resistência com a substituição de cinzas, pode-se concluir que há uma tendência de redução em níveis mais elevados de substituição, especialmente nas amostras C20 e C25.

Ao contrário de Teixeira et al. (2016) que relataram que, nos períodos de cura de 7, 28 e 90 dias, as argamassas com 20% de cinzas volantes apresentaram resistência à flexão ligeiramente inferior à da argamassa referência. Verificou, no entanto, aos 180 dias, que a argamassa com 20% de cinzas superou o valor da referência.

A análise estatística dos resultados da resistência à compressão das argamassas revelou uma relação entre o teor de substituição de cinzas em uma mesma idade e também ao longo do tempo de cura. Em primeiro momento, ao realizar os teste de Shapiro-Wilk, foi possível identificar evidências suficientes de que os dados não seguem uma distribuição normal ( $\text{valor-p} < 0,05$ ). Sendo assim, para atender aos critérios de normalidade necessários para realização dos testes de correlação, como de Pearson e Spearman, e a análise de variância (ANOVA) foi realizada a transformação de Box-Cox, para estabilização da variância e preparação dos dados para as demais análises.

Os resultados de valor-p obtidos através da ANOVA, indicaram que tanto o teor de cinzas, quanto o tempo de cura têm um efeito significativo na resistência à compressão, bem como a existência de uma interação entre eles. Já através dos testes de correlação de Pearson e Spearman, pode-se analisar como o teor de cinza afetou a resistência à compressão das argamassas ao longo do tempo (Figura 05).

Aos 7 dias, pode-se verificar uma correlação negativa forte, a qual sugere que maiores teores de cinza estão associados a uma redução significativa da resistência à compressão, podendo indicar que o aumento do teor de cinzas tem um efeito prejudicial notável na resistência inicial das argamassas.



**Figura 05 - Resistência à compressão das argamassas aos 7, 14 e 28 dias de idade**

Aos 14 dias, a correlação negativa manteve-se forte, embora levemente inferior do que aos 7 dias. Os resultados estão de acordo com os valores levantados por Cabrera et al. (2020), que ao realizarem revisão de artigos científicos sobre a utilização de cinzas pesadas provenientes da queima de biomassa em materiais à base de cimento destacaram que, para as amostras analisadas pelos diferentes autores, a incorporação de cinzas na fabricação de betões, e conseqüentemente de argamassas, implicou em um comportamento mecânico inferior aos das amostras de referência (sem utilização de cinza). Os autores explicam essa diminuição nos valores de resistência à compressão e a tração, afirmando que o comportamento mecânico das misturas contendo resíduo estaria diretamente relacionado com a aplicação da mistura no estudo (revestimento, estrutural, entre outros), aos agregados utilizados, e ao tipo de substituição de materiais, como a utilização de cinzas como substituto do cimento ou do agregado natural.

Contudo, aos 28 dias a correlação se torna positiva, indicando uma mudança na relação entre o teor de cinzas e a resistência à compressão. Em vez de uma relação negativa como das idades anteriores, a correlação positiva obtida para a idade mais avançada sugere que um aumento no teor de cinzas, ao longo prazo, pode apresentar um efeito positivo, ou menos prejudicial, na resistência à compressão das argamassas, como pode ser percebido pelos valores de resistências das argamassa C20 e C25, que apresentaram um aumento significativo em relação às idades anteriores e também em relação à argamassa de referência.

É importante destacar que, entre os maiores teores, a argamassa C20 destacou-se, alcançando o maior valor médio de resistência. Também os estudos de Tkaczewska e Małolepszy (2009) constataram que argamassas com 20% de substituição do cimento por cinzas apresentaram os melhores resultados quando comparado com a argamassa de referência, utilizando deste resultado para atestar o comportamento pozolânico das cinzas.

O aumento dos valores de resistência à compressão das argamassas observado neste estudo pode ser interpretado como uma evidência da atividade pozolânica significativa das cinzas utilizadas. Isso ocorre porque materiais pozolânicos têm pouca influência nas propriedades mecânicas das misturas para idades iniciais de curas, mas promovem um aumento da resistência à compressão das argamassas com o prolongamento do tempo de cura (Tkaczewska e Matolepszy, 2009).

#### **4 CONCLUSÃO**

A substituição de cimento Portland por cinzas de queima de biomassa influencia as propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas de revestimento.

O aumento na substituição de cimento por cinzas conduziu, no estado fresco das misturas, a uma diminuição da trabalhabilidade e da massa volúmica e a um aumento do teor de ar incorporado nas argamassas. Já no estado endurecido, nas idades iniciais gerou uma diminuição nas resistências mecânicas, que foi revertida nas idades mais avançadas, com a argamassa com 20% de substituição atingindo um valor de resistência à compressão superior a argamassa de referência (sem cinzas) aos 28 dias, comprovando um certo grau de pozolanicidade das cinzas estudadas.

Através da caracterização das cinzas e dos resultados obtidos em argamassas, é possível concluir que a incorporação das cinzas de queima de biomassa em leito fluidizado em argamassa aparenta ser viável.

Sendo assim, tornam-se necessários novos estudos, nomeadamente: A composição química e demais características das cinzas, assim como a avaliação na possibilidade de tratamento das mesmas, como pelo processo de moagem, por exemplo; Quanto a forma de incorporação das cinzas nas misturas, como substituta do cimento ou dos agregados, considerando as características físicas semelhantes aos agregados miúdos; Quanto da dosagem de argamassas com cinzas para diferentes tipos de aplicações, com a utilização de adições e aditivos as misturas.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Instituto Politécnico de Setúbal pelo apoio ao Projeto interno ARSus – Argamassas de Revestimento Sustentáveis e à *The Navigator Company* pela disponibilização das matérias residuais - cinzas.

#### **REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise Química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, p. 14. 2012;



AL-GHOUTI, M.A. et al.. **Recent advances and applications of municipal solid wastes bottom and fly ashes: Insights into sustainable management and conservation of resources.** Environmental Technology & Innovation, 21, p.101267, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186420315674>;

BUMRONGJAROEN, W.. **Utilization of processed fly ash in mortar.** Dissertation (Doctor of Philosophy in Environmental Engineering) - Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology. New Jersey, p. 967. 1999. Disponível em: <<https://digitalcommons.njit.edu/dissertations/967>>;

CABRERA, M. et al.. **Eco-Efficient Cement-Based Materials Using Biomass Bottom Ash: A Review.** Applied Sciences, MDPI, Volume 10, nº 22, 2020. DOI:<https://doi.org/10.3390/app10228026>;

D'ADAMO, I. et al.. **Assessing the relation between waste management policies and circular economy goals.** Waste Management, Volume 154, 2022, Pages 27-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.031>;

NP EN 196-1, 2006. **Métodos de ensaio de cimentos : parte 1 : determinação das resistências mecânicas.** Instituto Português da Qualidade;

NP EN 196-2, 2013. **Métodos de ensaio de cimentos - Parte 2 : Análise química dos cimentos.** Instituto Português da Qualidade;

NP EN 1097-3, 2002. **Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios.** Instituto Português da Qualidade;

NP EN 1097-6, 2003. **Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.** Instituto Português da Qualidade;

EN 1015-3, 1999. **Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).** CEN: Brussels.

EN 1015-6, 1999. **Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar.** CEN: Brussels.

EN 1015-7, 1999. **Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar.** CEN: Brussels.

EN 1015-11, 2019. **Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.** CEN: Brussels.

GOSH, A. et al.. **Reuse of fly ash and bottom ash in mortars with improved thermal conductivity performance for buildings.** Heliyon Research Article, Volume 4, Issue 11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016%2Fj.heliyon.2018.e00934>;

KEPYS, W.. **Bottom ash obtained from biomass burning in fluidised-bed boilers as a mortar component.** 3rd International Conference on Energy

and Environmental Protection, Hebron, State of Palestine, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184600009>;

KHAN, S. et al.. **Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives**. Chemosphere, Volume 8, Part. I, fev. 2022. Disponível em: <https://shorturl.at/MuDVh>;

LI, X. et al.. **A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications**. Journal of Building Engineering, Volume 45, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103447>;

LUXÁN, M.P. et al.. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement**. Cement and Concrete Research, Volume 19, Issue 1, p. 63-68, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90066-5);

NANDA, S., BERRUTI, F.. **Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review**. Environ Chem Lett 19, 1433–1456 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>;

SAXENA, G. et al.. **Phytoremediation of heavy metal-contaminated sites: eco-environmental concerns, field studies, sustainability issues, and future prospects**. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Volume 249, pp.71-131, 2020. Disponível em: <https://shorturl.at/vdBdk>;

TAFAREL, N. F. et al.. **Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, n. 4, p. 974–986, out. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/GgR9NvqtH7KBQyH5KGZJJKQ/#>;

TANG, Z. et al.. **Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials**. Resources, Conservation & Recycling: X, Volume 6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>;

TARELHO, L.A.C. et al.. **Characteristics, management and applications of ashes from thermochemical conversion of biomass to energy in World Bioenergy**. 20th European Biomass Conference & Exhibition, Milano, Italy, 2012. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/281712252\\_Characteristics\\_management\\_and\\_applications\\_of\\_ashes\\_from\\_thermochemical\\_conversion\\_of\\_biomass\\_to\\_energy](https://www.researchgate.net/publication/281712252_Characteristics_management_and_applications_of_ashes_from_thermochemical_conversion_of_biomass_to_energy);

TEIXEIRA, E. et al.. **Incorporação de cinzas de biomassa como substituto do cimento em argamassas**. II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2016. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/43200/1/2483-2.9\\_VF.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/43200/1/2483-2.9_VF.pdf);

TKACZEWSKA, E., MALOLEPSZY, J.. Hydration of coal-biomass fly ash cement. **Construction Building Materials**, Volume 23, nº 7, pp. 2694–2700, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.018>.



## **DETERMINATION OF AN ANALYTICAL EXPRESSION FOR CHART RT (WMAPT) USING EVOLUTIONARY POLYNOMIAL REGRESSION**

GARDETE, DINIS (1); LUZIA, ROSA (2); CAPITÃO, SILVINO (3); PICADO-SANTOS, LUÍS (4)

(1) INSTITUTO POLITÉCNICO DE CASTELO BRANCO, E-MAIL: [DGARDETE@PCB.PT](mailto:DGARDETE@PCB.PT)

(2) INSTITUTO POLITÉCNICO DE CASTELO BRANCO, E-MAIL: [RLUZIA@PCB.PT](mailto:RLUZIA@PCB.PT)

(3) CERIS, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, LISBOA & INSTITUTO POLITÉCNICO DE COIMBRA, INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA, E-MAIL: [CAPITAO@ISEC.PT](mailto:CAPITAO@ISEC.PT)

(4) CERIS, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, E-MAIL: [LUISPICADOSANTOS@TECNICO.U LISBOA.PT](mailto:LUISPICADOSANTOS@TECNICO.U LISBOA.PT)

### **ABSTRACT**

*The Shell Pavement Design Manual was published in 1978. Nevertheless, the method and its procedures are still currently used by many road administrations. Among the charts presented in the Manual is Chart RT, intended to determine the equivalent pavement temperature for pavement design (WMAPT). Temperature is a key factor in asphalt pavement design because it influences the viscosity of the bitumen, which has a thermoplastic behaviour. Thus, effective pavement temperature has a substantial impact on the design results. However, there are no mathematical expressions disseminated to analytical substitute the use of Chart RT. In this work, the Evolutionary Polynomial Regression (EPR) was used to generate mathematical models that can simulate the results from Chart RT. EPR is a hybrid modelling technique which combines linear regression and evolutionary search for mathematical model structures. The software, MO-EPR, returns a set of mathematical expressions which are the best in fitting training data at different levels of parsimony (i.e., number of coefficients and dimensionless groups). Thus, a training and testing data set was obtained from Chart RT. This data was used to generate a set of models using several structures and functions. The fitting of the models was evaluated, a residuals analysis was carried out, and the homoscedasticity was assessed. From this analysis, a mathematical model with suitable levels of fit and parsimony is proposed to be used for the analytical determination of the equivalent pavement temperature.*

**Keywords:** Evolutionary Polynomial Regression, Pavement Design, Equivalent Temperature WMAPT.

## RESUMO

O Manual da Shell para dimensionamento de pavimentos, Shell Pavement Design Manual, foi publicado em 1978. No entanto, o método e os seus procedimentos ainda são utilizados atualmente por muitas administrações rodoviárias. Entre os ábacos incluídos no Manual está o designado Chart RT, destinado a determinar a temperatura equivalente do pavimento para dimensionamento (WMAPT). A temperatura é um fator chave no dimensionamento dos pavimentos betuminosos porque influencia a viscosidade do betume, que tem comportamento termoplástico. Assim, a temperatura equivalente do pavimento tem um impacto substancial nos resultados do dimensionamento. Contudo, não existem expressões matemáticas disseminadas que possam ser utilizadas para substituir analiticamente a utilização do Chart RT. Neste trabalho foi utilizada a Regressão Polinomial Evolutiva (RPE) para gerar modelos matemáticos que possam simular os resultados obtidos do Chart RT. A RPE é uma técnica de modelação híbrida que combina a regressão linear e a procura evolutiva de estruturas de modelos matemáticos. O software, MO-EPR, gera um conjunto de expressões matemáticas que são as melhores no ajuste da informação de treino com diferentes níveis de parcimónia (ou seja, número de coeficientes e grupos adimensionais). Deste modo, um conjunto de dados de treino e dados de verificação foi obtido do Chart RT. Esses dados foram utilizados para gerar um conjunto de modelos utilizando diversas estruturas e funções. Foi avaliado o ajuste dos modelos, realizada uma análise de resíduos e avaliada a sua homocedasticidade. A partir desta análise é proposto um modelo matemático, com níveis adequados de ajuste e parcimónia, para ser utilizado na determinação analítica da temperatura equivalente do pavimento.

**Palavras-chave:** Regressão Polinomial Evolutiva, Dimensionamento de Pavimentos, Temperatura Equivalente WMAPT.

## 1 INTRODUCTION

This paper focuses on using Evolutionary Polynomial Regression (EPR), a modelling methodology proposed by Giustolisi and Savic (2006, 2009), to generate an analytical expression to substitute the use of Chart RT. EPR is a hybrid modelling technique that combines linear regression and evolutionary search for mathematical model structures. Thus, EPR works as a two-stage model that (1) searches model structures based on a Genetic Algorithm and (2) estimates their parameters based on linear optimisation (Doglioni et al., 2010). At the end of the run, EPR returns a set of "optimal" model expressions (i.e., the Pareto front of models), which are the best in fitting training data at different levels of parsimony, i.e. number of coefficients and dimensionless groups (Laucelli and Giustolisi, 2011). Therefore, this modelling technique has the advantage of being able to avoid excessive model complexity. Expressions are automatically ranked according to both their goodness of fit and complexity. The use of parsimonious models contributes to a straightforward use of the models

and can give a better physical understanding of the models (Laucelli and Giustolisi, 2011). EPR has been previously used to obtain mathematical expressions for more complex problems such as the Colebrook-White friction factor (Giustolisi et al., 2011) or rubber concrete behaviour (Ahangar-Asr et al. 2011). This work used the implementation of EPR available in the software EPR MOGA-XL (Giustolisi and Savic, 2006); however, some alternatives and improvements of this methodology have been proposed (Li et al., 2023).

Bitumen has a thermoplastic behaviour. Hence, temperature is essential in asphalt pavement performance since it influences the viscosity of the bitumen. Bitumen becomes softer, less viscous at higher temperatures, and stiffer at lower temperatures. Distresses such as permanent deformation on the bituminous mixtures or low-temperature cracking can be associated with high or low temperatures (Gardete et al., 2018; Zaumanis et al., 2018). Because of the change in the viscosity of the bitumen, bituminous mixtures are stiffer, with higher elastic modulus at low temperatures, and more deformable, with lower elastic modulus at higher temperatures. For the same traffic and construction conditions a pavement in a hot zone will need more thickness because it will have higher deformation when subjected to traffic loading (Kumlai et al. 2017, Hasan and Tarefder, 2018). Hence, the in-service temperature of the pavement is a critical factor in flexible pavement design (Sreejith, 2021).

The Shell Pavement Design Manual was published in 1978 (Shell, 1978). The manual includes charts to be used to design flexible pavements and overlays. Whilst the foundation of this design method has some time, the technique and some of its procedures are still currently used (INIR, 2009; Austroads 2017). Among the charts found in the Manual, there are some intended to determine the effective pavement temperature for the design. A chart that is used in the determination of this temperature is Chart RT. This chart allows us to determine the weighted mean annual pavement temperature (WMAPT) as a function of the weighted mean annual air temperature (WMAAT) and the asphalt thickness (Figure 1). Although this chart is still used, an analytical expression is not commonly referred to in literature. Some authors and guides usually refer to an expression for 100 mm of asphalt thickness, Equation 1 (Sreejith, 2021; Austroads 2017).

$$WMAPT = -12.4 + \frac{6.32 \times WMAAT}{\ln(WMAAT)} \quad (1)$$

where, WMAPT = weighted mean annual pavement temperature (°C);  
WMAAT = weighted mean annual air temperature (°C).

This work proposes an analytical expression to substitute Chart RT generated using EPR. The aim is to generate a single expression that can be used for the complete range of temperature and asphalt thickness

present in Chart RT. EPR was selected because it creates the structure of the model and number of terms, which are not previously defined by the user. However, the exponents used in the models are chosen from a user-defined set. Also, different models can be generated, considering the fit and parsimony of the models.

## 2 EVOLUTIONARY POLYNOMIAL REGRESSION

EPR aims to achieve polynomial expressions that could represent a system by searching for the exponents of a polynomial function with a fixed maximum number of terms. During one execution, it returns expressions with increasing numbers of terms up to a limit set by the user to allow the desired number of terms to be selected. The general form of expression used in EPR can be presented as in Equation 2 (Rezania et al., 2008, Giustolisi and Savic, 2006).

$$y = \sum_{j=1}^m F(X, f(X), a_j) + a_0 \quad (2)$$

where,  $y$  = estimated value.  
 $F$  = expression generated in the process  
 $X$  = matrix of input variables  
 $f$  = function selected by the user  
 $m$  = number of terms of the expression  
 $a_j$  = adjustable parameters  
 $a_0$  = optional bias

The first step in the identification of the model structure is to transfer Equation 2 into the vector form, Equation 3 (Rezania et al., 2008, Giustolisi and Savic, 2006):

$$Y_{N \times 1}(\theta, Z) = [I_{N \times 1} Z_{N \times m}^j] \times [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_m]^T = Z_{N \times d} \times \theta_{d \times 1}^T \quad (3)$$

where,  $Y_{N \times 1}(\theta, Z)$  = is the least-squares (LS) estimate vector of the N target values.  
 $\theta_{d \times 1}$  = vector of  $d = m + 1$  adjustable parameters  $a_j$  ( $j = 1:m$ ) and  $a_0$   
 $Z_{N \times d}$  = matrix formed by 1 (unitary vector) for bias  $a_0$ , and  $m$  vectors of variables  $Z_i$ .  
 $Z^j$  = For a fixed  $j$  is a product of the independent predictor vectors of inputs.

In general, EPR is a two-stage technique for constructing symbolic models. In the first stage, a standard genetic algorithm (GA) searches for the best form of the function structure, i.e., a combination of vectors of independent inputs. The second stage performs a least square (LS)

regression to find the adjustable parameters,  $\theta$ , for each combination of inputs. This way, a global search algorithm is implemented for both the best set of input combinations and related exponents simultaneously, according to the user-defined cost function (Rezania et al., 2008, Giustolisi and Savic, 2006).

The matrix of inputs is shown in Equation 4.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2k} \\ x_{31} & x_{23} & x_{33} & \cdots & x_{3k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{N1} & x_{N2} & x_{N3} & \cdots & x_{Nk} \end{bmatrix} = [X_1 \quad X_2 \quad X_3 \quad \cdots \quad X_k] \quad (4)$$

where,  $X$  = matrix of inputs.  
 $x_{ij}$  = candidate variables for matrices  $Z^j$ .

Therefore,  $Z^j$  in Equation 3 can be write as in Equation 5.

$$Z_{N \times 1}^j = [(X_1)^{ES(j,1)} \cdot (X_2)^{ES(j,2)} \cdot (X_3)^{ES(j,3)} \cdots (X_k)^{ES(j,k)}] \quad \forall j = 1 \cdots m \quad (5)$$

where,  $Z_{N \times 1}^j$  = is the  $j$ th vector whose elements are products of candidate independent inputs.  
 $ES$  = is a matrix of exponents.  
 $X_i$  = vectors of inputs.

The aim is to find the matrix  $ES_{k \times m}$  of exponents whose elements can assume values within a user-defined set (Rezania et al., 2008, Giustolisi and Savic, 2006). Thus, each exponent in  $ES$  corresponds to a value from the user-defined vector  $EX$ . Also, each row of  $ES$  determines the exponents of the candidate variables of the  $j$ th term in Equations 2 and 3.

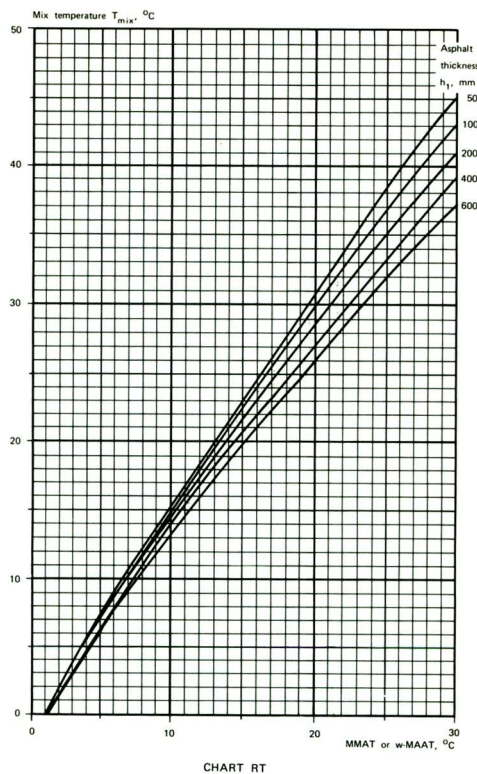
Constants  $a_i$  are evaluated using the linear LS method based on the minimisation of the sum of squared errors (SSE) as the cost function, and of the exponents in  $ES$  corresponds to a value from the user-defined vector  $EX$ . This allows the transformation of the symbolic regression problem into one of finding the best  $ES$ , i.e. the best structure of the EPR equation. The global search for the best form of the structure of the equation is performed using a standard GA over the values in the user-defined vector of exponents,  $EX$  (Rezania et al., 2008, Giustolisi and Savic, 2006). One of the major advantages is that the user does not have to specify the form of the regression model in advance.

### 3 MODEL GENERATION

The objective was to achieve a simple mathematical expression with a good fit across the range of values defined in Chart RT. The lines in Chart RT define this range, i.e. weighted mean annual air temperature from 2°C to 30°C and asphalt thickness from 50 mm to 600 mm (Figure 1).

To generate the model, 145 points were determined from the chart and used as training data. The values were taken for each temperature value and for each thickness line. The values were obtained by visual reading. A scan of the chart was made and used to collect the data. Care was made to try and minimize reading errors. Nevertheless, at some degree WMAAT values were affected by reading errors. It should also be mentioned that the training data do not constitute a random data set, but it was used as it gave full coverage of Chart RT.

**Figure 1 – Chart RT**



**Source:** SHELL (1978)

It used a set of candidate exponents that could encompass the expected relations between variables; 13 values were used for exponents: 0, -0.25, 0.25, 0.5, -0.5, 1, -1, 1.5, -1.5, 2, -2, 3, -3. It was observed that using opposite sign exponents is unnecessary as EPR can create expressions that could surpass this issue. EPR MOGA-XL has options to include several mathematical functions in the models. These are called inner functions and can be logarithmic, exponential, tangent hyperbolic or secant hyperbolic. One attractive advantage of EPR is that the software



generates the terms, and no previous expression format is needed. The software generates several models according to the user options and gives information on the fit of the models. A specified number of models can be generated with an increasing number of terms; more terms correspond to more complexity but also better fit.

The generated models were assessed for their parsimony and fit. In a first approach for each of the inner function options, the simplest model that included both dependent variables, asphalt thickness and WMAAT, was selected. These models are presented in Table 1. The CoD (Coefficient of Determination) is offered for the training data. CoD represents the proportion of variance explained by the model and measures how well the estimated values match the original values.

**Table 1 - Generated models for WMAPT**

Model	Expression	CoD
1	$1.8959 \times WMAAT - 0.022212 \times t^{0.25} \times WMAAT^{1.5} - 1.8503$	99.96
2	$1.5142 \times WMAAT - 0.93947 \times \ln(t^{0.25} \times WMAAT^{1.5}) + 3.1382$	98.05
3	$\exp\left(0.042289 \times \frac{WMAAT}{t^{0.25}} - 5.8661 \times \frac{1}{WMAAT^{0.25}} + 5.9148\right)$	99.81
4	$\tan\left(0.0012548 \times \frac{WMAAT}{t^{0.25}} - 1.4194 \times \frac{1}{WMAAT^{1.5}} + 1.5448\right)$	99.59
5	$8.7125 \times WMAAT \times \frac{1}{\ln(t+1)^{0.25} \times \ln(WMAAT+1)} - 9.4722$	99.82
6	$1.5584 \times WMAAT - 1.8184 \times 10^{-5} \times t \times WMAAT^2 - 0.82827$	99.79
7	$1.0601 \times WMAAT \times \exp\left(\frac{1}{t^{0.25}}\right) + 0.091807$	99.74
8	$1.8069 \times WMAAT \times \tanh(WMAAT)^3 - 0.10773 \times t^{0.25} \times WMAAT \times \tanh(t)^{-0.5} \times \tanh(WMAAT)^{-3} + 0.1678$	99.84
9	$1.3997 \times WMAAT + 21635.6341 \times \tanh(t^{0.25} \times WMAAT) - 21635.5145$	97.95
10	$1.3899 \times WMAAT \times \tanh\left(\frac{WMAAT^{1.5}}{t^{0.25}}\right) + 0.32971$	98.02
11	$0.050794 \times t^{0.25} \times WMAAT^{1.5} * \operatorname{sech}(t^{-0.5}) + 8.8794$	74.10
Where: WMAAT - Weighted Mean Annual Air Temperature (°C) t - Asphalt Thickness (mm) CoD - Coefficient of Determination		

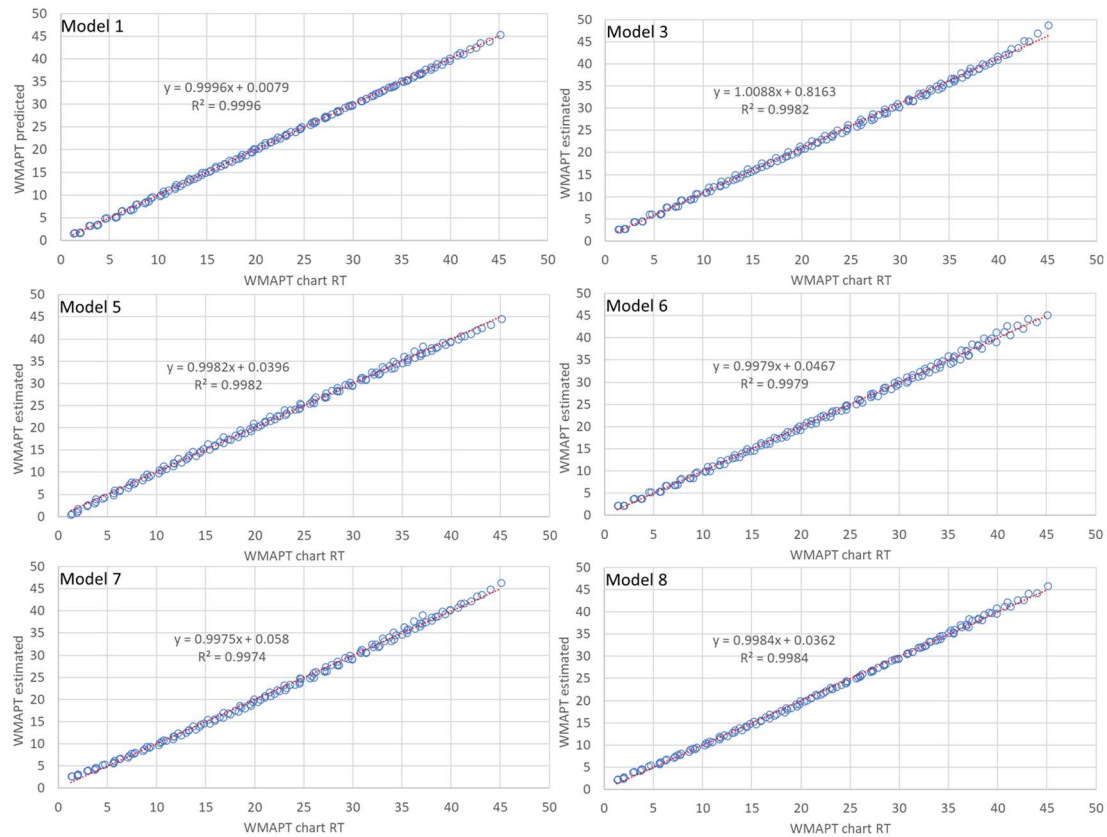
## 4 GENERATED MODELS ANALYSIS

### 4.1 Fit analysis

Figure 2 presents the fit of 6 models. The models were selected because of their high COD. Some models achieve a CoD higher than 0.9950,

indicating a good fit to the training data. The highest CoD was 0.9996 for model 1. As a comparison, the model given by Equation 1 achieves a CoD of 0.9977 for the corresponding training data (data for an asphalt thickness of 100 mm).

**Figure 2 – Fit for generated Models (1), (3), (5), (6), (7) and (8)**



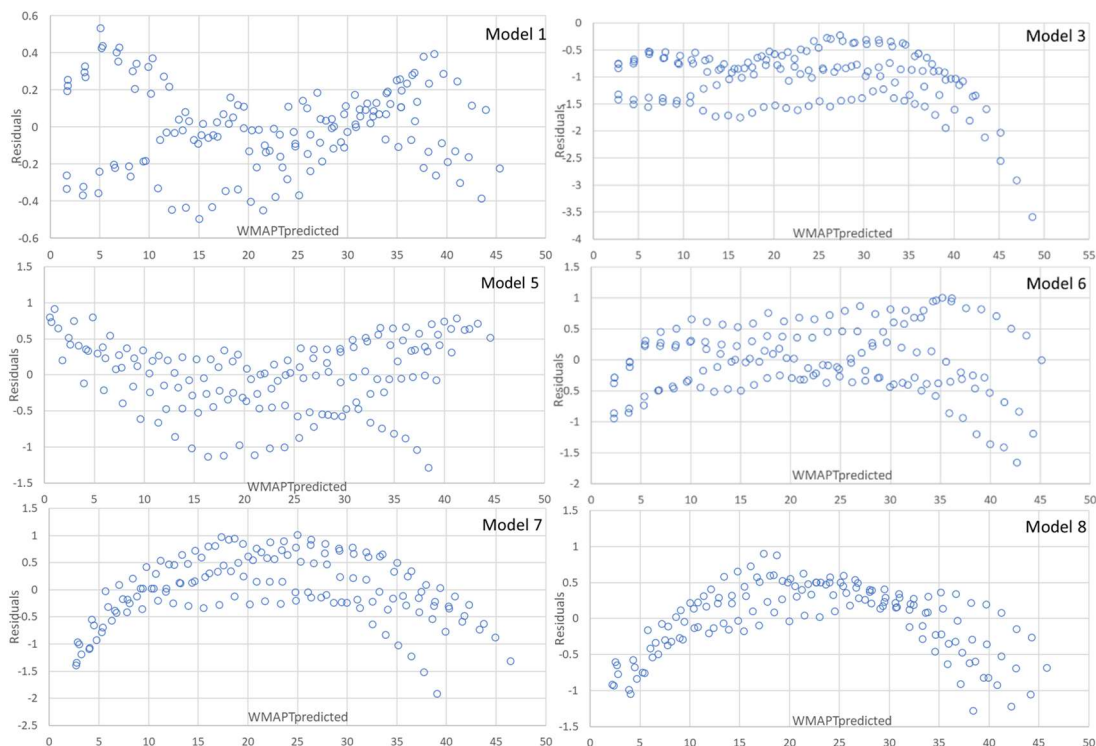
## 4.2 Residuals Analysis

The gap between the original value of the dependent variable and the estimated value is known as the residual. Residuals should be statistically independently distributed (independence), normally distributed with zero mean (normality), have the same variance (homoscedasticity), and there should be no correlation between independent variables (Multicollinearity) (Suleiman et al., 2015). Thus, residuals should be randomly distributed not showing any pattern; residuals should be small and spread around zero constantly throughout the range (Elsayir, 2019). A graphic analysis can be helpful to find any type of pattern in the residuals. The residuals for the models with the highest CoDs are presented in Figure 3.

Normality was examined graphically using normal probability plots (Q-Q plots). All model residuals followed a normal distribution with some minor deviations at the tails. Residuals are smaller for Model 1, with values mostly lower than  $\pm 0.4^\circ\text{C}$  throughout the range. In some models' higher residuals were observed in the lower and higher ranges of temperatures (WMAPT below  $10^\circ\text{C}$  and above  $35^\circ\text{C}$ ). The graphic analysis shows patterns in

residual plots in some models. It can be seen in Figure 3 that residuals from Model 7 and Model 8 show an inverted U shape. Model 3 residuals do not distribute around zero. Models 1, 5 and 6 seem to have a more random distribution. Breusch-Pagan and White's tests were performed to evaluate the homoscedasticity of the residuals (Onifade and Olanrewaju, 2020; Uyanto, 2022). White test was more restrictive and only for Model 5 did the White test indicate homoscedasticity. Breusch-Pagan test indicated homoscedasticity for Model 5 and Model 7.

**Figure 3 – Residuals for generated models (1), (3), (5), (6), (7) and (8)**



### 4.3 Testing data

A set of 50 random points was used to analyse the fit of the most promising models (Models 1, 5, 6, 7). This data set was generated as a random data set with WMAAT from 2°C to 30°C and asphalt thickness from 50 mm to 600 mm. This testing data set intended to analyse the fit of the models using intermediate values for the asphalt thickness. This required more care collecting the data, but it also tested the robustness of the models.

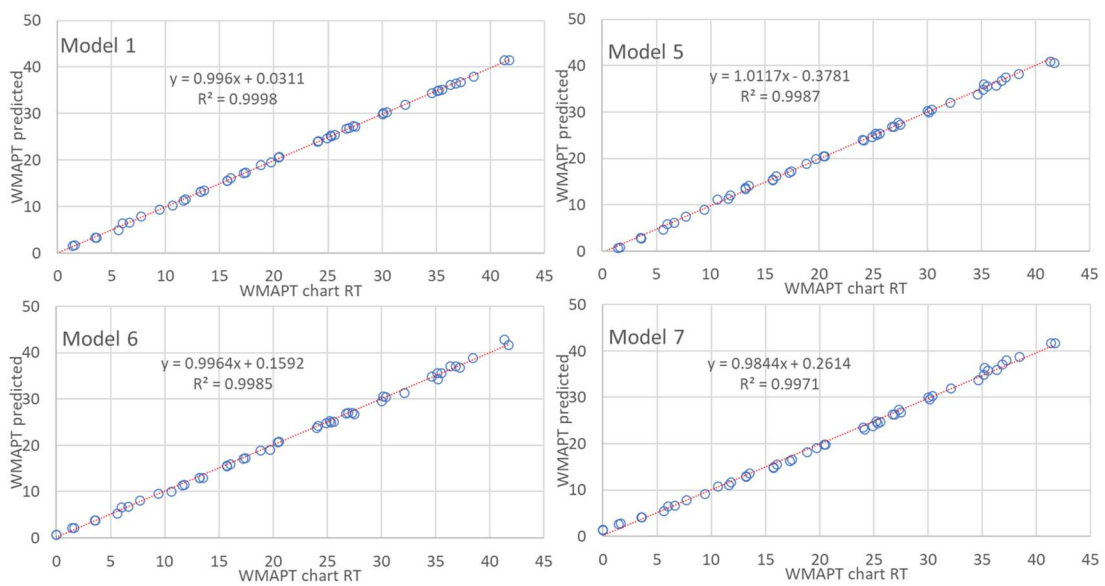
Results are presented in Figure 4 and Figure 5. Model 1 achieved higher CoD and lower residuals. Model 5 gave good results, and for common pavement design temperatures (20°C-35°C) the residuals were below  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . However, outside this temperature interval, residuals are higher. Results for models 6 and 7 show higher residuals.

## 5 DATA DISCUSSION AND MODEL ANALYSIS

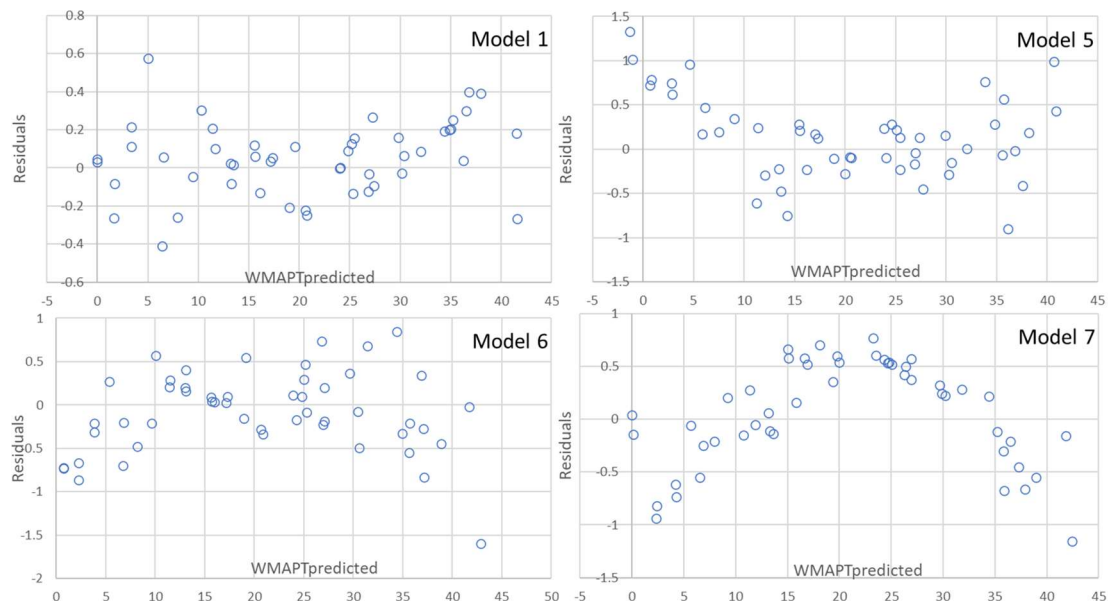
Using data collected from Chart RT (145 points), 11 models were generated using several structures and mathematical functions in EPR.

Most models did exhibit a good fit and low residuals. However, Model 1 presented the best fit overall. Whereas the White test did indicate heteroscedasticity, in a graphic analysis, residuals do not show a clear trend and have a relatively good dispersion throughout the range. The parsimony of the model is acceptable with an expression that does not pose calculation complexity. The testing data confirmed these results. Model 1 also has the advantage of not including less common mathematical functions or functions that could introduce limitations in the domain, leading to computation errors. Therefore, Model 1 is recommended as an expression to analytical substitute Chart RT, Equation 6.

**Figure 4 – Fit for testing data for generated models (1), (5), (6), (7)**



**Figure 5 – Residuals for testing data; generated models (1), (5), (6), (7)**



$$WMAPT = 1.8959 \times WMAAT - 0.022212 \times t^{0.25} \times WMAAT^{1.5} - 1.8503 \quad (6)$$

where, WMAPT = weighted mean annual pavement temperature (°C);  
WMAAT = weighted mean annual air temperature (°C);  
t = Asphalt thickness (mm).

As previously mentioned, the software MOGA-XL can create a set of models with increased complexity and better fit. The model generated for the same conditions as Model 1, Equation 6, but adding one step more complexity is represented in Equation 7. This is an example of how EPR generates models increasing the number of terms to achieve better fit. The increase in complexity makes the expression less appealing to use and does not significantly improve the fit (CoD = 0.9996), but it slightly lowers the residuals and can be used if this extra accuracy is needed (for the training data, the average of the absolute values of the residuals decreases from 0.1798 to 0.1299).

$$WMAPT = 1.8468 \times WMAAT - 0.020269 \times t^{0.25} \times WMAAT^{1.5} - 0.0019278 \times t \times WMAAT^{-0.25} - 1.3093 \quad (7)$$

where, WMAPT = weighted mean annual pavement temperature (°C);  
WMAAT = weighted mean annual air temperature (°C);  
t = thickness (mm).

## 6 CONCLUSIONS

This work attained a single analytical expression to replace the use of Chart RT. The generated model can be used to analytically substitute the use of chart RT with a satisfactory level of accuracy in a large range of temperatures (WMAAT from 2°C to 30°C) and asphalt thickness (5 mm to 600 mm). EPR generated a set of models from which 11 were selected for further analysis. The ability to create models with increased complexity provides an interesting feature for this task. The proposed model is easy to use and does not introduce complex mathematical functions. The selected model provides a good fit (CoD = 0.9996 for the training data), and the residuals are low and dispersed throughout the range. However, the Breusch-Pagan and White tests did indicate heteroscedasticity for this model. An analysis of the proposed models' residuals shows that in most cases, the expected errors could be acceptable and not higher than what could be expected when reading values in the chart (for the 50 points of the testing data in 33, the error was lower than ±0.2°C). Furthermore, the accuracy of the proposed model is higher on the most common range of temperatures (WMAAT above 10°C and below 35 °C).

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge all at IDEA-RT for providing the software EPR MOGA-XL and for their inestimable attention and help.

## REFERENCES

AHANGAR-ASR, A., FARAMARZI, A., JAVADI, A., GIUSTOLISI, O. Modelling mechanical behaviour of rubber concrete using evolutionary polynomial regression, **Engineering Computations**, Vol. 28 N°4, pp. 492-507. 2011. <https://doi.org/10.1108/02644401111131902>

AUSTROADS. Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design. Austroads. 2017. ISBN 978-1-925854-69-5

DOGLIONI, A., MANCARELLA, D., SIMEONE, V., GIUSTOLISI, O. Inferring groundwater system dynamics from hydrological time-series data. **Hydrological Sciences Journal**, 55: 4, 593 — 608. 2010. doi: 10.1080/02626661003747556

ELSAIYR, H.A. Residual Analysis for Auto-Correlated Econometric Model. **Open Journal of Statistics**, 9, 48-61. 2019. <https://doi.org/10.4236/ojs.2019.91005>

GARDETE, D., PICADO-SANTOS, L., CAPITÃO, S. Improving bituminous mixture performance by optimizing the design compaction energy – A cost effective approach for better pavements. **Construction and Building Materials**, Volume 190 1173-1181. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.169>

GIUSTOLISI, O., SAVIC, D. A symbolic data-driven technique based on evolutionary polynomial regression. **Journal of Hydroinformatics**. 8 (3): 207–222. 2006. <https://doi.org/10.2166/hydro.2006.020b>

GIUSTOLISI, O., SAVIC, D. Advances in data-driven analyses and modelling using EPR-MOGA. **Journal of Hydroinformatics**. 11 (3-4): 225–236. 2009. <https://doi.org/10.2166/hydro.2009.017>

GIUSTOLISI, O., BERARDI, L., WALSKI, T. M. Some explicit formulations of Colebrook–White friction factor considering accuracy vs. computational speed. **Journal of Hydroinformatics**, Vol. 13 401-418. 2011. <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.098>

HASAN, A., TAREFDER, R. Development of temperature zone map for mechanistic empirical (ME) pavement design. **International Journal of Pavement Research and Technology**, Volume 11, Issue 1 pp. 99-111. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.012>

INIR I.P. Directivas para a concepção de pavimentos - Critérios de dimensionamento, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, Lisboa, 2009.

KUMLAI, S., JITSANGIAM, P., PICHAYAPAN, P. The Implications of Increasing Temperature due to Climate Change for Asphalt Concrete Performance and Pavement Design. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 21(4):1222-1234. 2017. DOI 10.1007/s12205-016-1080-6

LAUCELLI, D., GIUSTOLISI, O. Scour depth modelling by a multi-objective evolutionary paradigm. **Environmental Modelling & Software**, Volume 26, Issue 4 pp. 498-509. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.10.013>.

ONIFADE, O., OLANREWAJU, S. Investigating Performances of Some Statistical Tests for Heteroscedasticity Assumption in Generalized Linear Model: A Monte

Carlo Simulations Study. **Open Journal of Statistics**, 10, 453-493. 2020. <https://doi.org/10.4236/ojs.2020.103029>

LI, Y., LI, M., ZHANG, L. Evolutionary polynomial regression improved by regularization methods. **PLoS ONE**, 18(2): e0282029. 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282029>

REZANIA, M., JAVADI, A., GIUSTOLISI, O. An evolutionary-based data mining technique for assessment of civil engineering systems. **Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software**, Vol. 25 No. 6 pp. 500-517. 2008. DOI: 10.1108/026444400810891526

SHELL. **Shell Pavement Design Manual—Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic**. Shell International Petroleum Company Ltd., London. 1978

SREEJITH, G. H. Pavement Temperature Data Maps for Worldwide Locations. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 15:948–956. 2021. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00064-8>

SULEIMAN, A., ABDULLAHI, U., AHMAD, U. An analysis of residuals in multiple regressions. **International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science**, Volume No 03, Special Issue No. 01. 2015.

UYANTO, S. Monte Carlo power comparison of seven most commonly used heteroscedasticity tests, **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, 51:4, 2065-2082. 2022. DOI: 10.1080/03610918.2019.1692031

ZAUMANIS, M., POULIKAKOS, L., PARTL, M. Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters, **Mater. Design**, 141 185–201. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.035>.



## SOIL STABILIZATION WITH SISAL FIBRES

LUZIA, ROSA (1); GARDETE, DINIS (2); MONTEIRO, DIOGO (3)

(1) INSTITUTO POLITÉCNICO DE CASTELO BRANCO, E-mail: [rluzia@ipcb.pt](mailto:rluzia@ipcb.pt)

(2) INSTITUTO POLITÉCNICO DE CASTELO BRANCO, E-mail:  
[dgardete@ipcb.pt](mailto:dgardete@ipcb.pt)

(3) INSTITUTO POLITÉCNICO DE CASTELO BRANCO, E-mail:  
[diogom.on@hotmail.com](mailto:diogom.on@hotmail.com)

### ABSTRACT

*Soil stabilization using natural fibres is a solution that can have environmental and technical advantages. Among the natural fibres that have adequate characteristics are sisal fibres. In this work, were used sisal fibres to evaluate its potential to improve the characteristics of soils for embankment and road pavement layers construction. Was characterized a clayey sand soil, in its natural state and after mixing it with sisal fibres. The mixture with 0.5%, 1.0% and 1.5% of sisal fibres with 15mm length was characterized and the bearing capacity of the soil was determined using CBR tests (California Bearing Ratio). The results from the tests show that sisal fibre stabilization leads to a decrease, although slight, in the CBR values, for 2.5mm and 5.0mm of penetration. However, when observing the penetration/force curves, the natural soil performed better between 0.0mm and 6.0mm of penetration, suffering a break after 6.0mm, while mixtures with 1.0% and 1.5% of fibres maintained a practically linear progress up to 12mm of penetration.*

**Keywords:** Soil stabilization; CBR test; Sisal fibres.

### RESUMO

A estabilização de solos com fibras naturais é uma solução que pode trazer vantagens ambientais e técnicas. Entre as fibras naturais que apresentam características adequadas para estabilização de solos estão as fibras de sisal. Neste trabalho foram utilizadas fibras de sisal para avaliar seu potencial em melhorar as características de solos para construção de aterros e camadas de pavimentos rodoviários. Caracterizou-se um solo arenoargiloso, no seu estado natural e após mistura com 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibras de sisal com 15mm de comprimento. A capacidade de suporte foi determinada através de ensaios CBR (California Bearing Ratio). Os resultados dos ensaios mostram que a estabilização do solo com fibras de sisal leva a uma diminuição, ainda que ligeira, nos valores de CBR, para



2,5mm e 5,0mm de penetração. Porém, ao observar as curvas penetração/força, constata-se que o solo natural tem melhor desempenho entre 0,0mm e 6,0mm de penetração, sofrendo uma quebra a partir dos 6,0mm, enquanto as misturas com 1,0% e 1,5% de fibras de sisal mantiveram um andamento praticamente linear até 12mm de penetração.

**Palavras-chave:** Estabilização de solos, Ensaio de CBR, Fibras de sisal.

## 1 INTRODUCTION

It is increasingly common to attempt to use excavation materials, if they meet the requirements for such use, whether in the foundation or in the granular layers of road pavements. This use has great benefits, both economic and environmental, because, if the materials are not reused in the work, they will have to be taken to storage and in their place natural aggregates will have to be used which, in turn, have been extracted, crushed and transported to the location.

However, it often happens that the materials found on the line do not meet the requirements to be reused on site, in many situations because they are fine clay materials. One way to make the reuse of those materials possible is to improve their properties so that they meet the requirements for use, namely with natural fibres, since they are readily available and are not expensive.

Soil stabilization using natural fibres as an additive can have technical and environmental advantages. Some researchers have studied the use of natural fibres (Fonseca da Silva, et al., 2019) in soil stabilization.

Natural fibres can have different origins, such as sisal, coconut, jute, rice straw, bamboo, linen, and cut into different lengths, from 5 mm (Wu, et al., 2014) to 75 mm (Fonseca da Silva, et al., 2019) and used in different percentages, from 0.25% (Manjunath et al., 2013) to 2.0% (Mohammed, et al., 2022).

From stabilization with natural fibres, it was observed that the percentages of fibre addition that achieve better results are, generally, less than 1% (Nguyen and Indraratna, 2023). Nevertheless, some authors refer percentages up to 1.5% (Mohammed et al., 2022). Regarding fibre length, the optimal value varies between 10 mm (Maity et al., 2018) and 15 mm (Mohammed et al., 2022).

Stabilization with natural fibres increased the resistance and the shear strength parameters of the soil measured in CBR tests, unconfined compression tests and simple shear tests (Hejazi et al. 2012, Nguyen and Indraratna, 2023).

## 2 MATERIALS

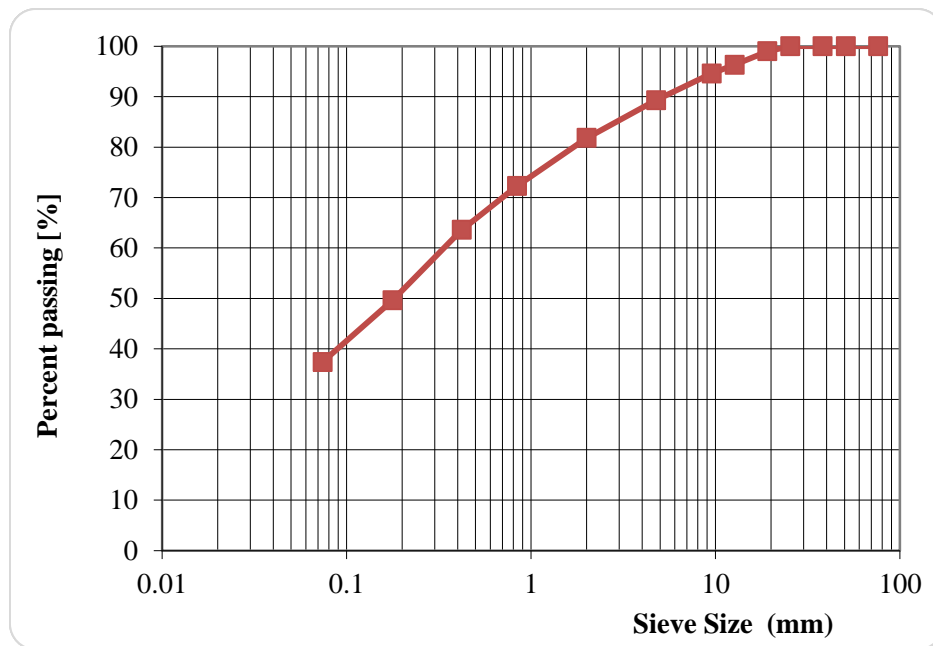
### 2.1 Soil

A reddish-brown clayey soil was used, with a significant amount of fines and evident plastic behaviour.

At this point it should be said that for each of the tests referred to in the following sections, two specimens were tested. The results presented correspond to the average of the results for each of the specimens.

Figure 1 shows the soil gradation (LNEC, 1966a).

**Figure1 – Gradation curve**



**Source:** Author's Collection

The soil was geotechnically characterized, determining the following properties: liquid limit, plastic limit, sand equivalent, organic matter content and methylene blue value. The results are presented in Table 1.

**Table 1 – Soil properties**

Property	Standard	Result
Liquid Limit [%]	NP 143	27.2
Plastic Limit [%]		20.7
Sand Equivalent [%]	LNEC E 199	44.6
Organic Matter Content [%]	NLT-117	3.0
Methylene Blue Value [g/100g]	NF P18-592	0.5

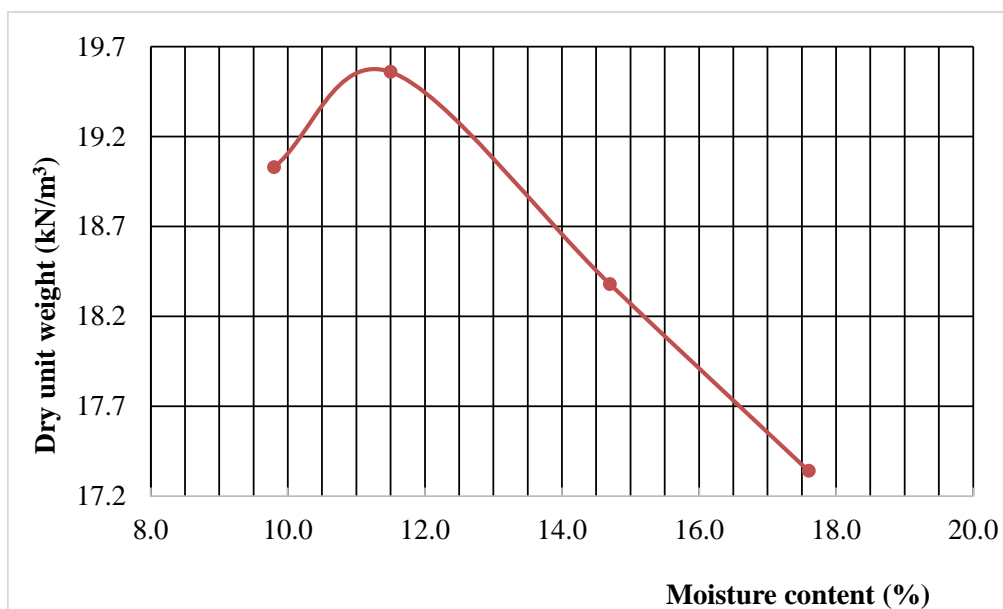
Table 2 presents the soil classification according to USCS (ASTM, 2006) and AASHTO (LNEC, 1970) classifications.

**Table 2 – Soil classification**

Classification	Standard	Result
USCS	ASTM D2487-06	SC-SM – Silty clay sand
AASHTO	LNEC E 240	A-4(1)

To determine Maximum Dry Density (MDD) and Optimum Moisture Content (OMC) of the soil was used the modified Proctor compaction test. The test procedures followed standard LNEC E 197 (LNEC, 1966b). The soil presented an OMC of 11.6% and MDD of 19.6 kN/m<sup>3</sup>, Figure 2.

**Figure2 – Compaction curve**

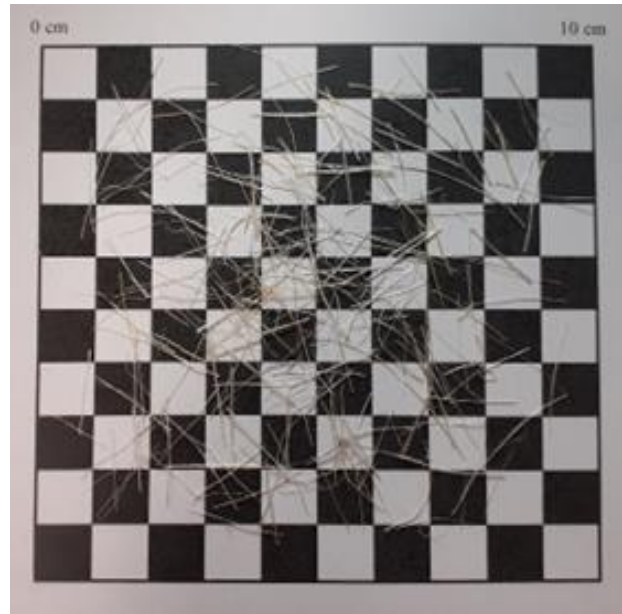


**Source:** Author's Collection

## 2.2 Sisal Fibres

The sisal fibres used were purchased in a commercial store and are generally used for civil construction work associated with plaster. Sisal fibres generally have an average diameter of 150  $\mu\text{m}$  and a density of 1.35 g/cm<sup>3</sup> (Mohammed et al., 2022) and were cut to 15 mm in length, Figure 3.

**Figure3 – Sisal fibres.**



**Source:** Author's Collection

### **3 SOIL STABILIZATION**

#### **3.1 Mixing**

The soil was mixed with sisal fibres by hand. The contents of sisal fibre used were 0.5%, 1.0% and 1.5%, weight of sisal fibre / dry weight of soil. The value for 0% sisal fibre content is referred to the original soil without stabilization.

The soil/sisal fibre mixture, for each of the percentages added, was made by hand with the soil dry and finished when, visually, a homogeneous mixture was obtained.

The water content for all specimens compacted corresponded to the OMC of the original soil. Water was added and mixture proceeded until a good dispersion of the water in the mixture was observed.

A homogeneous mixture was a little complicated to achieve particularly for the higher percentage of fibre. Even so, a mixture with good homogeneity was achieved.

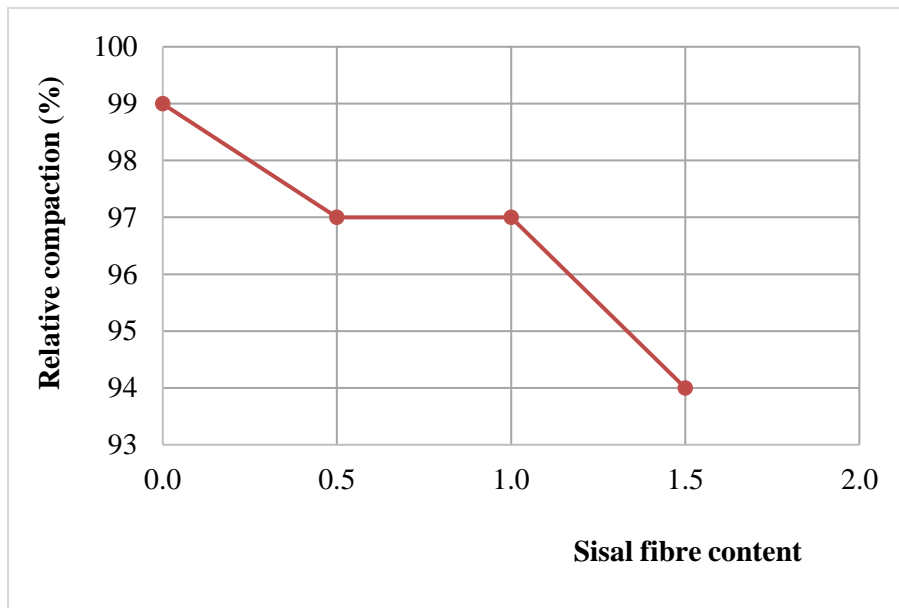
All specimens were compacted with 55 blows/layer (like the Modified Proctor Test specimens).

Two specimens were tested for each sisal fibre percentage.

#### **3.2 CBR test results**

CBR test procedures followed standard LNEC E 198 (LNEC, 1967b). In Figure 4 are presented the relative compaction (dry density of the specimen / MDD) values for CBR specimens. As expected, higher sisal fibre content leads to lower relative compaction.

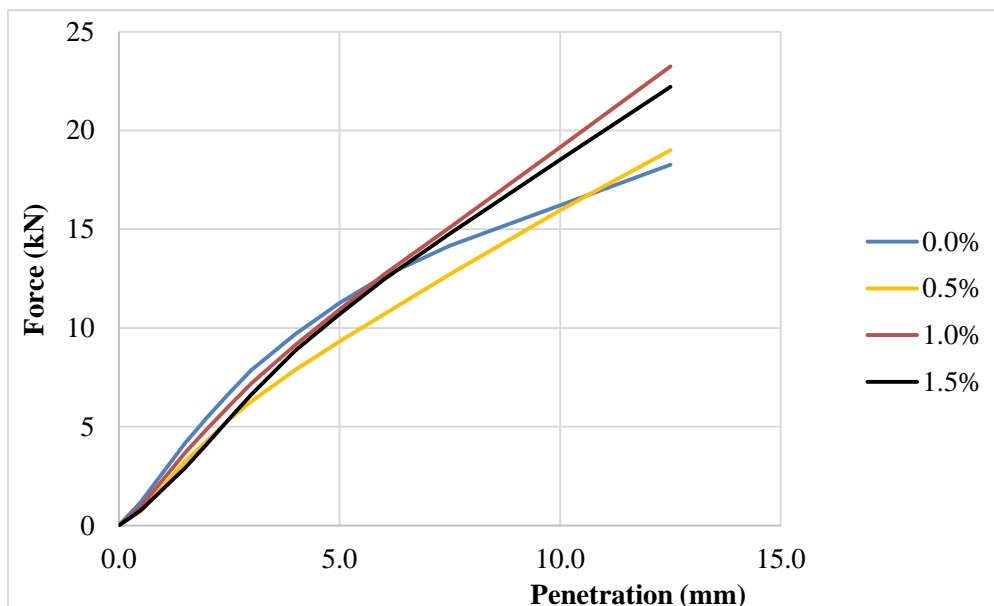
**Figure4 – Relative compaction in CBR specimens.**



**Source:** Author's Collection

In Figure 5 are presented the Force-Penetration curves from the CBR test. The effect of the stabilization is more evident for high penetrations. The curves show that the original soil presented better performance until 6.0 mm of penetration. After 6.0 mm it was observed a change in the trend with a reduction of performance. Whereas mixtures with 1.0% and 1.5% of fibres maintained a practically linear trend up to 12 mm of penetration.

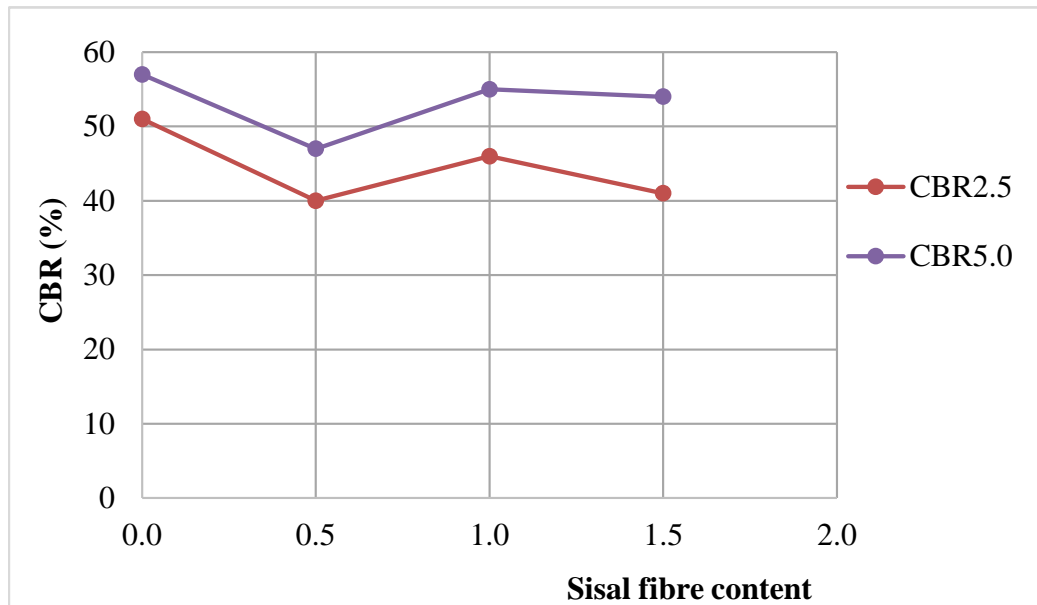
**Figure5 – Force-penetration curves.**



**Source:** Author's Collection

The CBR values obtained for 2.5 mm and 5.0 mm penetration are presented in Figure 6.

**Figure6 – CBR2.5 and CBR 5.0 values.**



**Source:** Author's Collection

CBR values for 5.0 mm penetration were higher. No increase in CBR was observed for sisal fibre stabilization. The original soil achieved higher CBR2.5 and CBR5.0 values. The CBR values decrease for 0.5% of sisal fibres, increasing to 1%, to 55%, very close to the natural soil, and decreasing again to 1.5%.

The results obtained in Figure 5 show that the improvement in soil behaviour obtained by stabilization with sisal fibre is more evident for high penetration values (greater than 5 to 6 mm). Therefore, this improvement in behaviour is not captured in the CBR values (determined for 2.5 and 5 mm of penetration), Figure 6. Consequently, it is also observed that the CBR values for 5 mm present a more favourable trend than those for 2.5mm.

Despite observing an improvement in soil behaviour through the analysis of force-penetration curves, this same improvement does not translate into CBR values, given that they are obtained for low penetration values (2.5mm and 5mm).

#### **4 CONCLUSIONS**

There were used sisal fibres for the stabilization of a clayey sand soil. Contents of 0.5%, 1.0% and 1.5% of sisal fibres were used. Results show a decrease in the relative compaction with increasing sisal fibre content. CBR values generally decreased with the addition of sisal fibres. However, for 1% of fibres the CBR value, 55%, is close to the CBR of natural soil, 57%.

For 1.5% the CBR decreases again. This could perhaps be explained by the difficulty in mixing the sisal fibres into the soil, particularly for the higher percentages, resulting in a less homogeneous mixture.

The use of natural fibres, namely sisal fibres, for soil stabilization can be an interesting option, although they are difficult to mix into the soil, which can lead to poor homogeneity in the mixture.

## REFERENCES

AFNOR. Granulats. Essai au bleu de méthylène. Méthode à la tache. NF P 18-592, Association Française de Normalisation, France, 1990.

ASTM. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), D2487-06, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, American Society for Testing and Materials, USA, 2006.

Fonseca da Silva, H. E., Camargos, C. S., Viana de Souza, M., Gongora, I. M. A. Estudo da viabilidade do uso de fibras naturais como reforço de solos. Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges, N. P. López-Acosta et al. (Eds.). 2019. doi:10.3233/STAL190200.

Hejazi, S., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S., Zadhoush, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers, Construction and Building Materials 30, 100-116, 2012. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045.

IGPAI. Determinação dos Limites de Consistência. NP – 143, Inspeção Geral dos Produtos Agrícolas e Industriais, Lisboa, 1969.

IRANOR. Determinación con agua oxigenada del contenido de materia orgánica en los suelos. UNE 7-368-77, Instituto Nacional de Racionalización y Normalización, Madrid, 1977.

LNEC. Análise Granulométrica. E 196, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1966a.

LNEC. Classificação para fins Rodoviários. E240, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. 1970.

LNEC. Determinação do CBR. E 198, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1967b.

LNEC. Ensaio de Compactação. E 197, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1966b.

LNEC. Ensaio de Equivalente de Areia. E 199, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1967<sup>a</sup>.

Maity, J., Chattopadhyay, B., Mukherjee, S. Improvement of Characteristics of Clayey Soil Mixed with Randomly Distributed Natural Fibers, Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 99 (1), 55–65, 2018. doi:10.1007/s40030-017-0244-9.

Manjunath K. R, Venugopal G, Rudresh A. N. (2013). Effect of Random Inclusion of Sisal Fibre on Strength Behavior of Black Cotton Soil, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 02 (07). 2013. ISSN: 2278-0181.

Mohammed, H., Assefa, E., Shantveerayya, K. Utilization of Sisal Fiber as a Subgrade Soil Reinforcement: A Case Study of Alem Tena Town Along Modjo-Meki Expressway. *International Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 7 (Special Issue, Jan.-Feb. 2022), 2022.

Nguyen, T. T., Indraratna, B. Natural Fibre for Geotechnical Applications: Concepts, Achievements and Challenges. *Sustainability*, 15, 8603, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15118603>.

Wu, Y., Li, Y., Niu, B. Assessment of the Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Silty Clay Using Triaxial Shear Tests. *TheScientificWorldJournal*. Volume 2014, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/436231>





## **SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR AREIAS DE LEITO FLUIDIZADO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS: UMA ABORDAGEM PARA SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

KHAIRALLAH, LARISSA (1), GONILHO-PEREIRA, CRISTIANA (2); JASPER, CATARINA MARCHI (3), MELLO, AMANDA (4)

(1) INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA ( BRASIL),  
[LARIKTUBI@GMAIL.COM](mailto:LARIKTUBI@GMAIL.COM)

(2) INSTITUTO POLITÉCNICO DE SETÚBAL, ESCOLA SUPERIOR DE  
TECNOLOGIA DO BARREIRO (PORTUGAL),  
[CRISTIANA.PEREIRA@ESTBARREIRO.IPS.PT](mailto:CRISTIANA.PEREIRA@ESTBARREIRO.IPS.PT)

(3) INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL),  
[CATARINA.J@ALUNO.IFSC.EDU.BR](mailto:CATARINA.J@ALUNO.IFSC.EDU.BR)

(4) INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL)  
[DEMELLOAMANDA3@GMAIL.COM](mailto:DEMELLOAMANDA3@GMAIL.COM)

### **ABSTRACT**

*This study evaluates the viability of substituting natural aggregates with fluidized bed sands (FBS) in mortar production, aiming for sustainability in construction. The research evaluates the influence of partial and total substitution of natural fine aggregates with FBS through the characterization of the produced mortars and the aggregates composing them. Considering the scarcity and non-renewability of natural resources used in construction, this research emerges as a response to the need to rethink the use of these materials, seeking to minimize environmental impacts.*

*The research methods involved characterization tests of FBS and the production of mortars with different compositions, including a reference mortar and three variations with partial and total substitution of natural aggregates with FBS. The results indicate that FBS has suitable physical characteristics to replace natural aggregates, although its addition affects the workability and mechanical properties of mortars.*

*The analysis of the results suggests that the substitution of natural aggregates with FBS may lead to a decrease in mechanical strengths and an increase in open porosity and water absorption by capillarity. However, the results also show that the total substitution of natural aggregates with FBS may be viable, depending on the applications of the mortars.*

*It is concluded that the use of FBS in mortar production represents a promising strategy to promote sustainability in construction, but further studies are needed to evaluate other parameters and confirm the conclusions of this initial study.*

**Keywords:** *natural aggregates, mortar, waste, fluidized bed sands, circular economy*

## RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade da substituição de agregados naturais por areias de leito fluidizado (ALF) na produção de argamassas, com vista à sustentabilidade na construção civil. A pesquisa avalia a influência da substituição parcial e total dos agregados miúdos naturais por ALF através da caracterização das argamassas produzidas e dos agregados que as compõem. Considerando a escassez e não renovabilidade dos recursos naturais utilizados na construção civil, esta investigação surge como resposta à necessidade de repensar a utilização desses materiais, procurando minimizar os impactos ambientais.

Os métodos de pesquisa envolveram ensaios de caracterização das ALF e a produção de argamassas com diferentes composições, incluindo uma argamassa de referência e três variações com substituição parcial e total de agregados naturais por ALF. Os resultados indicam que a ALF apresenta características físicas adequadas para substituir os agregados naturais, embora a sua adição afete a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas das argamassas.

A análise dos resultados sugere que a substituição de agregados naturais por ALF pode levar a uma diminuição das resistências mecânicas e um aumento da porosidade aberta e absorção de água por capilaridade. No entanto, os resultados também mostram que a substituição total de agregados naturais por ALF pode ser viável, dependendo das aplicações das argamassas.

Conclui-se que a utilização de ALF na produção de argamassas representa uma estratégia promissora para promover a sustentabilidade na construção civil, mas são necessários estudos adicionais para avaliar outros parâmetros e confirmar as conclusões deste estudo inicial.

**Palavras-chave:** Agregados naturais, Argamassa, Resíduo, Leito Fluidizado, Economia Circular.

## 1 INTRODUÇÃO

Os agregados naturais são materiais particulados, incoerentes e de baixa atividade química, com variadas granulometrias e já presentes na natureza (Paulo, 2006). Embora escassos e não renováveis, são essenciais na construção civil, especialmente na produção de argamassas e concretos. No Brasil, o consumo de agregados em regiões como Fortaleza e Salvador é de até 2 ton/hab/ano, enquanto em São Paulo

chega a 4,5 ton/hab/ano. Na União Europeia, o consumo atinge 8 ton/hab/ano, superado apenas pelo consumo de água (Silva et al, [s.d.]).

Segundo a ANEPAC (2010), o consumo de agregados varia conforme o tipo de construção: em auto-construção de 35 m<sup>2</sup>, utiliza-se 21 toneladas, enquanto em habitações populares de 50 m<sup>2</sup>, são consumidas 68 toneladas. Para edifícios públicos de 1.000 m<sup>2</sup>, o consumo é de 1.360 toneladas, e em escolas padrão de 1.120 m<sup>2</sup>, chega a 1.675 toneladas. Na pavimentação urbana, um quilômetro de via de 10 metros de largura requer entre 2.000 e 3.250 toneladas, enquanto uma estrada vicinal consome 2.800 toneladas por quilômetro, e uma estrada pavimentada comum, cerca de 9.500 toneladas.

Diante da escassez de recursos, é necessário repensar o uso de agregados, buscando alternativas como a substituição por resíduos sólidos de diferentes setores industriais, promovendo uma economia circular. Geissdoerfer et al. (2016) definem a economia circular como um sistema regenerativo, essencial para a sustentabilidade e o crescimento econômico sustentável. Nesse contexto, resíduos são reaproveitados, reduzindo o uso de recursos não renováveis.

A incorporação de resíduos na produção de argamassas é uma prática recente, mas viável, conforme estudos sobre o uso de resíduos de concreto triturado (Marques, 2010) e vidro e cerâmica (Pereira e Santos, [s.d.]). No entanto, o setor da construção ainda enfrenta resistência a essas mudanças sustentáveis (Azevedo, 2018). Jacoski (2014) destaca a importância da inovação tecnológica para melhorar a produtividade e reduzir custos no setor de argamassas, foco de estudos em tecnologia de materiais.

As indústrias de papel, apesar de sua relevância econômica, geram grandes quantidades de resíduos sólidos, cerca de 0,4 toneladas para cada tonelada de papel produzido (Toczyłowska-Maminska, 2017 apud Azevedo, 2018). Esses resíduos, muitas vezes descartados em aterros, poderiam ser melhor aproveitados (Eurostat, 2015 apud Marques, 2015). Um exemplo é a utilização das Areias do Leito Fluidizado (ALF), subproduto gerado em centrais de queima de biomassa, com alto potencial como agregado em argamassas (Silva et al, [s.d.]).

O uso de ALF como matéria-prima alternativa na produção de argamassas promove a economia circular e reduz a extração de recursos naturais. Em Portugal, que produz mais de 1 milhão de toneladas de argamassas pré-doseadas por ano, a incorporação de ALF pode ter um grande impacto ambiental.

O objetivo deste estudo é verificar a influência da substituição parcial e total de agregados naturais por ALF, analisando o desempenho das argamassas em termos mecânicos e físicos, como resistência à compressão e tração, índice de consistência e absorção de água por capilaridade, comparando argamassas com e sem ALF.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo como objetivo aprofundar as noções sobre a areia do leito fluidizado (ALF) e a sua potencial utilização na produção de argamassas cimentícias, substituindo parcial e/ou integralmente os agregados naturais, foram realizados ensaios de caracterização do material e a produção de quatro argamassas com diferentes materiais constituintes (Tabela 1), com finalidade de avaliar a influência da incorporação da ALF nos estados frescos e endurecidos dessas misturas, a saber:

- Argamassa de Referência (REF) – argamassa de cimento produzida com agregados naturais (0/2 + 0/4),
- Argmassa ALFp – argamassa de cimento com substituição parcial dos agregados naturais por areias do leito fluidizado (0/2 + ALF);
- Argmassa ALFm – argamassa de cimento com substituição parcial dos agregados naturais por areias do leito fluidizado com granulometria modificada (0/2 + ALFm);
- Argmassa ALF – argamassa de cimento com substituição total dos agregados naturais por areias do leito fluidizado.

**Tabela 1 - Relação das argamassas produzidas**

Designação	0/2	0/4	ALF	ALFm
REF	✓	✓	-	-
ALFp	✓	-	✓	-
ALFm	✓	-		✓
ALF	-	-	✓	-

Na produção das argamassas, foram utilizados: cimento Portland de calcário (CEM II/B-L 32,5 N), areia fina natural (0/2) da Herdade da Mesquita, em Sesimbra, e areia grossa natural (0/4) do Pinhal Conde Cunha 4, no Seixal, ambas em Portugal. As Areias do Leito Fluidizado (ALF) utilizadas são resíduos não perigosos, compostos principalmente por partículas de quartzo, com granulometria que varia de micrômetros a milímetros, muitas vezes revestidas por material vítreo, subprodutos da combustão e cinzas (Pereira, 2022). Utilizaram-se ALF tal como fornecida e uma versão modificada (ALFm), ajustada à granulometria da areia natural 0/4.

O estudo foi realizado em cinco etapas: (I) caracterização dos agregados 0/2, 0/4, ALF e ALFm; (II) dosagem e produção de argamassas de referência (REF) com agregados naturais (0/4 + 0/2), misturas com ALF e ALFm (ALF + 0/2 e ALFm + 0/2), e argamassas 100% ALF; (III) caracterização das argamassas no estado fresco; (IV) moldagem, desmoldagem e cura dos provetes; (V) caracterização das argamassas no estado endurecido aos 28 e 355 dias. Todas as misturas seguiram um

traço 1:3 (cimento:miúdo em volume) e relação água/ligante de 0,6 em massa.

Inicialmente, foram realizados ensaios de granulometria, massa volúmica e baridade dos agregados, conforme as normas NP EN 933-1:2014, NP EN 1097-6:2002 e NP EN 1097-3:2002. Para as argamassas REF, ALFp e ALFm, a proporção de areia fina para grossa foi de 1:2, visando reduzir o volume de vazios.

As argamassas foram produzidas adaptando os procedimentos das normas NP EN 998-1:2018 e EN 1015-2/A1. Os componentes sólidos foram misturados manualmente antes da adição de água na misturadora mecânica. Foram preparadas duas amostras de cada tipo de argamassa. Após a mistura, as argamassas foram analisadas quanto à consistência e massa volúmica aparente, seguindo as normas EN 1015-3/A1/A2 e EN 1015-6:1998. Nove provetes prismáticos (40x40x160 mm) foram compactados e armazenados sob filme de polietileno, sendo desmoldados após 2 dias e mantidos até os 28 dias.

A caracterização no estado endurecido foi realizada aos 28 dias, em 3 ou 6 provetes de cada tipo. Os ensaios mecânicos de resistência à compressão e tração por flexão seguiram a EN 1015-11, enquanto o teste de porosidade aberta mediu a quantidade de vazios interconectados, indicando a porosidade das argamassas.

### 3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1 Caracterização dos agregados

Segundo o fornecedor, o agregado natural 0/2 é composto por quartzo, feldspato e quartzito (com partículas subangulosas a subarredondadas), enquanto o agregado natural 0/4 também contém moscovite, além desses três componentes.

Para a produção da argamassa de referência (REF), as areias 0/2 e 0/4 foram utilizadas na proporção de 1:2 (areia fina: areia grossa) para reduzir o volume de vazios entre as partículas do agregado. Essa mesma proporção foi mantida ao substituir o agregado natural por ALF.

##### 3.1.1 Massa volúmica específica

A Tabela 2 mostra as massas volúmicas específicas de cada tipo de areia – natural e do leito fluidizado. Os resultados, obtidos conforme a norma NP EN 1097-6:2002, classificam todas as areias como agregados de densidade normal.

**Tabela 2 - Massa volúmica específica dos agregados caracterizados**

	0/2	0/4	ALF	ALFm
Massa Vol. Esp. [kg/m <sup>3</sup> ]	2564,1	2705,4	2500,0	2439,0

### 3.1.2 Baridade e Volume de vazios

A Tabela 3 apresenta as baridades das quatro areias analisadas, que variam entre 1200 e 1700 kg/m<sup>3</sup>, faixa que caracteriza as areias comumente usadas em construções (Martins, 2008 apud Pinto et al., 2006). A tabela também mostra o volume de vazios entre as partículas de cada agregado. Esses resultados foram obtidos conforme o procedimento descrito na NP EN 1097-3:2002.

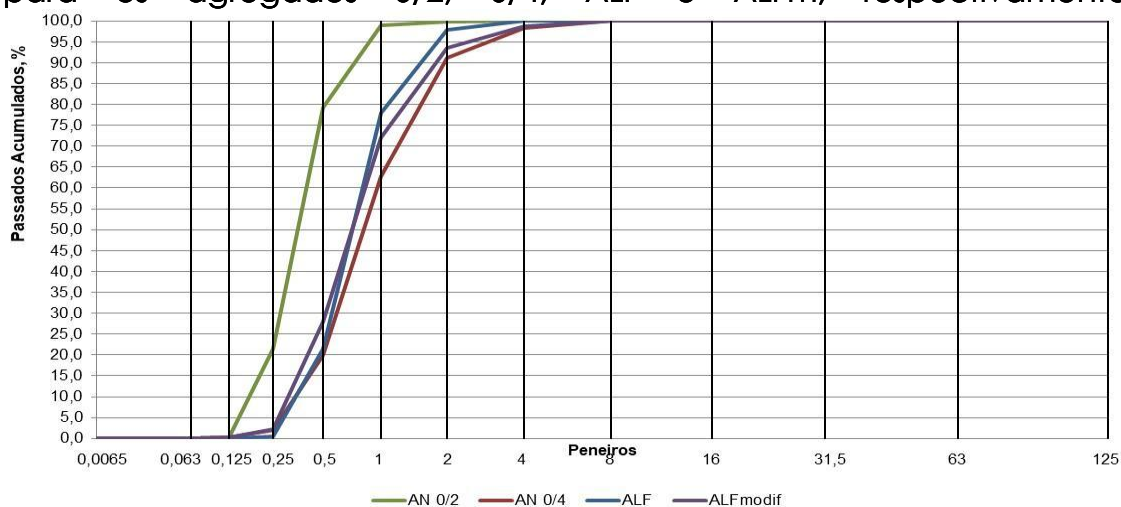
**Tabela 3 - Baridade e volume de vazios dos agregados caracterizados (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão)**

	0/2	0/4	ALF	ALFm
Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	1516,76	1574,30	1447,3	1467,10
DP [kg/m <sup>3</sup> ]	1,21	4,07	18,98	1,65
Vol.Vazios [%]	40,8	41,8	42,1	39,8
DP [%]	0,04	0,12	0,62	0,06

### 3.1.3 Granulometria

A análise granulométrica seguiu o procedimento estabelecido pela NP EN 933-1:2014. A curva granulométrica (Figura 1) mostra que a ALF é semelhante à areia natural 0/4, o que justifica o estudo da substituição parcial do agregado natural, utilizando 100% de ALF em substituição à areia grossa 0/4, mantendo a areia fina 0/2. A modificação da granulometria da ALF visou aproximá-la da areia natural grossa 0/4.

Os módulos de finura dos quatro agregados são 2,00, 3,25, 3,02 e 3,05 para os agregados 0/2, 0/4, ALF e ALFm, respectivamente.



**Figura 1 - Curvas granulométricas dos agregados caracterizados**

## 3.2 Caracterização da mistura de agregados

### 3.2.1 Massa volúmica específica

A tabela 4 apresenta a massa volúmica específica da mistura de agregados na proporção 1:2 (areia fina: areia grossa).

**Tabela 4 - Massa volúmica específica da mistura de agregados**

	0/2+0/4	0/2 + ALF	0/2 + ALFm
Massa Vol. Esp. [kg/m <sup>3</sup> ]	2500,0	2500,0	2500,0

### 3.2.2 Baridade e volume de vazios

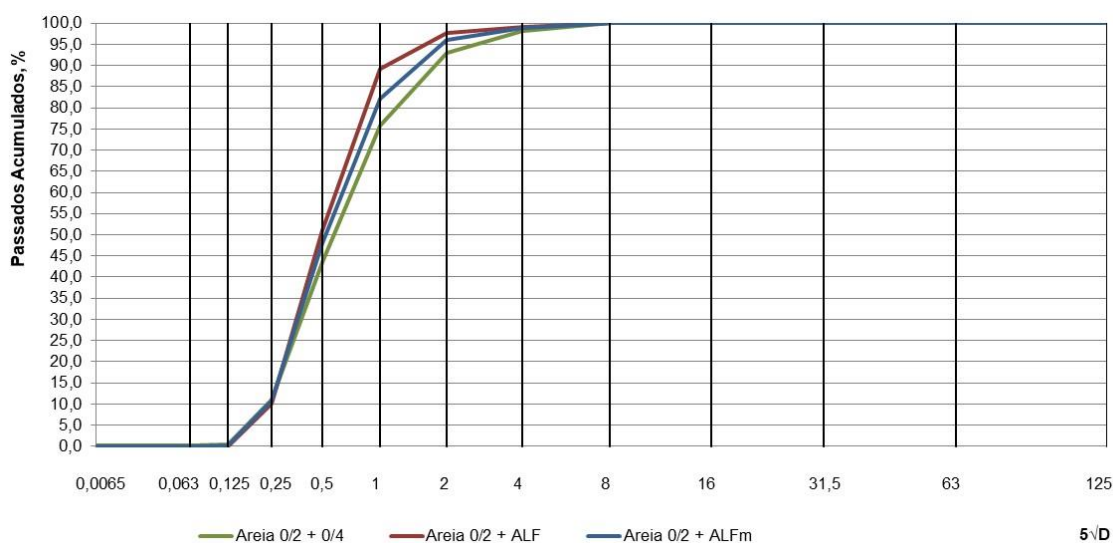
A tabela 5 apresenta as baridades obtidas para as misturas de areias, assim como o volume de vazios do conjunto de agregados.

**Tabela 5 - Baridade e volume de vazios da mistura de agregados (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão)**

	0/2 + 0/4	0/2 + ALF	0/2 + ALFm
Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	1591,53	1490,19	1531,44
DP [kg/m <sup>3</sup> ]	5,01	4,68	2,29
Vol.Vazios [%]	36,3	40,4	38,7
DP [%]	0,16	0,15	0,07

### 3.2.3 Granulometria da mistura de agregados

Após a preparação das misturas dos agregados pode ser observado que todos apresentam uma curva granulométrica semelhante (Figura 2). Os módulos de finura são 2,78, 2,53, e 2,64 para as misturas (0/2 + 0/4), (0/2 + ALF) e (0/2 + ALFm).



**Figura 2 - Curvas granulométricas das misturas dos agregados.**

### 3.3 Composição e produção de argamassas

Conforme referido, foram preparados 4 tipos de argamassa: argamassa de referência (0/2 + 0/4); argamassa com substituição do 0/4 por ALF nas condições de fornecimento; argamassa com substituição do 0/4 por ALF modificada e argamassa com substituição total do agregado natural por ALF nas condições de fornecimento. Na tabela 6 apresentam-se as composições das argamassas usadas como base para o estudo experimental.

**Tabela 6 - Composição das argamassas por Kg /m<sup>3</sup> de argamassa.**

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Cimento	399,52	415,29	408,71	416,72
AN 0/2	529,87	515,72	521,59	-
AN 0/4	1059,75	-	-	-
ALF	-	1031,43	-	1507,87
ALFm	-	-	1043,18	-
Água	239,71	249,17	245,22	250,03

### 3.4 Caracterização das argamassas no estado fresco

Em relação à consistência, a substituição parcial ou total do agregado natural por areia do leito fluidizado (ALF) resulta em um aumento da consistência da argamassa, medido pelo diâmetro de espalhamento (Tabela 7) [EN1015-2/A1: 1998/2006], [EN 1015-3/A1/A2:1999/2004/2006]. O aumento de consistência na argamassa ALFm (0/2 + ALFm) é menos significativo, cerca de 9,24%. Nas argamassas ALFp e ALF, o aumento é mais expressivo, com 17,58% e 21,36%, respectivamente.

Conforme Silva (2006) e Knights (1998), citados por Neno (2010), a trabalhabilidade da argamassa com agregados reciclados pode ser semelhante à das argamassas com agregados naturais, desde que os agregados sejam previamente saturados. No entanto, em geral, a trabalhabilidade diminui com níveis elevados de substituição de agregados primários por reciclados. Avaliada pelo valor de espalhamento, as argamassas com ALF apresentam leve redução na trabalhabilidade, dificultando um pouco o manuseio.

**Tabela 7 - Consistência por Espalhamento (mm) das Argamassas (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão)**

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Espalhamento [mm]	155,08	127,78	140,71	121,93
DP [mm]	1,68	1,21	5,85	2,77



Em relação a massa volúmica [EN 1015-6:1998], os resultados apresentam tendência semelhante (tabela 8). Comparando com a REF, a ALF apresenta uma massa volúmica ligeiramente superior (1,01%) e a ALFp (0/2 + ALF) ligeiramente inferior (1,12%). A ALFm foi a argamassa que apresentou resultado mais semelhante (aumento de 0,15%), como indicado na tabela 9.

**Tabela 8 - Massa Volúmica Aparente [kg/m<sup>3</sup>] das Argamassas no Estado fresco ( média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão)**

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Massa Vol. Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	2059,75	2036,58	2062,89	2080,50
DP [kg/m <sup>3</sup> ]	19,0	1,3	14,4	26,6

A diferença entre as massas volúmicas obtidas nos 4 tipos de argamassa é de, no máximo, 2,11%, podendo-se considerar que as massas volúmicas no estado fresco são equivalentes.

### 3.5 Caracterização das argamassas no estado endurecido

#### 3.5.1 Massa volúmica específica e massa volúmica aparente

A tabela 9 apresenta as massas volúmicas específicas e aparente dos 4 tipos de argamassas. O procedimento de determinação foi efetuado com base na técnica das pesagens hidrostáticas, garantindo o total preenchimento dos poros internos das argamassas com água recorrendo, para tal, ao vácuo e restituição da pressão atmosférica.

**Tabela 9 - Massas Volúmicas [kg/m<sup>3</sup>] das Argamassas no Estado Endurecido (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão).**

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Massa Vol. Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1985,49	1935,24	1943,56	1947,50
DP [kg/m <sup>3</sup> ]	17,46	7,20	8,72	30,11
Massa Vol. Específica [kg/m <sup>3</sup> ]	2592,18	2583,81	2594,89	2588,79
DP [kg/m <sup>3</sup> ]	3,73	1,09	1,30	2,97

#### 3.5.2 Porosidade Aberta

A substituição do agregado natural 0/4 por ALF ou ALFm não apresenta impactos significativos na Porosidade Aberta. O mesmo ocorre com a Massa Volúmica Aparente, onde o uso de ALFm resulta em um aumento de apenas 0,43%. A substituição total do agregado natural por ALF nas

condições de fornecimento também não difere das substituições parciais (Tabela 10).

As argamassas ALFp (0/2 + ALF) e ALFm exibem porosidade semelhante, sendo que a porcentagem de poros interconectados é maior nas argamassas com incorporação de resíduos. Além disso, quanto maior o volume de vazios, menor o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, enquanto a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas aumenta (Farinha, 2015).

**Tabela 10 - Porosidade aberta [%] das Argamassas no Estado Endurecido (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão).**

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Porosidade Aberta [%]	23,41	25,10	25,10	24,77
DP [%]	0,57	0,26	0,34	1,16

Quanto mais elevada a Massa Volúmica Aparente mais baixa será a Porosidade, aqui concretizada com a Porosidade Aberta. Verifica-se que a substituição do agregado natural 0/4 por ALF traduz-se no aumento da porosidade aberta e na diminuição da Massa Volúmica Aparente, quando comparada com a argamassa de referência.

### 3.5.3 Resistência Mecânica

As resistências à tração por flexão e à compressão indicam a capacidade que as argamassas têm de resistir a alguns agentes que atuam externamente, como os choques ou as intempéries, variações volumétricas e assentamentos, sem apresentar danos ao longo do tempo (Neno, 2010). As argamassas utilizadas para revestimentos estão mais dependentes da resistência à tração por flexão do que à resistência à compressão. Diante disso, a baixa resistência à tração na flexão não permite a argamassa suportar os esforços de tensões, podendo assim ocorrer a incidência de patologias, como a fissuração e o destacamento do revestimento. (Santos, 2008).

#### 3.5.3.1 Tração por flexão

Em um ensaio realizado por Silva (2006) citado por Neno (2010) verificou-se que a resistência à flexão cresce à medida que se substituiu a areia por resíduos de tijolo até cerca de 20% de substituição. Daí em diante, para substituições de quantidades superiores, a resistência decresce. Tal qual o presente estudo, a resistência à flexão com 100% ALF foi ainda maior que a argamassa REF, aos 28 dias de idade (tabela 11).

A razão para isso, segundo o autor, pode ser a superfície irregular dos grãos de agregado reciclado e/ou o maior vínculo entre a pasta de cimento e estes mesmos agregados. Por outro lado, é possível que existam ainda outras ligações químicas (além da pozolanicidade) e

físicas (absorção, forma, rugosidade, entre outras) entre os materiais a contribuir para este melhoramento das resistências.

Verifica-se que a substituição de agregado natural 0/4 por ALF conduz a uma diminuição da tensão de rotura à tração por flexão quando comparado com a argamassa de referência. Dado que as massas volúmicas aparentes das argamassas produzidas com substituição parcial de agregado natural se vêm diminuídas, as resistências mecânicas acompanham a mesma tendência, à exceção para a argamassa ALF. Ainda assim, importa realçar que as diferenças obtidas nas tensões de rotura à tração por flexão são da ordem dos 3,70% (0/2+ALF e 0/2+ ALFm) e dos 0,93% (0/2+ALFm e ALF).

**Tabela 11: Resistência à tração por flexão [MPa] das Argamassas no Estado Endurecido (média de 6 ensaios – valor médio e desvio-padrão).**

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Resistência à Tração por Flexão [MPa]	5,53	5,47	5,10	5,74
DP [MPa]	0,24	0,34	0,34	1,00

### 3.5.3.2 Compressão

Um trabalho experimental citado por Neno (2010) que é concordante com os resultados obtidos no presente estudo é o de Topçu (2010), onde é verificado que a resistência à compressão decresce com o aumento de percentagem de substituição de RCD (Resíduos da Construção e Demolição). O autor justifica este fato com o aumento da porosidade da argamassa, causada pela inserção de resíduos e ainda explica que a presença do ar no material contribui para a redução da resistência à compressão. Por exemplo, 5% de teor de ar pode baixar a resistência até 30% e mesmo 2% de teor de ar pode resultar numa perda de resistência superior a 10%.

Verificou-se que a substituição de agregado natural por ALF conduz a uma diminuição da tensão de rotura à compressão quando comparada com a argamassa de referência (tabela 12). Dado que as massas volúmicas aparentes das argamassas produzidas com substituição, parcial e total, de agregado natural se vêm diminuídas, mais uma vez, as resistências mecânicas acompanham a mesma tendência.

Realça-se, mais uma vez que as diferenças obtidas nas tensões de rotura à compressão são da ordem dos 2,13% (0/2+ALFm e ALFp) e não se regista diferença neste parâmetro nas argamassas 0/2+ALF e 0/2+ALFm. Nestas argamassas (0/2+ALF e 0/2+ ALFm) o aumento da massa volúmica aparente é da ordem dos 0,43%.

**Tabela 12 - Resistência à compressão [MPa] das Argamassas no Estado Endurecido (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão).**

	REF (0/2 + 0/4)	ALF (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Resist. à Compressão [MPa]	26,56	23,44	23,26	24,84
DP [MPa]	0,89	0,48	0,74	5,22

#### 4 DISCUSSÃO

A areia do leito fluidizado (ALF) apresenta baridade inferior à da areia natural, com curva granulométrica semelhante à areia 0/4. A modificação da ALF ajustou sua curva granulométrica à do agregado natural 0/4 para viabilizar sua substituição. As massas volúmicas de ALF e ALFm estão mais próximas da areia 0/2, com volume de vazios similar, variando apenas 2,3%.

Nas misturas de agregados, a curva granulométrica é quase idêntica, com variação de vazios de 4,1%. No estado fresco, as argamassas com ALF apresentam menor trabalhabilidade, especialmente a ALF pura. A massa volúmica aparente nesse estado é praticamente igual, com diferenças de até 1% em relação à argamassa de referência.

No estado endurecido, a substituição por ALF reduz a massa volúmica aparente, aumentando a porosidade aberta em até 7%, e a redução da massa volúmica é de no máximo 2,5%. Em termos de desempenho mecânico, a resistência à tração por flexão aumenta na argamassa ALF em comparação com a referência, mas diminui na ALFm. A resistência à compressão também diminui, especialmente na ALFm, com reduções de 7,7% e 12,4% na tração e compressão, respectivamente.

#### 5 CONCLUSÃO

A análise dos resultados indica que a utilização de ALF na produção de argamassas de cimento é viável, já que os resultados são adequados para diferentes aplicações. A substituição do agregado natural por ALF resulta em: aumento da consistência (redução do diâmetro de espalhamento), redução das massas volúmicas aparentes, diminuição das resistências mecânicas (tração por flexão e compressão), aumento da porosidade aberta e maior absorção de água por capilaridade.

O comparativo entre as argamassas (0/2 + ALF) e ALF não revela diferenças significativas de desempenho, sugerindo que a substituição total por ALF é viável. No entanto, há incertezas em relação à argamassa (0/2 + ALFm), cujo desempenho deveria se aproximar mais da argamassa de referência.

É necessário, contudo, estudar outros parâmetros que confirmem as conclusões deste estudo exploratório. Futuros estudos devem incluir

análise química das ALF por fluorescência de raio-X, desempenho das argamassas com ALF após lavagem e avaliação de propriedades adicionais, como expansibilidade, aderência, índice de secagem, além da caracterização química das ALF (CO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, cloretos, entre outros).

## 6 AGRADECIMENTOS

O presente artigo resulta do trabalho científico, com componente laboratorial, realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, desenvolvido pelas autoras ao abrigo do programa de intercâmbio PROPICIE, do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Brasil, e do Projeto de Investigação Exploratória – ARSus - Argamassas de Revestimento Sustentáveis – financiado pelo Instituto Politécnico de Setúbal. Associado ao projeto ARSus encontra-se o grupo *The Navigator Company*, indústria de pasta de papel.

## 7 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Afonso et al. - **Recycling paper industry UEffluent sludge for use in mortars: Asustainability perspective**. Brasil, 2018.

EN 1015-2/A1:1998/2006 - **Methods of test for mortar for masonry -Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars**.

EN 1015-3/A1/A2:1999/2004/2006 - **Methods of test for mortar for masonry -Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)**.

EN 1015-6:1998 - **Methods of test for mortar for masonry -Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar**.

EN 1015-11: 1999 - **Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar**.

EN 14146: 2004 - **Natural stone test methods -Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency)**.

FARINHA, Catarina. - **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resíduos de loiça sanitária**. Tese de doutoramento. Lisboa, 2015.

GEISSDOERFER, Martin et al. - **The Circular Economy. A new sustainability paradigm?** UK, 2016.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 933-1: 2014 - **Ensaio das propriedades geométricas dos agregados; Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração**.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 998-1: 2018 – **Especificações de argamassas para alvenarias. Parte 1. Argamassas para rebocos interiores e exteriores**.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 1097-3: 2002 - **Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios.**

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 1097-6: 2002 - **Propriedades Mecânicas e Físicas Agregados. Determinação da massa volúmica e da absorção de água.**

JACOSKI, Claudio Alcides; COSTELLA, Marcelo F.; RIGON, Mateus – **Estudo Patentométrico de argamassas no Brasil.** UNOChapecó, 2014.

MARQUES, Ana. - **Utilização energética da biomassa em Portugal.** Lisboa, 2015.

MARTINS, André - Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco. Portugal, 2008.

NENO, Catarina – **Desempenho de Argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão.** Lisboa, 2010.

PEREIRA, Cristiana; DELOROSO, Júlia; BERTIOLI, Andrea - **Avaliação do desempenho de argamassas com areias do leito fluidizado de centrais de queima de biomassa.** Barreiro, Portugal. ESTB, 2022.

PEREIRA, Luiz; SANTOS, Pedro. - **Resíduos reciclados como componentes de argamassas.** Portugal, [s.d.].

SANTOS, Maria Luiza. - **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Natal, 2008.

SILVA, Luis [et al] - **Utilização e Valorização de resíduos de Areias do Leito Fluidizado e de Lamas de Corte de Pedra em Argamassas. Exemplos de Aplicação.** Aveiro, Universidade de Aveiro, [s.d.].



## PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS COM RCD REFORÇADAS COM FIBRA DE SISAL

SOARES, EDILSON (1); BRAVO, MIGUEL (2); GONILHO-PEREIRA, CRISTIANA (3); JASPER, CATARINA MARCHI (4)

(1) USJT, SÃO PAULO-SP, BRASIL, [schaffen.engenharia@gmail.com](mailto:schaffen.engenharia@gmail.com)

(2) CERIS, IST, ULISBOA, [miguelnbravo@gmail.com](mailto:miguelnbravo@gmail.com)

(3) INSTITUTO POLITÉCNICO DE SETÚBAL, ESCOLA SUPERIOR DE  
TECNOLOGIA DO BARREIRO (PORTUGAL),  
[CRISTIANA.PEREIRA@ESTBARREIRO.IPS.PT](mailto:CRISTIANA.PEREIRA@ESTBARREIRO.IPS.PT)

(4) DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL, INSTITUTO  
FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL), [CATARINA.J@ALUNO.IFSC.EDU.BR](mailto:CATARINA.J@ALUNO.IFSC.EDU.BR)

### ABSTRACT

*Sustainable development is a crucial political and social project for humanity, encouraging the search for sustainable solutions. In materials engineering, the use of low-cost and low-energy materials is essential. This research addresses environmental and sustainable development issues, focusing on the use of Construction and Demolition Waste (CDW). The use of CDW prevents its irregular disposal in landfills, increasing recycling in Portugal. In addition, the Agave Sisalana plant, abundant in Brazil, especially in Bahia, offers usable fibers and pulp. Mortar with CDW and sisal fibers is sustainable, composed of recycled and abundant materials. Nine types of mortars were produced: cement with fine natural aggregate (reference), replacing 50% and 100% of the fine natural aggregate with fine recycled aggregate, with the addition of 1% and 2% of 30 mm sisal fiber. Tests were performed on spreading, density, air content, mechanical strength, thermal conductivity, brick pullout, open porosity and capillary water absorption. The results showed that the recycled aggregate increased compressive strength, capillarity and porosity. The presence of fibers allowed large deformations before rupture, significantly improving mechanical strength and thermal conductivity.*

**Keywords:** Sustainability; Construction and Demolition Waste; Natural fiber; Mechanical strength; Durability.

### RESUMO

O desenvolvimento sustentável é um projeto político e social crucial para a humanidade, incentivando a busca por soluções sustentáveis. Na engenharia de materiais, a utilização de materiais de baixo custo e baixo consumo energético é essencial. Esta investigação aborda questões

ambientais e de desenvolvimento sustentável, focando no aproveitamento de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). O uso de RCD evita sua deposição irregular em aterros, aumentando a reciclagem em Portugal. Além disso, a planta Agave Sisalana, abundante no Brasil, especialmente na Bahia, oferece fibras e polpa utilizáveis. A argamassa com RCD e fibras de sisal é sustentável, composta por materiais reciclados e abundantes. Nove tipos de argamassas foram produzidos: de cimento com agregado natural fino (referência), substituindo 50% e 100% do agregado natural fino por agregado reciclado fino, com adição de 1% e 2% de fibra de sisal de 30 mm. Foram realizados ensaios de espalhamento, massa volúmica, teor de ar, resistência mecânica, condutibilidade térmica, arrancamento em tijolos, porosidade aberta e absorção de água por capilaridade. Os resultados mostraram que o agregado reciclado aumentou a resistência à compressão, capilaridade e porosidade. A presença de fibras permitiu grandes deformações antes da rutura, melhorando significativamente a resistência mecânica e a condutibilidade térmica.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade; Resíduos de Construção e Demolição; Fibra natural; Resistência mecânica; Durabilidade.

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável tem ganhado crescente relevância nas últimas décadas, abrangendo uma vasta gama de práticas e políticas voltadas para a produção menos poluente, a ecoeficiência, a gestão ambiental e a responsabilidade social. Na engenharia civil, a necessidade de alinhar a indústria da construção com os princípios do desenvolvimento sustentável é particularmente urgente, uma vez que este setor é um dos mais poluentes, devido ao seu elevado consumo de recursos naturais e à geração massiva de resíduos.

Um dos principais desafios para a construção sustentável é a minimização do consumo de recursos naturais, promovendo a reciclagem e a reutilização de materiais. Nesse contexto, a utilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) surge como uma alternativa viável e necessária. Os RCD, quando reciclados e incorporados em novos materiais de construção, não só evitam a deposição irregular em aterros como também contribuem para a economia circular e a redução do impacto ambiental.

O artigo em questão foca-se na produção e caracterização de argamassas que incorporam RCD reforçados com fibras de sisal. O sisal, planta abundante no Brasil, especialmente no estado da Bahia, oferece fibras naturais que podem ser utilizadas para reforçar a argamassa, melhorando suas propriedades mecânicas e contribuindo para a sustentabilidade. A integração de fibras de sisal com agregados reciclados em argamassas visa não apenas reduzir o impacto ambiental, mas também melhorar a eficiência e a durabilidade dos materiais de construção.



Este estudo promoveu a produção de nove tipos de argamassas: uma argamassa de referência com cimento e agregado natural fino; duas argamassas com substituições de 50% e 100% de agregado fino natural por agregado reciclado fino; seis argamassas com adições de 1% e 2% de fibra de sisal. Foram realizados ensaios de espalhamento, massa volúmica, teor de ar, resistência mecânica, condutibilidade térmica, porosidade aberta e absorção de água para avaliar o desempenho das argamassas.

## **2 EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS NATURAIS E PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS RCD**

A exploração dos recursos naturais e a produção de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são processos complexos que envolvem várias fases distintas. A exploração dos agregados naturais inicia-se com uma avaliação geológica preliminar para identificar as melhores localizações para extração, utilizando mapas topográficos, relatórios de engenharia e estudos geofísicos (Drew et al., 2004).

Na fase de extração, areia, cascalho e pedras são removidos de minas a céu aberto ou de depósitos subaquáticos. Este processo pode ser realizado através de técnicas de mineração seca ou molhada, dependendo das condições naturais do local e do material a ser extraído (Langer, 1993). Após a extração, o material é transportado para centrais de britagem, onde passa por trituração, separação e, em alguns casos, lavagem (Drew et al., 2004).

As centrais de reciclagem, que podem ser fixas ou móveis, desempenham um papel crucial no processamento dos RCD. As centrais fixas ocupam uma grande área e são capazes de produzir agregados reciclados de alta qualidade, enquanto as centrais móveis são levadas aos locais de produção dos resíduos, reduzindo os custos de transporte e o impacto ambiental (Vázquez et al., 2006).

O processamento dos RCD nas centrais de reciclagem envolve várias etapas, incluindo a aceitação dos resíduos, pré-triagem, separação de contaminantes, britagem, crivagem, armazenamento e saída dos produtos finais. Esta reciclagem contribui significativamente para a sustentabilidade, minimizando o impacto ambiental e reduzindo os custos de produção de materiais de construção (Pereira et al., 2004).

Os RCD são maioritariamente compostos por betão, cerâmicos, brita, madeira, vidro, outros orgânicos, tubos de plástico, asfalto, impurezas, solo e lamas, areia e metais. A utilização significativa dos RCD começou após a Segunda Guerra Mundial devido à grande quantidade de destroços e à necessidade de materiais de construção (Pinto, 2005). Esta utilização beneficia o meio ambiente e reduz os impactos ambientais da extração de recursos naturais.

A pedra, a areia e o cascalho são fontes primárias de agregado natural usadas diretamente na construção ou como matéria-prima para a

produção de outros produtos, como o betão (USGS, 1999). A reciclagem dos agregados tem ganhado importância, pois aumenta sua vida útil e reduz os impactos ambientais ao redor dos locais de construção (Wilburn & Goonan, 1998).

A exploração das jazidas de agregados naturais envolve a interação entre os produtores de agregados e a comunidade local. Na década de 1960, muitas fontes de agregados foram esgotadas e substituídas por outras construções, e as especificações para a qualidade dos agregados tornaram-se mais rigorosas (Langer, 1993). Antes da exploração, é feita uma avaliação geológica preliminar com mapas topográficos, relatórios de engenharia e geólogos, seguida por estudos detalhados utilizando imagens de satélite, fotografias aéreas e estudos geofísicos para definir os limites das fontes de agregados (Drew et al., 2004).

Após a escolha do local, inicia-se a mineração dos agregados, que inclui a remoção de camadas de terra para expor a areia, cascalho ou pedra, separação do solo orgânico, construção de vias de circulação e instalações de tratamento (Drew et al., 2004). Os métodos de mineração variam conforme o tipo de material e as condições naturais do local.

A extração envolve a retirada da areia e cascalho de minas a céu aberto ou depósitos subaquáticos. Em áreas secas, utiliza-se equipamentos de terraplanagem como escavadeiras e niveladoras (Drew et al., 2004). Em áreas com lençóis freáticos, a extração pode ser realizada a seco, com bombagem de águas subterrâneas ou a molhado, com reboques, baldes ou dragas hidráulicas. A extração de brita envolve perfuração e uso de explosivos para quebrar a rocha em pedaços apropriados para britagem (Drew et al., 2004).

O processamento dos agregados naturais pode ocorrer em locais remotos ou em centrais com equipamentos sofisticados, interligados por tapetes rolantes e controlados por computadores (Drew et al., 2004). O processamento inclui transporte dos agregados para a central, britagem, trituração, lavagem, armazenamento e abastecimento. Os agregados são transportados para um britador primário, triturados e separados por tamanho em um crivo vibratório. O material que se encontra conforme os padrões desejados é armazenado, enquanto que o material de grandes dimensões é reintroduzido no processo (Langer, 1993).

O transporte dos agregados é definido pelo cronograma de entrega, volume transportado, distância e disponibilidade dos meios de transporte. Este transporte é majoritariamente realizado por caminhões, que podem transportar cerca de 25 toneladas, tornando os custos de entrega eficientes (Drew et al., 2004). Em casos com acesso ferroviário, o transporte férreo pode ser mais económico. A pedreira pode ter pistas de aceleração e desaceleração, e pavimentação das estradas de acesso para facilitar o transporte.

A construção de uma central de reciclagem requer uma análise de viabilidade prévia, considerando o volume de RCD reciclável, tipo de material, objetivo de aplicação e local de instalação (Leite, 2001).

O processamento dos RCD nas centrais de reciclagem é semelhante ao dos agregados naturais, envolvendo aceitação, pré-triagem, separação inicial, triagem de fluxos contaminados, britagem, crivagem, armazenamento e saída dos produtos finais (Pereira et al., 2004). A separação eficiente na origem e triagem manual ao chegar à central são cruciais para assegurar a qualidade dos agregados reciclados. A britagem é realizada com britadoras de impacto ou mandíbulas, seguidas por separação magnética para remover metais. O material processado é armazenado e supervisionado para evitar misturas entre os estoques.

### 3 METODOLOGIA

Este artigo foi realizado na sequência da investigação desenvolvida no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil, da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, do Instituto Técnico de Setúbal. O principal objetivo desta investigação consiste em aumentar o conhecimento sobre argamassas produzidas RCD e o comportamento das fibras de sisal aquando da sua introdução em argamassas. Os RCD utilizados contêm cerâmica, argamassa, inertes, entre outros materiais, que após processos de moagem, constituem o Agregado Reciclado Fino (ARF) aproveitado para a produção das argamassas. As fibras de reforço utilizadas são constituídas por sisal.

Para atingir os objetivos propostos, foram analisadas e comparadas nove diferentes misturas de argamassa, utilizando agregado natural fino (ANF) e/ou agregado reciclado fino (ARF), com ou sem fibras naturais de sisal. As misturas analisadas, bem como as respetivas nomenclaturas atribuídas e composições encontram-se presentes na Tabela 1.

**Tabela 1 - Argamassas produzidas na campanha experimental**

Código	Composição
100ANF	100% de ANF e 0% de fibra de sisal (argamassa de referência)
100ANF1FS	100% de ANF e 1% de fibra de sisal
100ANF2FS	100% de ANF e 2% de fibra de sisal
100ARF	100% de ARF e 0% de fibra de sisal
100ARF1FS	100% de ARF e 1% de fibra de sisal
100ARF2FS	100% de ARF e 2% de fibra de sisal
50ANF50ARF	50% de ANF + 50% de ARF e 0% de fibra de sisal
50ANF50ARF1FS	50% de ANF + 50% de ARF e 1% de fibra de sisal
50ANF50ARF2FS	50% de ANF + 50% de ARF e 2% de fibra de sisal

No total, foram produzidos 54 provetes de 40x40x160 mm, seis provetes para cada tipo de argamassa, que foram avaliados aos 28 dias de idade. Também foram produzidos nove provetes adicionais para a avaliação da

aderência por arrancamento aos 28 dias de idade, utilizando tijolos revestidos com 2 cm de argamassa. A quantidade de água utilizada foi determinada de forma a garantir a obtenção de uma consistência adequada para aplicação

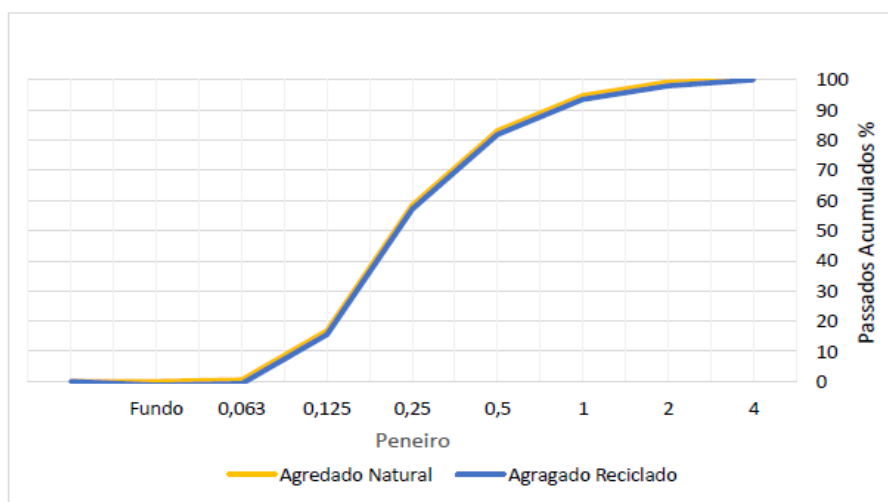
Para aferir o desempenho das argamassas produzidas, estas foram caracterizadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, foram avaliadas a consistência por espalhamento, a massa volúmica aparente e o teor de ar. No estado endurecido, foram avaliadas as características mecânicas (resistência à tração por flexão e resistência à compressão e aderência por arrancamento) e físicas (porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e condutibilidade térmica).

## 4 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados dos ensaios aos materiais constituintes

Para se caracterizar os constituintes da argamassa, foi realizada uma análise granulométrica dos agregados finos utilizados (Figura 1). Cada análise foi efetuada com uma amostra de 226,9 g. A curva granulométrica dos AFR utilizados foi construída de forma a que fosse idêntica à dos agregados naturais. A manutenção da curva granulométrica é fundamental para produzir argamassas com a mesma compactidade, permitindo uma adequada comparação entre as diversas argamassas produzidas.

Sobre a dimensão dos constituintes utilizados, refira-se também que as fibras de sisal utilizadas possuíam 3 cm de comprimento.



**Figura 1- Análise da granulometria dos agregados finos**

Os valores da baridade dos agregados reciclados e naturais, bem como do cimento e das fibras de sisal encontram-se na Tabela 2. Destaque-se que a baridade do agregado reciclado é inferior em relação à do

agregado natural, possivelmente devido a alguns dos materiais contidos nos RCD, como os cerâmicos.

**Tabela 2- Baridade dos agregados finos, cimento e fibra de sisal**

Material	Baridade (kg/m <sup>3</sup> )
Agregado Reciclado Fino	1320
Agregado Natural Fino	1582
Cimento	1200
Fibra de Sisal	1080 ± 30

#### **4.2 Resultados dos ensaios ao betão no estado fresco**

A relação água/ligante, conforme referido no capítulo anterior, foi definida experimentalmente para obter uma consistência adequada para a investigação, introduzindo-se 2% de adjuvante para diminuir a quantidade de água necessária e para ajudar na dispersão dos diversos constituintes das argamassas. Os valores de relação água/ligante variaram entre 0,55 e 0,80. Observa-se que, com o aumento da quantidade de agregados reciclados finos (ARF), a relação água/ligante também aumentou, pois os agregados reciclados têm características físicas (a sua elevada porosidade) que os levam a absorver água durante a amassadura.

Na Tabela 3, podem-se observar as propriedades das argamassas no estado fresco. O espalhamento foi cuidadosamente controlado, mantendo-se entre 155 mm e 165 mm, para garantir uma consistência adequada para reboco e para as argamassas possuírem todas um espalhamento idêntico e, assim, serem comparáveis entre si. O ensaio do teor de ar foi efetuado em todas as amassaduras. Os resultados obtidos mostram que a quantidade de ar na amassadura variou entre 16,5% e 23,0%. Nas argamassas com agregados naturais, verifica-se um aumento do teor de ar com a adição de fibras de sisal, atingindo até 31,4% com a adição de 2% de fibras.

A massa volúmica no estado fresco diminui proporcionalmente com o aumento da taxa de agregados reciclados utilizada. Este fato já era esperado, uma vez que a baridade dos agregados reciclados é inferior à dos agregados naturais. Além disso, o aumento da taxa de sisal também reduziu a massa volúmica no estado fresco, devido à baixa massa volúmica do sisal e ao volume considerável que ocupa na argamassa, mesmo considerando a quantidade de água retida.

**Tabela 3- Propriedades das argamassas no estado fresco**

Código	Relação Água/Ligante	Espalhamento (mm)	Teor de Ar (%)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
100ANF	0,50	160	16,5	2100
100ANF1FS	0,52	162	18,0	2080
100ANF2FS	0,54	165	19,5	2060
100ARF	0,50	159	17,0	2150
100ARF1FS	0,52	161	20,5	2120
100ARF2FS	0,54	163	23,0	2090
50ANF50ARF	0,51	158	18,5	2110
50ANF50ARF1FS	0,53	160	21,0	2085
50ANF50ARF2FS	0,55	164	23,5	2065

Notas:

Relação Água/Ligante: A quantidade de água em relação ao material ligante utilizado.

Espalhamento (mm): A medida da consistência da argamassa, controlada entre 155 mm e 165 mm.

Teor de Ar (%): O volume de ar ocluído nas argamassas, variando entre 16,5% e 23,0%, mas podendo alcançar até 31,4% com a adição de fibras.

Massa Volúmica (kg/m<sup>3</sup>): A densidade da argamassa no estado fresco.

#### **4.3 Resultados dos ensaios ao betão no estado endurecido**

Os ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão foram realizados para todas as amostras de argamassa produzidas. Os resultados destes ensaios estão presentes na Tabela 4 e indicam que os valores de resistência à compressão ficaram acima de 0,4 MPa, conforme a norma EN 998-1, sugerindo que a quantidade de cimento poderia ser reduzida nas amassaduras para reboco. Na investigação realizada por Bruno (2007) foi produzida uma argamassa de traço 1:3, em volume, tendo obtido valores de resistência à tração por flexão de 4,5 MPa e de resistência à compressão de 18,8 MPa.

Na presente investigação, foi observado que a utilização de agregados reciclados (AR) não provocou uma diminuição na resistência à tração. Por sua vez, a adição de fibras de sisal aumentou significativamente a resistência à tração, especialmente com teores de 2%. Em termos de resistência à compressão, a utilização de AR provocou uma ligeira diminuição desta propriedade, mas a adição de fibras de sisal melhorou significativamente a resistência das argamassas. Nas argamassas com agregados naturais (AN), a adição de sisal resultou em uma melhoria mais

significativa na resistência à compressão (13,0%) do que na resistência à tração (7,5%).

**Tabela 4- Resultados dos ensaios de resistência mecânica**

Código	Resistência à Tração por Flexão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)
100ANF	7,5	13,0
100ANF1FS	8,2	14,5
100ANF2FS	9,0	15,8
100ARF	7,2	12,7
100ARF1FS	8,7	14,1
100ARF2FS	9,5	15,3
50ANF50ARF	7,3	12,9
50ANF50ARF1FS	8,4	14,3
50ANF50ARF2FS	9,2	15,1

Notas:

Resistência à Tração por Flexão (MPa): Representa a capacidade da argamassa de resistir à tração antes de se romper.

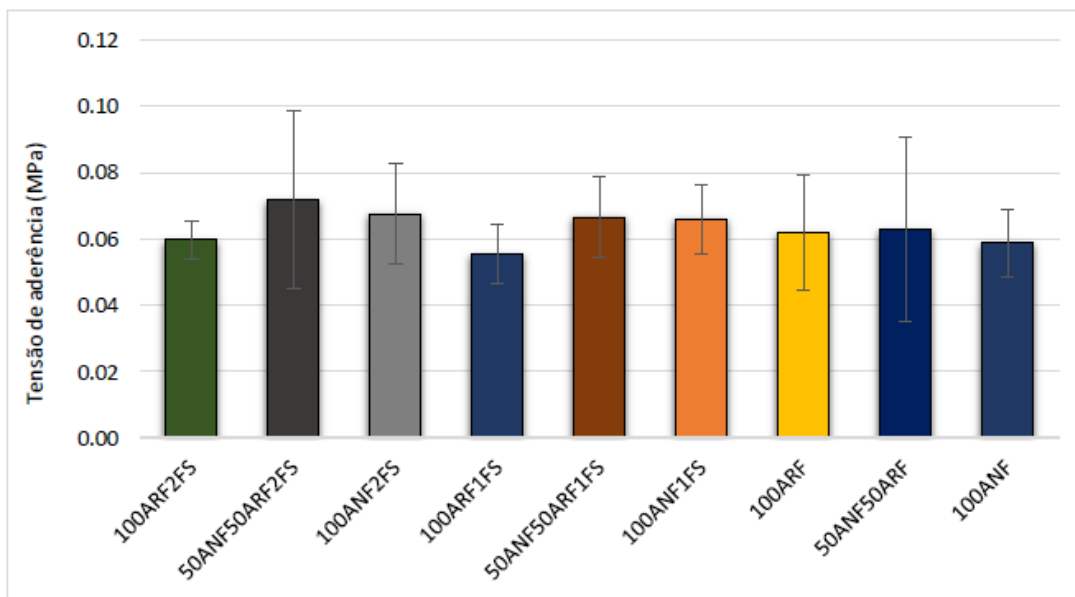
Resistência à Compressão (MPa): Mede a capacidade da argamassa de resistir a forças compressivas.

Nos ensaios de arrancamento por tração (pull-off) das argamassas aplicadas em tijolos, não foram obtidos resultados satisfatórios. Em todos os ensaios realizados, a rutura foi adesiva. Vários fatores influenciaram a baixa resistência no arrancamento, incluindo o tipo de suporte (tijolos argilosos com baixa porosidade), o teor de humidade no suporte, a relação água/ligante da argamassa, a espessura do reboco, a idade do reboco, as condições atmosféricas durante a aplicação, a altura de lançamento da argamassa e as vibrações no momento do corte.

Como se pode observar na Figura 2, os resultados obtidos no ensaio de arrancamento apresentaram valores muito baixos, possivelmente influenciados pelos referidos fatores.

Como se pode observar na Tabela 5, as argamassas com maior teor de agregados reciclados finos obtiveram valores maiores de absorção de água por capilaridade. Isso se deve à elevada absorção de água dos componentes dos RCD utilizados na amassadura. As argamassas com agregados finos naturais aumentaram ligeiramente sua absorção de água por capilaridade com o aumento do teor de sisal, devido à significativa absorção de água das fibras de sisal. No entanto, nas

argamassas com agregados reciclados finos, houve uma redução na absorção de água com o aumento do teor de fibras.



**Figura 2- Resultados do ensaio de arrancamento por tração**

**Tabela 5 - Resultados da absorção de água por capilaridade**

Código	Teor de Agregados Reciclados Finos (%)	Teor de Fibras de Sisal (%)	Absorção de Água por Capilaridade (kg/m <sup>2</sup> )
100ANF	0	0	0,30
100ANF1FS	0	1	0,35
100ANF2FS	0	2	0,40
100ARF	100	0	0,65
100ARF1FS	100	1	0,55
100ARF2FS	100	2	0,50
50ANF50ARF	50	0	0,48
50ANF50ARF1FS	50	1	0,45
50ANF50ARF2FS	50	2	0,42

Notas:

Teor de Agregados Reciclados Finos (%): Proporção de agregados reciclados utilizados na argamassa.

Teor de Fibras de Sisal (%): Proporção de fibras de sisal adicionadas à mistura.

Absorção de Água por Capilaridade (kg/m<sup>2</sup>): Quantidade de água absorvida pela argamassa através do processo de capilaridade.



Nos ensaios de porosidade aberta, observou-se que a inserção de fibras de sisal na amassadura aumentou ligeiramente a porosidade das argamassas (Tabela 6). Por sua vez, o acréscimo da quantidade de AR utilizada provocou um aumento significativo da porosidade das argamassas, atingindo 21%, aquando da substituição total dos agregados na argamassa com 1% de fibras de sisal.

**Tabela 6 - Resultados da porosidade aberta**

Código	Teor de Agregados Recicladados Finos (%)	Teor de Fibras de Sisal (%)	Porosidade Aberta (%)
100ANF	0	0	15,0
100ANF1FS	0	1	16,0
100ANF2FS	0	2	17,5
100ARF	100	0	19,0
100ARF1FS	100	1	21,0
100ARF2FS	100	2	22,5
50ANF50ARF	50	0	17,0
50ANF50ARF1FS	50	1	18,5
50ANF50ARF2FS	50	2	20,0

Notas:

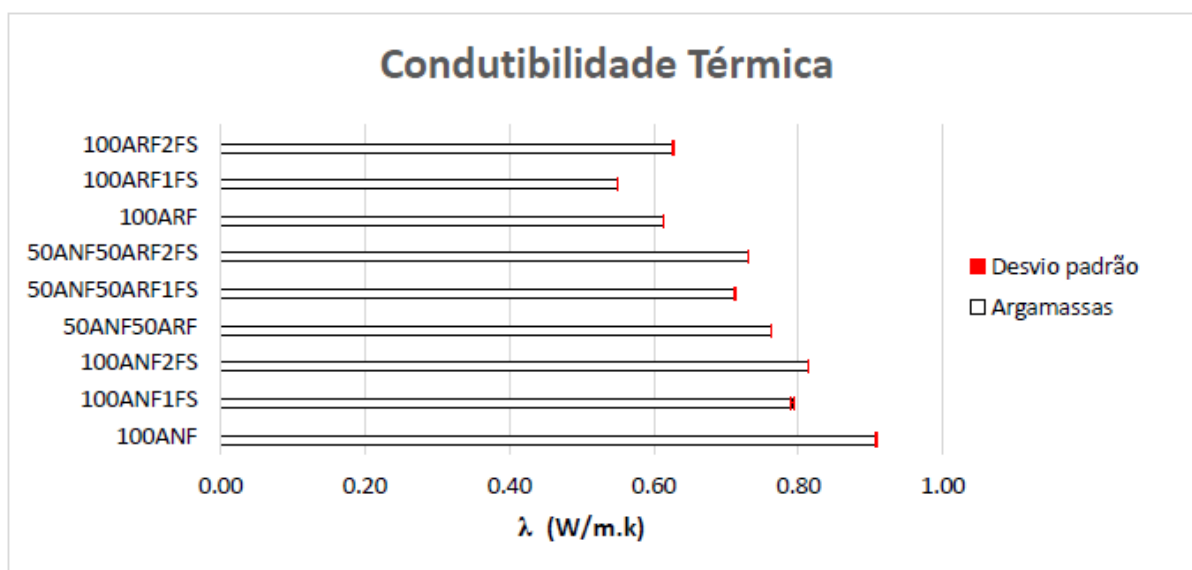
Teor de Agregados Recicladados Finos (%): Proporção de agregados reciclados utilizados na argamassa.

Teor de Fibras de Sisal (%): Proporção de fibras de sisal adicionadas à mistura.

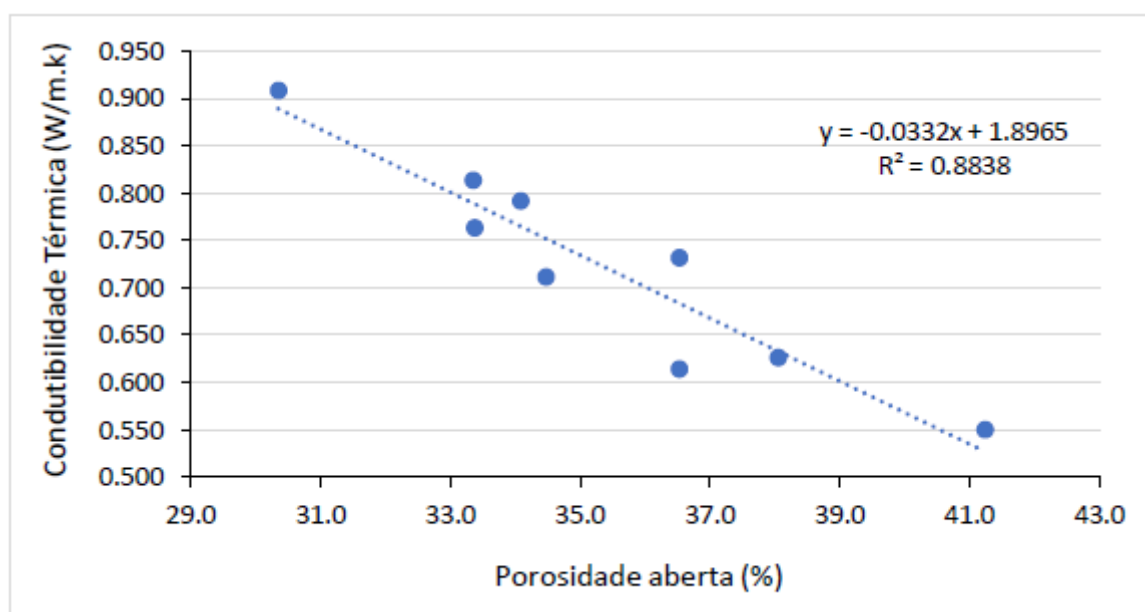
Porosidade Aberta (%): Percentual de porosidade aberta, indicando a quantidade de poros conectados na estrutura da argamassa.

Nos ensaios de condutibilidade térmica, todos os provetes das argamassas com fibras de sisal e/ou agregados reciclados finos apresentaram menores valores de condutibilidade térmica do que os provetes da argamassa de referência (Figura 3). Nos provetes com 100% de ARF e 1% de fibras de sisal, o resultado foi surpreendente, com um valor inferior a 0,60 W/m.k. Com o aumento do teor de fibras de 1% para 2%, houve uma ligeira elevação na condutibilidade térmica.

Como se pode observar na Figura 4, a relação entre a condutibilidade térmica e a porosidade das argamassas mostrou uma relação linear significativa ( $R^2 = 0.88$ ).



**Figura 3- Resultados da condutibilidade térmica**



**Figura 4- Relação entre a condutibilidade térmica e a porosidade aberta**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desta investigação foi caracterizar argamassas com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) reforçadas com fibras de sisal. Foram produzidas argamassas com um traço de 1:3, padrão nas construções. Os materiais de RCD foram recolhidos de uma demolição na freguesia do Lavradio, no Concelho do Barreiro.

Na campanha experimental, foram realizados ensaios de granulometria dos agregados naturais, obtendo-se posteriormente uma granulometria

semelhante para os agregados reciclados (AR). Sobre os ensaios aos agregados, refira-se que a baridade dos AR foi 16,6% inferior à dos AN.

Sobre as propriedades das argamassas no estado fresco, começou-se por determinar a relação água/ligante necessária para cada argamassa, obtendo-se uma consistência trabalhável. A massa volúmica aparente diminuiu com o aumento dos teores de fibras de sisal, devido à sua reduzida massa volúmica. Por sua vez, o teor de ar variou entre 16,5% e 23%, com uma média de 19,5%, considerado aceitável.

Relativamente aos resultados obtidos nos ensaios mecânicos realizados às diversas argamassas, refira-se que as fibras de sisal melhoraram a resistência à tração e à compressão. Nas argamassas com AR, a introdução de 2% de fibras de sisal resultou em uma melhoria significativa na resistência mecânica. No ensaio de arrancamento (pull-off), os resultados não foram satisfatórios, possivelmente devido à altura inadequada de lançamento da argamassa.

Nos ensaios de capilaridade, verificou-se que a introdução de AR aumentou significativamente a absorção de água, enquanto as fibras de sisal aumentaram a absorção nas argamassas com AN, mas diminuíram nas argamassas com AR. Por sua vez, a porosidade aberta das argamassas aumentou com a introdução de fibras de sisal e AR, tendo este acréscimo atingido 25% para as argamassas com 2% de fibras de sisal e 100% de AR.

Nos ensaios de condutibilidade térmica, verificou-se que a utilização de AR e fibras de sisal diminuiu esta propriedade devido à maior porosidade das argamassas e à composição dos AR, que inclui materiais cerâmicos.

Após análise dos resultados obtidos ao longo de toda a campanha experimental, conclui-se que a utilização de fibras de sisal, para além de permitir a utilização de um material natural abundante, pode melhorar as características mecânicas e térmicas das argamassas, sem acréscimos consideráveis de custo. As argamassas com AR apresentaram bons resultados, superando expectativas iniciais em ensaios mecânicos e de condutibilidade térmica, demonstrando que é possível usar AR em remodelações, desde que se controle rigorosamente a composição dos AR. Questões de sustentabilidade são cada vez mais analisadas, mas ainda não são amplamente aplicadas na prática. Esta investigação demonstrou que é possível tratar e reutilizar RCD na construção civil, minimizando impactos ambientais.

Importa ressaltar que este estudo é inovador e precisa de ser desenvolvido em futuras investigações. Desenvolver esta linha de investigação ajudará a expandir o conhecimento sobre o uso de materiais reciclados e naturais na construção civil, promovendo práticas mais sustentáveis e eficientes.

## REFERÊNCIAS

DREW, L. J., MURRAY, D. K., DICKENS, M. H. **Environmental Geology**. Springer. 2004.

LANGER, W. H. A **General Overview of the Technology of In-Stream Mining of Sand and Gravel Resources**. U.S. Geological Survey Open-File Report 93-507. 1993.

LEITE, M. B. **Avaliação de Impactos Ambientais e Econômicos da Reciclagem de RCD**. Universidade Federal do Paraná (UFPR). 2001.

PEREIRA, C. , SILVA, M. E., OLIVEIRA, L. F. Recycling of Construction and Demolition Waste. **Waste Management Journal**, v.24, n.4, 2004.

PINTO, J. **Gestão de Resíduos de Construção e Demolição**. Instituto Superior Técnico (IST). 2005.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **National Aggregates Database**. 1999.

VÁZQUEZ, E., HENDRIKS, C., JIN, W. Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in the Concrete **Industry. Materials and Structures**, v.39, n.6, 2006.

WILBURN, D. R.; GOONAN, T. G. **Aggregates from Natural and Recycled Sources**. U.S. Geological Survey Circular 1176. 1998.



## **BUILDING REHABILITATION AS A DRIVER FOR SUSTAINABLE RURAL DEVELOPMENT: POLICIES, STRATEGIES AND INTERACTIONS**

MOURAZ, CATARINA P. (1)\*; SILVA, J. MENDES (2); FERREIRA, T.M. (3)

**(1) DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, UNIVERSITY OF COIMBRA. E-MAIL: CATARINAMOURAZ@HOTMAIL.COM**

**(2) DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, UNIVERSITY OF COIMBRA, CERIS – PÓLO DE COIMBRA, PORTUGAL. E-MAIL: RAIMUNDO@DEC.UC.PT**

**(3) COLLEGE OF ARTS, TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT, SCHOOL OF ENGINEERING, UWE BRISTOL. E-MAIL: TIAGO.FERREIRA@UWE.AC.UK**

### **ABSTRACT**

*The sustained evolution of rural settlements is key to territorial cohesion and, ultimately, sustainable development. Simultaneously, building rehabilitation has been recognized as paramount to this global objective, given how it aims at economic and environmental savings, whilst promoting social development and quality of life. However, studies probing the impact of building rehabilitation in sustainable rural development remains highly unexplored. This article analyses possible correlations between policies for existing buildings and strategies for sustainable rural development, specifically exploring how building rehabilitation can contribute for the latter. Strategic documents for rural development are presented, synthesized and confronted with policies for existing buildings. Strong interactions are found between building rehabilitation and key-drivers for rural development, indicating how these interventions can actively contribute to fostering innovation, connectivity, resilience and more empowered communities. This study highlights how existing building in rural territories subjected to integrated and sustainable rehabilitation actions should be perceived as catalysts for change and development.*

**Keywords:** Rural development; building rehabilitation; policies; territorial cohesion; existing buildings.

### **1 INTRODUCTION**

The pursuit for sustainable development is a global objective for nations and societies. The impact of territorial cohesion on sustainable development has been gradually brought to the discussion, highlighting how both rural and urban environments should be equally considered in the pursuit of prosperity, competitiveness and progress. However, urbanisation and the consequent process of rural desertification

comprehends a global framework that calls for innovative approaches that support integrated territorial development, bringing rural development and its challenges to the discussion (Yin *et al.*, 2019).

Construction is one of the sectors to tackle when discussing sustainable development. Goals such as decarbonisation and energy efficiency have been recognised as fundamental in changing the paradigm in construction, contributing to more resilient, low-emission and carbon-neutral built environments. Interventions in existing buildings, namely rehabilitation, has been proven to be a vector towards this goal, since it promotes economic and environmental savings, improves technical performance and strengthens social cohesion and wellbeing (Mouraz *et al.*, 2023). Nonetheless, deeply exploring the role of these interventions in rural development, analysing whether they can play a role in creating more sustainable territories in a broad sense, remains a highly unexplored area of research, in which studies have been few.

The aim of this paper is to identify whether operations in existing buildings, especially rehabilitation, can actively contribute for various dimensions of rural development, analysing interactions between policies and key-drivers. First, strategic documents related with future action in existing buildings are analysed, identifying key aspects to be pursued. Then, documents dedicated to rural sustainable policy are analysed and synthesized, pointing out drivers that contribute to the development of these regions. Finally, an exploratory exercise crossing these drivers with key aspects on policies for existing buildings is presented.

## **2 EXISTING BUILDINGS: POLICIES AND LINES OF ACTION**

Operating in existing buildings is key to the decarbonisation of building stock. Interventions such as rehabilitation, refurbishment and retrofit actions have been proven to contribute towards this goal, given their role in extending the life of the building whilst improving performance, minimising resource consumption and fostering efficiency and resilience (Mouraz *et al.*, 2023; Sing *et al.*, 2019).

Policymaking is a crucial instrument to support these goals. Creating documents that lay the foundations to more informed changes while defining common goals and clear lines of action are required to achieve progress in the construction sector. Moreover, adapting international directives to national contexts is equally important. Developing national strategies based in international documents must consider economic, environmental, and social factors that are particular of each country, which will reflect on different pathways towards the same global target of decarbonisation and energy efficiency (Zhang *et al.*, 2021).

An example of an international document that shaped the way towards more informed action in buildings is the "*Global ABC Roadmap for*

*buildings and construction 2020-2050*" (GlobalABC/IEA/UNEP, 2020). It was prepared by the International Energy Agency (IEA) for the Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC) with the goal of creating a common vision for zero-emission and efficient built environment for eight areas of action, including existing buildings, until 2050.

This roadmap stands out by defining policy targets that are in line with previous concerns. These targets are divided in six key policies for driving performance in existing buildings, namely:

- **Energy retrofits** and **building refurbishments**: despite comprehending different degrees of action, both types of intervention are outlined as fundamental towards improving performance and increasing lifetime;
- **Codes**: creating standards for existing buildings that ensure interventions which balance performance with cost-effective potential is defined as a priority, considering different types of buildings and depths of interventions;
- **Building passports** and **building labelling**: fostering knowledge in existing buildings contributes to more informed decision-making processes. Stating basic information through passports and creating labels for efficiency should increase information and awareness of various stakeholders;
- **Incentives**: either non-financial or financial, incentives are key to boost action in existing buildings.

As an example of national documents that define relevant strategies for existing buildings, we can outline the Long-Term Strategy for Building Renovation in Portugal (LTRS PT) defined by the Portuguese Government in 2021 (Presidency of the Council of Ministers, 2021). Aiming at meeting European directives and goals of carbon neutrality and energy efficiency in existing buildings, the LTRS PT establishes a roadmap with measures, progress indicators and targets for 2030, 2040 and 2050. This roadmap is divided in seven areas of action adapted to the Portuguese context, which include financial incentives, normative and regulatory framework, training and qualification of professionals, innovation, vulnerable households, and monitoring and information. These areas are in line with the key-drivers for existing buildings defined in the Global ABC document, which underlines the coherence between international and national documents for achieving common goals.

The importance of renovation, retrofit or refurbishment, which for the purpose of this paper will be considered rehabilitation actions, is highlighted in both documents, stressing their recognition in both international and national contexts as a pathway to sustainability in the building sector.

### 3 STRATEGIES FOR SUSTAINABLE RURAL DEVELOPMENT

#### 3.1 Introduction

The definition of strategies dedicated to improving the existing building stock in national contexts doesn't usually delve into *nuances* of territorial development that are relevant for the effective implementation of policies, namely considering urban and rural environments.

The existing disparity between urban and rural territories raises important questions in meeting sustainable development and territorial cohesion (Mouraz *et al.*, 2023). Urbanisation and the consequent abandonment of rural areas is a real conjecture that remains overlooked in several areas of knowledge, counteracting the concept of territorial cohesion and negatively impacting sustainable development (Yin *et al.*, 2019). Addressing rural territories as catalysts for change, mitigating territorial inequalities and looking into challenges they entail, is vital for achieving goals defined on a national basis.

Investing on structured policies and strategies for rural territories is key for promoting change. The following sections present a set of paramount documents that define strategies for rural territories, namely on international and national levels. Then, these documents are synthesized into key-aspects that must be considered in a future sustainable development.

#### 3.2 Documents and strategies on rural policy

Three documents representing paramount approaches on the definition of rural policy were identified and are presented below, considering both international and national (Portuguese) contexts.

- “A long-term Vision for the EU's Rural Areas - Towards stronger, connected, resilient and prosperous rural areas by 2040” (European Commission, 2021)

This document recognizes the need to improve quality of life, promote balanced territorial development and stimulate growth in rural areas, especially considering EU's goal on green and digital transitions and the experience of the pandemic. Rural territories are acknowledged as active players on tackling these challenges, calling for a new paradigm in the way they are perceived by stimulating new opportunities.

Four complementary areas of action are identified (Figure 1), embodying the goals of connected, stronger, resilient, and prosperous rural areas by 2040. In terms of stronger rural areas, attention is drawn to the importance of fostering vibrant and informed local communities, who act in decision-making processes. These people need to access essential services that

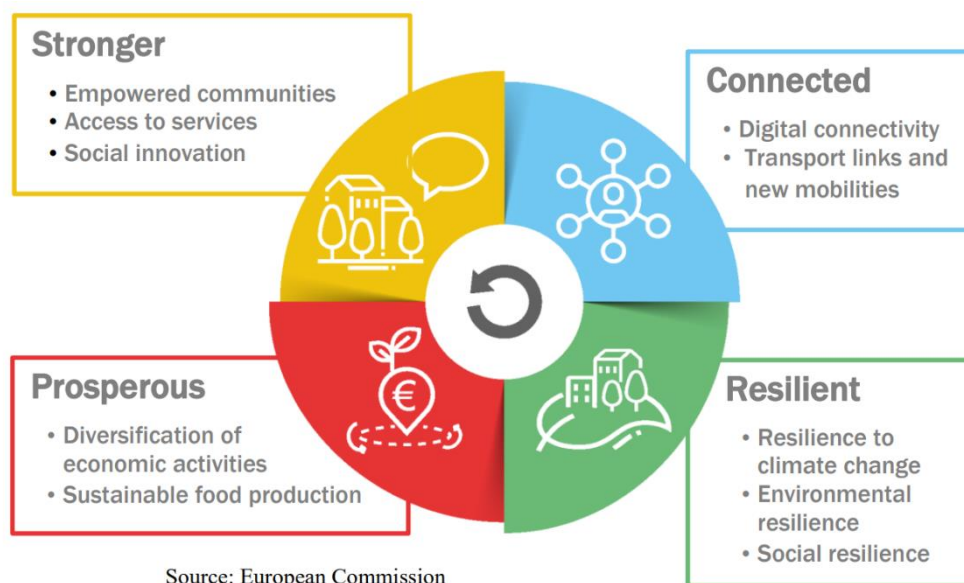


ensure rural areas are attractive places to live in and represent a qualified way of life. Also, innovation is key in reinforcing attractiveness.

Development also relies on counteracting isolation, both physical and digital. Maintenance and improvement of transportation means and infrastructures are key, promoting relations with other rural and urban territories. Digital connectivity contributes to engaging these areas in digital transition, promoting their attractiveness as hub for the development and deployment of new solutions and ways of life.

Promoting resilience to climate change, natural hazards and economic crises is also highlighted. Also, the coexistence of different economic activities is essential for the benefit of these areas and their communities. This diversification also supports prosperity, creating new sectors affecting employment based on sustainable local strategies.

**Figure1 – Complementary areas for action and respective drivers shaping the future for rural areas.**



Source: European Commission

**Source:** European Commission (2021)

- “OECD Principles on Rural policy” (OECD, 2019)

More than 20 years of OECD's work on rural developed culminated on these principles, formally adopted in March 2019. They are based on a set of premises for place-based policies, namely: delivery of well-being to all, preparation of rural areas for demographic, technological and environmental changes, diversity of challenges and opportunities these

areas face, importance of multi-level governance and community-led development, and information deriving from evidence and data in appropriate scales. The 11 principles are as follows:

1. *Maximise the potential of all rural areas;*
2. *Organise policies and governance at the relevant geographic scale;*
3. *Support interdependencies and co-operation between urban and rural areas;*
4. *Set a forward-looking vision for rural policies;*
5. *Leverage the potential of rural areas to benefit from globalisation, trade and digitalisation;*
6. *Support entrepreneurship to foster job creation in rural areas;*
7. *Align strategies to deliver public services with rural policies;*
8. *Strengthen the social, economic, ecological and cultural resilience of rural communities;*
9. *Implement a whole-of government approach to policies for rural areas;*
10. *Promote inclusive engagement in the design and implementation of rural policy;*
11. *Foster monitoring, independent evaluation, and accountability of policy outcomes in rural areas.*

This set of principles targets both high levels of governance, such as governments, as well as subnational levels and stakeholders involved in rural policy. They are intended to provide guidance on how a functional approach to development can contribute to social, economic, and environmental dimensions of rural areas.

- *Portuguese National Spatial Planning Policy Program (PNPOT) (Assembleia da República, 2019)*

PNPOT is the Portuguese top instrument of territorial management, defining objectives and strategic options for territorial development (Direção Geral do Território, 2023). It serves as the reference framework for other programs and plans, as well as a guiding instrument for territorial strategies. It is composed of three figures regarding the territory: diagnosis, strategy and model, and agenda (or action program). The agenda defines 10 compromises for territories, along with 50 measures for territorial policy, including "Boost active policies for rural development" (measure 3.2). This measure is subdivided in 11 operational goals, such as promoting economic and sustainable development of rural territories, improve the quality of life in rural areas, create new economic activities to value and regenerate local assets, or boost collaborative rural innovation networks.

PNPOT intends to act as a vector to cast increased attractiveness of rural areas in Portugal, create cooperation networks for the transfer of knowledge and innovation, minimise situations of demographic loss in

rural areas, foster of new economic initiatives, and increase value of endogenous resources and assets with potential for tourism.

### 3.3 Key-aspects and future lines of action

The documents presented above call for change in several areas that impact development of rural territories. There are common ideas and goals to all documents, such as economic diversification of activities, digital connectivity, or resilience, highlighting common ground on future actions for rural territories. Considering these documents and their underlying principles and suggestions for action, nine key-aspects on future strategies for sustainable development of rural territories were identified. Table 1 indicates how each of the analysed documents and the measures they entail contribute to each of the key-aspects, which are synthesized below:

- **Local governance, adapted policies and monitoring:** it is crucial to implement rural policies attending to current needs and constraints that are tailor-made to each territory. This process should combine effective governance structures that operate at local level with the need to engage diverse stakeholders, enabling individuals to participate in decision-making processes and fostering **empowered and informed communities**;
- Effective **access to services, transports, and mobility** is key to assure rural areas are attractive places to live and work, guaranteeing water, sanitation, healthcare, energy, transport means or, when required, adequate adaptations. Reducing population pressures the provision of these services, which calls for **innovation** in practices and approaches.
- Ensuring **connectivity** must be tackled in numerous perspectives. Firstly, making the most of digitalisation investing in infrastructure and technologies that improve attractiveness is key. Secondly, improving access to these settlements, as well as exploring functional relationships with surrounding rural, peri-urban and urban territories;
- The importance of **diversifying economic activities** and fostering entrepreneurship is clear in all documents. This can be achieved through innovation and value-added activities in emerging and established sectors. Also, fostering mechanisms to support entrepreneurs accessing capital, as well as supporting access to training opportunities, is crucial. Besides promoting new sectors, which have positive effects on employment and improved added-value, activities such as agriculture, should be preserved, creating demand for local products through environmentally sustainable strategies;

**Table 1 – Synthesis on key-aspects for rural sustainable policies**

		Key aspects on rural sustainable policy							
		Empowered communities	Services and mobility	Innovation	Connectivity	Diverse economies	Resilience	Governance monitoring	Culture, heritage and landscape
EU Rural Vision	Empowered communities	1							
	Access to services		1						
	Social innovation			1					
	Digital connectivity				1				
	Transport and mobility		1						
	Diverse economic activities					1			
	Sustainable food production								
	Resilience to climate change						1		
	Environmental resilience						1		1
	Social resilience					1			
OECD Principles on Rural Policy	Adapted policies							1	
	Effective local governance	1						1	
	Cooperation rural-urban							1	
	Vision for rural areas							1	
	Globalisation, digitalisation				1				
	Job creation and entrepreneurship					1			
	Public services		1						
	Resilience						1		1
	Government awareness							1	
	Engagement in policies							1	
	Monitoring							1	
PNPOT	Economic and sustainable development					1			
	Quality of life	1							
	New economies					1			
	Young rural entrepreneurs					1			
	Rural innovation processes			1					
	Maintenance family farming								
	Local development strategies						1		
	Local food systems								
	Landscapes and culture								1
	Rural innovation networks			1	1				
Partnerships for services									

- **Resilience to climate change and environmental hazards** can be achieved through actions such as restoring natural landscapes, use of renewable energy sources, sustainable agricultural practices, or preservation of natural resources. Also, practices that value and maintain **culture, heritage and natural landscapes** play a crucial role in strengthening social and cultural resilience of rural communities.

#### 4 EXISTING BUILDINGS AND RURAL SUSTAINABLE POLICIES: INTERACTIONS

Section 2 presented examples of policy documents which establish guidelines for future action in existing buildings. The GlobalABC roadmap, for example, establishes six key-drivers which include building retrofits and refurbishments as a necessary line of action to pursue in the future, which highlights the importance of rehabilitation actions towards goals of energy efficiency and carbon neutrality in building stock.

On section 3 we explored and identified key drivers on sustainable rural policy considering three documents that establish guidelines on the matter. This synthesis enabled the identification of nine key-aspects that can positively influence rural sustainable development.

However, given how the role of building rehabilitation actions in sustainable rural development remains highly unexplored, this section presents an exploratory exercise in which levels of interaction were defined between policies for existing buildings, namely the ones present on GlobalABC roadmap, and key-drivers for sustainable rural development obtained on section 3 (Table 2).

Focusing on the first column of Table 2, dedicated to building rehabilitation actions, strong interactions were found with several key-drivers for rural development. First, improving performance in buildings and providing them with new functionalities, either in construction elements or technical installations, boosts **connectivity** and digitalisation. Also, developing or improving infrastructure grants access and increases attractiveness in these territories.

High interactions were also found regarding the impact of rehabilitation in improving **resilience**. At building scale, resilience can be defined as its capacity to “withstand changes (functional as well as structural) throughout historic periods” (Dabija, 2021), which is coherent with the main goal of rehabilitation interventions. Furthermore, improving vernacular buildings, which are typical of rural areas, and which embody a sustainable and resilient response with local **environment, climate and culture** are fundamental aspect to consider in these territories (Widera, 2021). Promoting holistic rehabilitation actions in rural buildings in general, and vernacular rural buildings in particular, combining the improvement

of technical performance with maintenance of heritage values, should become a priority.

**Table 2: Interactions between policies for existing buildings and key-drivers for sustainable rural development**

Drivers for sustainable rural development	Policies for existing buildings			
	Rehabilitation (e.g. retrofits, refurbishment)	Codes and standards	Building labelling and/or passports	Other incentives
Empowered communities	2	1	3	2
Services and mobility	2	1	2	3
Innovation	3	2	2	2
Connectivity	3	2	2	3
Diverse economies	2	3	2	3
Resilience	3	3	2	2
Culture, heritage and landscape	2	2	2	3

**Levels of interaction:** 1 (Low); 2 (Medium); 3 (High)

Also, the impact of building rehabilitation in social development should not be overlooked, given how these interventions improve quality of life of **communities and their empowerment**, fostering social cohesion, well-being and integration. By allowing new building uses and thus stimulating the inclusion of **diversified economies and new services**, the role of rehabilitation in enhancing economic development, fostering **innovation** and generating value is also highlighted as a significant synergy.

Interactions between the remaining policies on existing buildings and key-drivers for rural development were also found. As examples, adapted standards and codes can contribute to more qualified interventions, and investing on building passports and labelling can contribute to more informed building users.

## 5 CONCLUSIONS AND FINAL REMARKS

The need for changes in the construction sector towards sustainable development is clear. Improving existing buildings through rehabilitation actions is a vector towards this end, given how it contributes to environmental, economic and social perspectives. However, the impact of rural settlements in a global perspective of change remains highly uncharted. Developing research which explores drivers for rural development and crossing them with interventions in existing buildings, looking into interactions and synergies, is key.

This paper aimed at shedding light on the previously stated problem, delving into the role that building rehabilitation can have on sustainable rural development. Aspects such as promoting resilience in existing buildings while allowing for new uses and functionalities were identified, fostering innovation and improving connectivity. Improving the existing building stock in rural territories can also lead to stronger communities whilst valuing cultural and heritage values, highlighting significant interactions in a variety of dimensions, namely the ones that compose sustainable development.

Future works should deepen research on the identified key aspects to understand which should be further explored, contributing to bridge the gap between rural and urban development. Also, other policies related with existing buildings and their improvement should be investigated, examining further interactions and their impact in rural territories. Furthermore, finding effective ways to communicate these advantages and how to effectively accomplish them, disclosing information to the various stakeholders, should also be pursued as tools for awareness towards this complex problem and its mitigation.

### FUNDING

This research was funded by the European Union through the European Social Found and the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) through the grant with reference 2021.07322.BD and DOI identifier 10.54499/2021.07322.BD.

### REFERENCES

ASSEMBLEIA DA REPUBLICA. Lei n.º 99/2019, de 5 de setembro. 2019, p. 3–267.

DABIJA, A. Durability, Resilience and Sustainability in the Building Rehabilitation Process. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1203, n. 3, p. 032104, 2021. ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899x/1203/3/032104.

DIREÇÃO GERAL DO TERRITÓRIO. **PNPOT- Sobre**. 2023. Available at: <https://pnpot.dgterritorio.gov.pt/pcat/pcatsite/>. Accessed in: 22 mar. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **A long-term Vision for the EU's Rural Areas - Towards stronger, connected, resilient and prosperous rural areas by 2040**. Brussels. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0345>.

GLOBALABC/IEA/UNEP. **GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector**. Paris. Available at: [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/Global\\_Roadmap\\_FINAL.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/Global_Roadmap_FINAL.pdf).

MOURAZ, C.P.; FERREIRA, T.M.; MENDES SILVA, J. Building rehabilitation, sustainable development, and rural settlements: a contribution to the state of the art. **Environment, Development and Sustainability**. DOI: 10.1007/s10668-023-03664-5.

OECD. **OECD Principles on Rural policy**. Paris, France. Available at: [https://web-archive.oecd.org/2019-10-02/531927-Principles on Rural Policy Brochure 2019\\_Final.pdf](https://web.archive.org/2019-10-02/531927-Principles_on_Rural_Policy_Brochure_2019_Final.pdf).

PRESIDENCY OF THE COUNCIL OF MINISTERS. Resolution of the Council of Ministers n.º 8-A/2021. 2021, p. 16-(2) a 16-(105).

SING, M.C.P.; LOVE, P.E.D.; LIU, H.J. Rehabilitation of existing building stock: A system dynamics model to support policy development. **Cities**, v. 87, p. 142–152, 2019. DOI: 10.1016/j.cities.2018.09.018.

WIDERA, B. Comparative analysis of user comfort and thermal performance of six types of vernacular dwellings as the first step towards climate resilient, sustainable and bioclimatic architecture in western sub-Saharan Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 140, p. 110736, 2021. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.110736.

YIN, X.; CHEN, J.; LI, J. Rural innovation system: Revitalize the countryside for a sustainable development. **Journal of Rural Studies**, 2019. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2019.10.014.

ZHANG, H.; HEWAGE, K.; KARUNATHILAKE, H.; FENG, H.; SADIQ, R. Research on policy strategies for implementing energy retrofits in the residential buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 103161, 2021. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103161.





## **GESTÃO DA MANUTENÇÃO COM SUPORTE NA VISUALIZAÇÃO DINÂMICA DE DADOS**

MATOS, RAQUEL (1); ALVES, ANA (1); RODRIGUES, HUGO (1); COSTA, ANÍBAL (1); RODRIGUES, FERNANDA (1)

(1) RISCO, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, E-mail: [rvpm@ua.pt](mailto:rvpm@ua.pt), [anadralves@ua.pt](mailto:anadralves@ua.pt), [hrodrigues@ua.pt](mailto:hrodrigues@ua.pt), [agc@ua.pt](mailto:agc@ua.pt), [mfrodrigues@ua.pt](mailto:mfrodrigues@ua.pt).

### **RESUMO**

A plataforma Microsoft Power Business Intelligence (BI) é uma ferramenta de visualização de dados dinâmicos que facilita a gestão e análise gráfica, sendo particularmente útil para auxiliar na tomada de decisão na gestão da manutenção de ativos. Foi desenvolvida uma metodologia que possibilita a integração de várias ferramentas no Power BI, nomeadamente: ferramentas tradicionais de avaliação dos edifícios com recurso a indicadores de desempenho quantitativos e dos modelos de edifícios desenvolvidos com a metodologia BIM (Building Information Modelling), através da API (Application Programming Interface) 3DBI API. Esta incorporação permite interações dinâmicas entre a informação contida no modelo BIM e a informação do Power BI. Foram desenvolvidos dashboards com informação sobre anomalias, a sua extensão, o estado atual dos sistemas e a frequência das atividades de manutenção preventiva de diferentes elementos construtivos de um edifício, e efetuou-se a correlação do tipo e extensão das anomalias com o seu impacto na redução do desempenho do edifício ( $P_n$ ). Esta abordagem fornece informações essenciais para se compreender quais as anomalias que influenciam mais significativamente na diminuição do desempenho do edifício. Ao identificar correlações com anomalias mais graves, a visualização ajuda a identificar os fatores críticos que contribuem para o impacto global no desempenho do edifício, facilitando a tomada de decisões específicas na gestão da manutenção. Conclui-se que a integração e inter-relação BIM-Power BI fornece uma visão holística do edifício, uma análise de dados em tempo real, uma visualização gráfica rápida, que apoia a tomada de decisões e estabelece prioridades de intervenção, evitando erros na análise de dados numéricos.

**Palavras-chave:** Power BI, Manutenção, Edifícios Públicos, Universitários.

### **ABSTRACT**

*The Microsoft Power Business Intelligence (BI) platform is a dynamic data visualization tool that facilitates management and graphical analysis, making it particularly useful in aiding decision-making in asset*

*maintenance management. A methodology was developed to integrate various tools into Power BI, including traditional building assessment tools using quantitative performance indicators and building models developed with the BIM (Building Information Modelling) methodology, through the 3DBI API (Application Programming Interface). This integration enables dynamic interactions between the information contained in the BIM model and the Power BI data. Dashboards were developed to provide information on anomalies, their extent, the current state of systems, and the frequency of preventive maintenance activities for different building elements. Additionally, a correlation was established between the type and extent of anomalies and their impact on the reduction of building performance (Pn). This approach provides essential insights into which anomalies most significantly influence the decrease in building performance. By identifying correlations with more severe anomalies, the visualization helps pinpoint the critical factors that contribute to the overall impact on building performance, facilitating specific decision-making in maintenance management. The conclusion is that the BIM-Power BI integration and interrelation provide a holistic view of the building, real-time data analysis, quick graphical visualization, support for decision-making, and help in establishing intervention priorities, thereby avoiding errors in the analysis of numerical data.*

**Keywords:** Power BI, Maintenance, Public Buildings, University.

## 1 INTRODUÇÃO

A Gestão de Instalações é uma profissão que abrange múltiplas disciplinas para garantir a funcionalidade do ambiente construído, integrando pessoas, espaços, processos e tecnologia (Roper & Payant, 2014). Esta atividade é desafiadora devido ao vasto leque de áreas em que deve atuar, incluindo comunicação, preparação para emergências, gestão ambiental e sustentabilidade, finanças e negócios, fatores humanos, liderança e estratégia, operações e manutenção, gestão de projetos, qualidade, gestão de imóveis e propriedades, e tecnologia. As pressões contínuas para a redução de custos na gestão de ativos tornam este setor particularmente vulnerável, resultando em repercussões significativas a longo prazo, especialmente em grandes parques edificados. Nesse contexto, surge um desafio constante: a necessidade de desenvolver e implementar ferramentas que facilitem o trabalho no setor, preenchendo lacunas e aprimorando a eficácia das operações de manutenção e gestão.

Embora a metodologia Building Information Modelling (BIM) tenha trazido grandes vantagens para a gestão de ativos, integrando digitalmente o ciclo de vida do edificado e unificando informações geométricas e paramétricas, a integração dessa metodologia com sistemas de gestão de ativos ainda enfrenta lacunas significativas. A principal limitação reside na fragmentação da informação entre diferentes plataformas e ferramentas de gestão, o que dificulta a utilização completa e eficaz das informações disponíveis. Além disso, muitos sistemas existentes não

aproveitam plenamente o potencial da integração BIM, limitando a capacidade de fornecer uma visão holística e dinâmica das operações de manutenção e gestão.

No âmbito do BIM, existem os sistemas de gestão designados Integrated Workplace Management Systems (IWMS - termo que surgiu em 2000). O IWMS é um conceito que inclui os softwares que unificam todas as propriedades dos edifícios numa única plataforma. Inclui a gestão de imóveis, de arrendamentos, a gestão de instalações e espaços, a gestão de ativos e a manutenção, a gestão de projetos e a sustentabilidade ambiental (Teicholz, 2012). Os software Archibus e Planon são exemplos de IWMS (Planon Building Connections, 2024). De acordo com May & Krämer (2023) a integração das ferramentas BIM em plataformas de Tecnologias de Informação (TI) usadas em Facility Management (FM) não é comumente explorada. No entanto, esta relação pode contribuir para agilizar a prática de gestão de ativos.

A lacuna identificada é a necessidade de uma solução que não apenas integre a informação geométrica e paramétrica fornecida pelo BIM, mas também ofereça uma interface intuitiva e flexível que permita a visualização e análise eficaz dos dados em tempo real. O Power BI surge como uma alternativa viável, oferecendo uma interface intuitiva e flexível que pode ser facilmente integrada com o BIM para melhorar a gestão de ativos. Ao proporcionar uma visualização gráfica dos dados e facilitar a personalização dos dashboards, o Power BI pode preencher a lacuna existente entre o BIM e os sistemas tradicionais de gestão de ativos, proporcionando uma ferramenta mais acessível e rápida para profissionais de FM.

Assim, este artigo explora a integração e interação do modelo BIM com o Power BI para beneficiar a prática de gestão de ativos. O Power BI oferece uma solução prática e eficiente, com uma interface que reduz a complexidade da visualização e análise de dados, abordando diretamente a lacuna na integração das ferramentas BIM e permite melhorar a eficácia na gestão de ativos (Rodrigues et al., 2022).

Neeste trabalho, a aplicação do Power BI como apoio à gestão da manutenção do parque edificado público, terá como protótipo o Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. As metodologias aplicadas a este departamento podem ser replicadas para distintos edifícios universitários ou edifícios com diferente uso.

## **2 MÉTODO E APLICAÇÃO**

### **2.1 Metodologia**

Para se atingirem os objetivos propostos foi definida a metodologia que se traduz nas cinco fases que se indicam de seguida:

1. Introdução dos dados paramétricos no modelo tridimensional desenvolvido no software Autodesk Revit (modelo Revit 3D BIM).

2. Extração de dados do modelo Revit através da 3DBI API.
3. Carregamento de dados para o Power BI.
4. Organização de dados no Power BI.
5. Visualização dinâmica no dashboard do Power BI.

## 2.2 Estudo de caso

A representação geométrica de parte do parque edificado do Campus Universitário de Santiago da Universidade de Aveiro, onde se insere o edifício em estudo - o Departamento de Geociências (Figura 1) - foi criada como um modelo de massas no Autodesk Revit, cujo edifício em estudo está assinalado na Figura 2.



**Figura 1 – Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro**

Fonte: Autor



**Figura 2 – Modelo de parte do Campus Universitário de Santiago**

Fonte: Autor

No âmbito do trabalho desenvolvido pelos autores, os dados obtidos para o KPI (mais precisamente o BPI – Building Performance Indicator,

desenvolvido por Shohet (a) et al. (2003), Shohet (b), (2003), Shohet (c), (2003), e ajustado por Matos et al. (2022) e Matos et al. (2023)), durante as inspeções e o diagnóstico do edifício, foram introduzidos no modelo 3D BIM como parâmetros partilhados:

$C_n$  - desempenho físico atual do sistema;

$\%Aext_n$  - extensão da anomalia no sistema  $n$ ;

$PM_n$  - frequência da manutenção preventiva atualmente implementada nos sistemas;

$W_n$  - importância de cada sistema do edifício estabelecido de acordo com o inquérito efetuado a gestores de manutenção de campi universitários (Matos et al., 2023).

$W(C)_n$  - importância da condição da componente do sistema  $n$ .

$W(Aext)_n$  - importância do parâmetro da extensão da anomalia no sistema  $n$ .

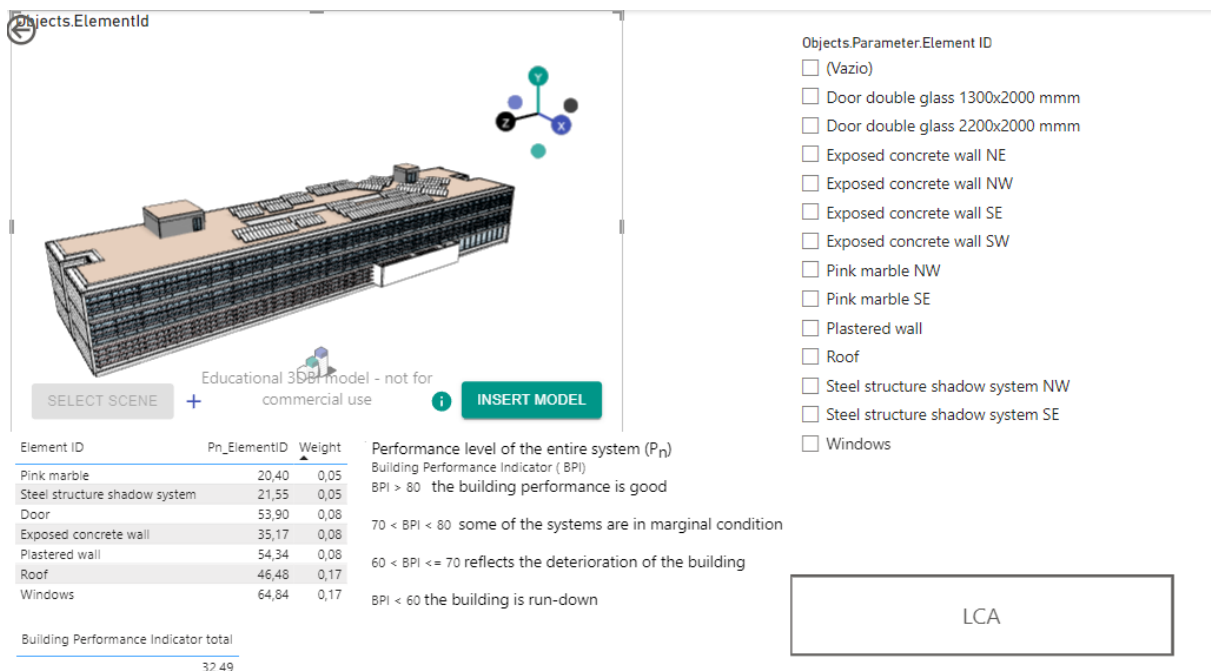
$W(PM)_n$  - importância da frequência da manutenção preventiva para o sistema  $n$ .

Estes parâmetros permitem o cálculo do desempenho de cada sistema construtivo ( $P_n$ ) através da Eq. 1, que posteriormente foi integrado no cálculo do BPI:

$$P_n = C_n \times W(C)_n + \%Aext_n \times W(\%Aext)_n + PM_n \times W(PM)_n \quad (1)$$

A API 3DBI foi utilizada para extrair os metadados num ficheiro .json do modelo Revit. A API 3DBI foi criada pela INFORMAXYZ BV, cuja versão é 3.1.1558.0. O 3DBI é um visualizador de modelos 3D para o Microsoft Power BI, que permite ao utilizador visualizar diretamente os dados sobre os ativos no seu contexto espacial. É possível utilizá-lo como um suplemento para o Trimble SketchUp, Autodesk Revit, ficheiros IFC. O add-in do 3DBI para Revit permite visualizar a geometria e os dados do modelo Revit no Microsoft Power BI. O Power BI permite a combinação de fontes de dados externas, tais como folhas de Excel, bases de dados com os dados BIM. Neste trabalho, toda a informação relacionada com os KPI foi obtida direta e automaticamente a partir do modelo Revit.

O ficheiro .json permitiu a importação para o Power BI da informação sobre os elementos do modelo tridimensional, bem como o seu id e propriedades, relações, sistema de classificação, parâmetros de projeto e partilhados e outros metadados. Estes dados são essenciais para a transformação dos dados numa representação interativa e também para a obtenção do modelo 3D no dashboard do Power BI (Figura 3).

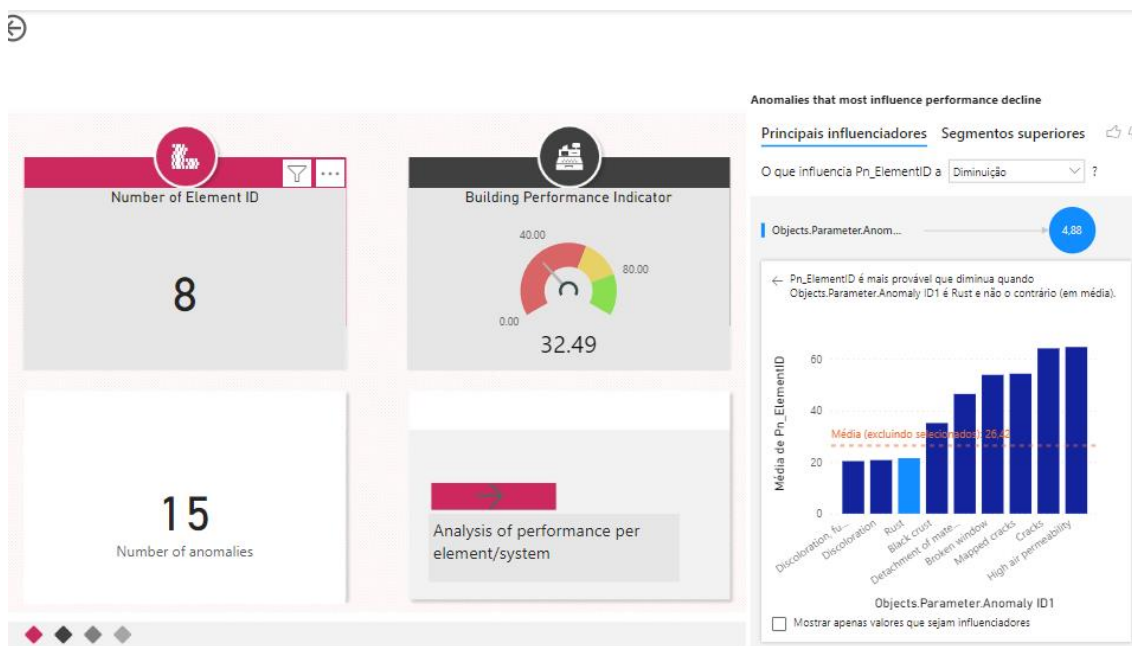


**Figura 3 – Vista do Power BI com o modelo 3D BIM do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro**

Fonte: Autor

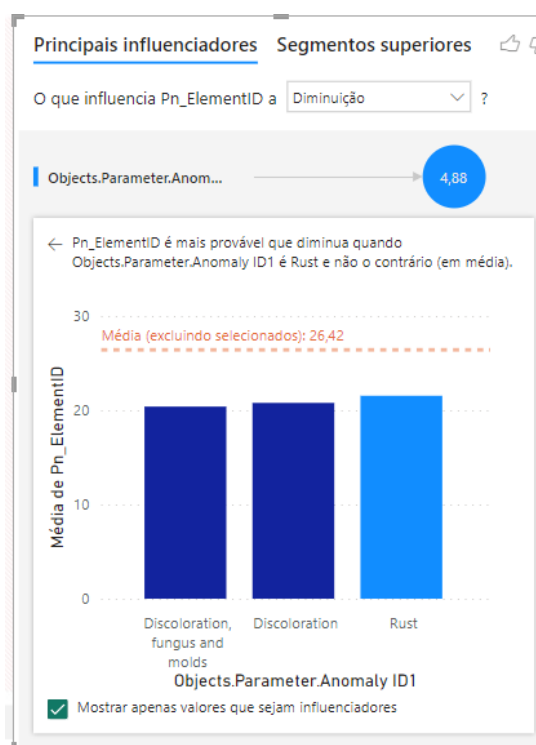
O modelo tridimensional é interativo com todos os dados já importados para o Power BI, o que significa que ao clicar em qualquer elemento do modelo, o Power BI relaciona a informação dos restantes parâmetros relativos a esse elemento.

A visualização dinâmica dá uma visão resumida do número de elementos diferentes que estão a ser estudados, quantas anomalias diferentes se estão a manifestar e o indicador de desempenho global também pode ser visualizado. O Power BI permite ainda a elaboração de gráficos de variáveis onde se podem verificar os principais influenciadores que causam degradação do edifício (Figura 4). Neste caso, foi elaborado um gráfico que mostra como o número e os tipos de anomalias influenciam a diminuição do  $P_n$ . Para este caso específico, as anomalias que mais influenciam a diminuição do  $P_n$  são a descoloração, fungos e bolores nas fachadas, a descoloração das fachadas e a corrosão na estrutura metálica do sistema de sombreamento. Os elementos que têm pior desempenho correspondem aos que apresentam as anomalias com maior extensão (Figura 5).



**Figura 4 – Síntese de informação obtida no Power BI**

Fonte: Autor



**Figura 5 – Principais anomalias que contribuem para a redução de Pn**

Fonte: Autor

Para facilitar a análise dos dados, foi utilizado o Tachometer versão 3.0.1.0, desenvolvido pela Annik Inc, para apresentar a informação de uma forma que possa ser compreendida intuitivamente. Os ângulos de início e de fim, a orientação, a cor, as etiquetas e a escala dos eixos são configuráveis, o que constitui um meio visual ideal para comunicar medidas de desempenho baixo, aceitável e elevado. Neste caso, foi utilizado para apresentar o desempenho de cada sistema do edifício. Desta forma, é fácil compreender se o sistema se encontra num estado aceitável ou se possui deficiências (Figura 6).



**Figura 6 – Dashboard relativo ao desempenho de cada sistema do edifício**

Fonte: Autor

É possível perceber que os elementos em pior estado são as lâminas de mármore rosa e a respetiva estrutura metálica, do sistema de sombreamento, seguido da parede de fachada de betão aparente. Este facto é coincidente com os elementos onde se apresentam os principais influenciadores de anomalias na Figura 4, uma vez que se verifica uma elevada extensão de descoloração no mármore rosa, bem como corrosão na estrutura metálica do sistema de sombreamento.

### 2.3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A quantidade de dados disponíveis no modelo 3D BIM, quando apresentada sem uma visualização apropriada, torna difícil comparação direta entre os diferentes elementos do edifício. A extração de dados do modelo, utilizando o plug-in 3DBI, permite uma atribuição mais precisa dos valores Cn, quase por elemento, no modelo.

O valor do BPI obtido e apresentado pelo Power BI (32,49) indica um estado do edifício que varia entre degradado e perigoso, alinhando-se com a avaliação previamente calculada sem recurso à integração



modelo BIM-Power BI. A análise da plataforma dinâmica revela ainda quais são as anomalias mais graves para o desempenho do edifício, que é fortemente condicionado pelos sistemas construtivos que apresentam anomalias mais extensas. Destacam-se as anomalias presentes em toda a estrutura de aço do sistema de sombreamento, a descoloração de uma parte significativa das lâminas de mármore rosa no sistema de sombreamento, descoloração, fungos e bolores, bem como uma crosta negra numa grande parte da fachada principal e das lâminas de mármore rosa. Verificou-se que os resultados obtidos para o  $P_n$  estão de acordo com os valores obtidos previamente através da análise numérica, na qual o sistema de sombreamento e a parede de betão apresentam os valores mais baixos de  $P_n$ , seguidos pelo sistema de cobertura, portas, parede rebocada e janelas, por ordem decrescente de valores de  $P_n$ .

### **3 CONCLUSÕES**

A integração da plataforma Microsoft Power BI com a metodologia BIM apresentada, revelou-se uma ferramenta eficaz para a gestão da manutenção de ativos. A capacidade do Power BI de traduzir grandes volumes de dados em visualizações gráficas dinâmicas facilita a tomada de decisão, especialmente no contexto da gestão de ativos. A utilização do Power BI como uma plataforma unificadora permitiu a integração eficiente de diferentes metodologias, incluindo indicadores de desempenho quantitativos e os modelos BIM num único ambiente visual, como apresentado especificamente neste trabalho.

A sinergia entre Power BI e BIM, permitida através da API 3DBI, melhorou a visualização dos dados, mas também ofereceu uma compreensão mais profunda das anomalias e do seu impacto no desempenho dos edifícios. A capacidade do Power BI de relacionar o tipo e a extensão das anomalias com a redução do desempenho do edifício ( $P_n$ ) destaca-se como uma contribuição crucial para a identificação de fatores críticos, permitindo a priorização de intervenções e a adoção de medidas preventivas mais eficazes.

Além disso, a representação gráfica do tacómetro, permite uma visualização rápida, auxilia na tomada de decisões e no estabelecimento de prioridades de intervenção. Ajuda a evitar erros de visualização que podem ocorrer na análise de dados numéricos.

Por fim, conclui-se que a metodologia desenvolvida apoia a gestão da manutenção e o desempenho dos edifícios, oferece uma base sólida para a continuidade da aplicação futura contribuindo significativamente para a melhoria contínua das práticas de gestão de ativos.

### **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fulbright Scholarship Program PS00342214, atribuída à primeira autora (R. Matos). Este trabalho

foi financiado pelo Governo Português através da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) e o Fundo Social Europeu através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/147532/2019, atribuída à primeira autora (R. Matos). Este trabalho foi parcialmente financiado Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT)-Aveiro Research Centre for Risks and Sustainability in Construction (RISCO), Universidade de Aveiro, Portugal [FCT/UIDB/ECI/04450/2020].

## REFERÊNCIAS

MATOS, R., RODRIGUES, H., COSTA, A., & RODRIGUES, F. (2022). Building Condition Indicators Analysis for BIM-FM Integration. **Archives of Computational Methods in Engineering**. Volume 29, pages 3919–3942, (2022).

MATOS, RAQUEL, RODRIGUES, H., COSTA, A., REQUEJO, C., & RODRIGUES, F. (2023). Facility manager perspectives on building condition assessment for Portuguese higher education institutions. **Building Research and Information**, 51(8), 949–964. <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2204415>

MAY, M., & KRÄMER, M. (2023). **BIM in Real Estate Operations: Application, Implementation, Digitalization Trends and Case Studies**. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-40830-5>

PLANON BUILDING CONNECTIONS. (2024). "**CAFM | Computer Aided Facility Management**" available at accessed on 30 August 2024. <https://planonsoftware.com/us/glossary/cafm/>

RODRIGUES, F., ALVES, A., & MATOS, R. (2022). Construction Management Supported by BIM and Business Intelligence Tool. **Energies** 2022, 15(9), 3412; <https://doi.org/10.3390/en15093412>

Roper, K., & Payant, R. (2014). **The Facility Management Handbook**. AMACOM, 2014. ISBN-10: 0814432158

SHOHET (a), I. M., LAVY-LEBOVICH, S., & BAR-ON, D. (2003). Integrated maintenance monitoring of hospital buildings. **Construction Management and Economics**, 21(2), 219–228. <https://doi.org/10.1080/0144619032000079734>

SHOHET (b), I. M. (2003). Key performance indicators for maintenance of health-care facilities. **Facilities**, 21, 5–12. <https://doi.org/10.1108/02632770310460496>

SHOHET (c), I. M. (2003). Building evaluation methodology for setting maintenance priorities in hospital buildings. **Construction Management and Economics**, 21(7), 681–692. <https://doi.org/10.1080/0144619032000115562>

TEICHOLZ, E. (2012). Technology for facility managers: The impact of cutting-edge technology on facility management. **In Technology for Facility Managers: The Impact of Cutting-Edge Technology on Facility Management**.



## INFRAESTRUTURA HÚMIDA SUSTENTÁVEL RETARDANTE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS

REIS, RICARDO (1); SUSANA, LUCAS (2)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [costa.reis@ubi.pt](mailto:costa.reis@ubi.pt)

(2) Instituto Politécnico de Setúbal, E-mail: [susana.lucas@estbarreiro.ips.pt](mailto:susana.lucas@estbarreiro.ips.pt)

### RESUMO

Este artigo, dirige-se prioritariamente a entidades com responsabilidades no domínio do urbanismo e da proteção civil, proporcionando uma visão panorâmica atualizada da possibilidade melhorar as estratégias de prevenção e supressão aos incêndios florestais na interface urbano florestal. O projeto da Infraestrutura húmida sustentável retardante de incêndios florestais apresenta-se como uma solução de ocupação do solo, destinada a aumentar a resiliência dos ecossistemas florestais, especialmente na Serra da Estrela, contra incêndios florestais. A integração na interface urbano florestal é uma solução inovadora que permite criar uma separação física entre a vegetação e o edificado, na interface alargada, com diminuição da carga de combustível e da sua inflamabilidade, preservando a humidade dos combustíveis finos e, protegendo o edificado existente contra a severidade dos incêndios florestais. O desenvolvimento de uma infraestrutura com capacidade para minimizar as perdas de humidade do solo por evapotranspiração, permite uma contribuição efetiva para a preservação dos valores dos sub índices de teor de humidade no solo constituintes do *Fire Weather Index (FWI)*, nomeadamente os Índice de humidade dos combustíveis finos, índice de húmus e o índice de seca. A infraestrutura constitui ainda uma solução inovadora na prevenção do território à frequência de incêndios florestais, recuperação do solo após o fogo, aproveitando as cadeias de valor dos produtos endógenos.

**Palavras-chave:** Infraestrutura húmida Sustentável, Incêndios florestais, Retenção de Água, Materiais Endógenos, Resiliência

## ABSTRACT

*This article is addressed primarily to entities with responsibilities in the field of urbanism and civil protection, provided an updated overview of the possibility to improve forest fire prevention and suppression strategies at the urban forest interface. The project of sustainable forest fire retardant wet infrastructure is presented as a land-use solution, aimed at increasing the resilience of forest ecosystems, especially in the Serra da Estrela, against forest fires. The integration in urban forest interface is an innovative solution that allows to create a physical separation between vegetation and built-up, in the extended interface, with decrease of fuel load and its flammability, preserving the humidity of fine fuels and, protecting the existing building against the severity of forest fires. The development of an infrastructure capable of minimizing soil moisture losses by evapotranspiration, allows an effective contribution to the preservation of the values of sub-indices of soil moisture content constituents of the Fire Weather Index (FWI), namely the Index of moisture of fine fuels, humus index and the dry index. The infrastructure is also an innovative solution in preventing the territory to the frequency of forest fires, recovery of soil after fire, taking advantage of the value chains of endogenous products.*

**Keywords:** Sustainable Wet Infrastructure, Forest Fires, Water Retention, Endogenous Materials, Resilience

## **1 INTRODUÇÃO**

Pelo termo “Infraestrutura” entendemos, de uma forma muito geral e empírica tudo aquilo que se situa debaixo de uma construção, que geralmente é invisível e se localiza abaixo da cota do terreno, que no domínio da engenharia civil que se materializa num conjunto de tubagens, cabos e dispositivos para o transporte de águas, gás, eletricidade e comunicações.

É assim, em primeiro lugar, e objetivo primeiro que a solução de ocupação no solo da infraestrutura permita alcançar simultaneamente a conservação da natureza e biodiversidade, promovendo estruturas de suporte à manutenção da vida selvagem. Em segundo lugar, alargar o âmbito dando visibilidade aos produtos endógenos, com características de incorporação na infraestrutura, como os inertes de granito, biomassa florestal e o borel, estimulando o desenvolvimento e regeneração de um segmento económico existente, mas subaproveitado.

No processo de revisão de literatura e coleta de informações sobre os materiais endógenos com capacidade de incorporação na infraestrutura, e a intenção desta ser constituída em três camadas, primeira permitindo influenciar a fixação e retenção de água no solo, segunda retardar a evapotranspiração e terceira diminuir a carga de combustível disponível para combustão, os inertes de granito apresentam um valor acrescentado na obtenção dos objetivos propostos.

### **1.1 Utilidade prática de uma infraestrutura de retardante aos incêndios florestais**

A consolidação do sistema de proteção civil e a promoção da resiliência a catástrofes pelas populações encontram-se alicerçados na prevenção e preparação, integrando a visão e princípios da Proteção Civil Preventiva. É neste sentido que a prevenção se afigura como um conjunto de projetos e atividades, que levam em conta as linhas estratégicas orientadoras face a um conjunto de riscos coletivos, naturais, tecnológicos e mistos, com expressividade em Portugal para os incêndios florestais. A infraestrutura tem por objetivo a proteção de pessoas e bens, localizadas na interface urbano-florestal, zonas de proteção aos aglomerados e em infraestruturas estratégicas, pela sua incorporação pela ocupação do solo, como medida de autoproteção e de preparação face a incêndios rurais, por forma a reforçar a sua segurança.

## **2 MATERIAIS ENDÓGENOS - GRANITO**

As rochas naturais são um material de construção muito comum, e sua estabilidade desempenha um papel importante na segurança e durabilidade de túneis, encostas de talude e demais projetos de estruturas [1]. Os resultados mostram que os materiais rochosos apresentam diferentes graus de variação nas propriedades físicas e

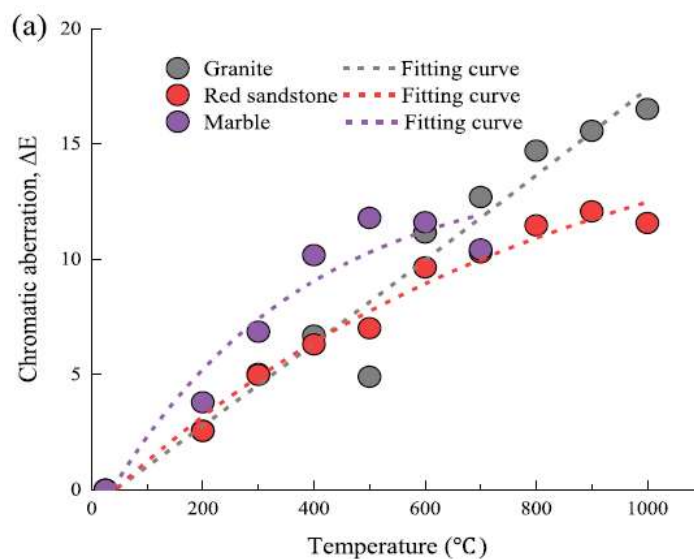
mecânicas sob o efeito das altas temperaturas e da corrosão em soluções ácidas [1], como as características de superfície. A serra da estrela constitui-se como um maciço granítico de origem nos metassedimentos devido à deposição de areias e rochas muito finas em ambiente marinho. Segundo Zhen Huang é possível aferir a variação das características de superfície sob a influência da temperatura e erosão química recorrendo a TEST 135 A Calorímetro determinando a intensidade da cor na superfície do provete. Os dados medidos incluem três parâmetros de índice L, a e b, correspondentes ao valor de cromaticidade da cor medida. Os índices L representam a luminosidade, a representa vermelho-verde e b representa amarelo-azul. A equação (1) é usada para calcular a diferença entre a cor da superfície do provete sob diferentes temperaturas e erosão de soluções químicas relativamente à temperatura ambiente.

$$\Delta E = \sqrt{(L_T - L_0)^2 + (a_T - a_0)^2 + (b_T - b_0)^2} \quad (1)$$

onde  $\Delta E$  é a variação de cor,  $L_0$ ,  $a_0$ ,  $b_0$  e  $L_t$ ,  $a_t$ ,  $b_t$  representa os parâmetros cromáticos de espécimes não tratados e espécimes após erosão química em alta temperatura, respetivamente.

Os valores de cromaticidade da cor da superfície dos provetes, como mostrado na Figura 1 com a exposição de três provetes (granito, arenito e mármore) à temperatura mostra a tendência óbvia em relação ao aumento da temperatura com alteração de cor atingindo 16.51 a 1000 °C.

**Figura 1 Mudança na alteração de cor da superfície dos diferentes provetes de rocha sob diferentes temperaturas**



**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

Os resultados mostram que as altas temperaturas são o principal fator de alteração das mudanças na cor da superfície dos provetes de rocha, enquanto a exposição a soluções ácidas, corroem e promovem a fragmentação de partículas e o desenvolvimento de fissuração na superfície.

Quando as rochas sofrem erosão provocada pelo fogo ou água subterrânea, os cristais minerais internos, matrizes, cimentos e outros componentes são alterados pelos efeitos de alta temperatura e da ação química, como desidratação, mudança de fase, recristalização, e decomposição mineral, resultando em variações na massa e microestrutura interna da rocha. O dano aos materiais rochosos devido à exposição a alta temperatura é irreversível [2] [3].

A evaporação da água dentro da rocha e homogeneidade no aumento de volume das partículas minerais pode causar alterações na microestrutura interna da rocha. A perda de massa dos três tipos de rochas expostas a altas temperaturas e à erosão química, pode ser calculada pela equação (2).

$$K_m = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

onde  $K_m$  é a mudança relativa na massa dos provetes de rocha,  $m_0$  é a massa inicial do espécime de rocha, e  $m_t$  é a massa final de rocha sob diferentes temperaturas e erosão química. As mudanças relativas de massa dos três tipos de rocha apresentaram um aumento exponencial com a temperatura e erosão química ( $R^2$  maior que 0,85), conforme Figura 3.

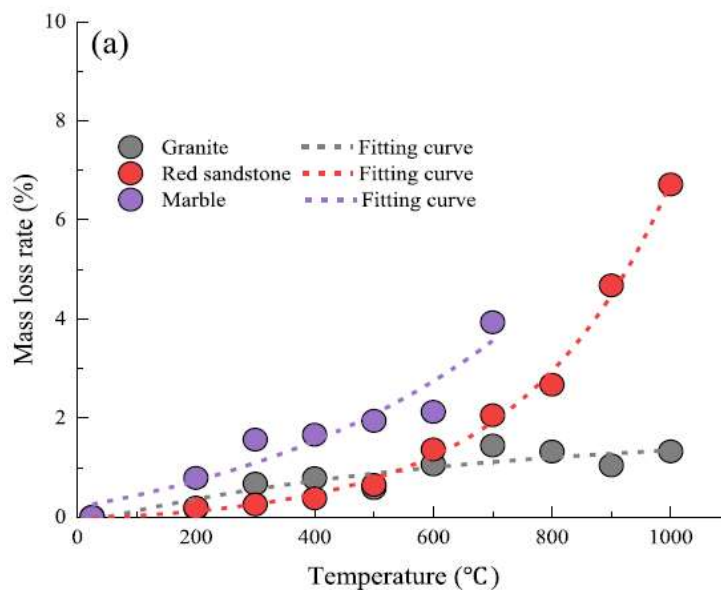
**Figura 2 Variação da cor na superfície e grau de dano nos três tipos de rochas.**



**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

A tendência é a perda de massa com o aumento de temperatura, nos três tipos de rocha, no entanto o granito apresenta uma perda linearmente crescente com o incremento da temperatura, apresentando a 1000 °C uma perda de massa de apenas 1.31%, resultado da densidade, uniformidade e conexão forte entre os minerais que o constituem. Esta característica é uma das características na escolha como inerte na construção e obras de relevo como depósitos de resíduos nucleares subterrâneos [1].

**Figura 3 Perda de massa de rocha sob alta temperatura**

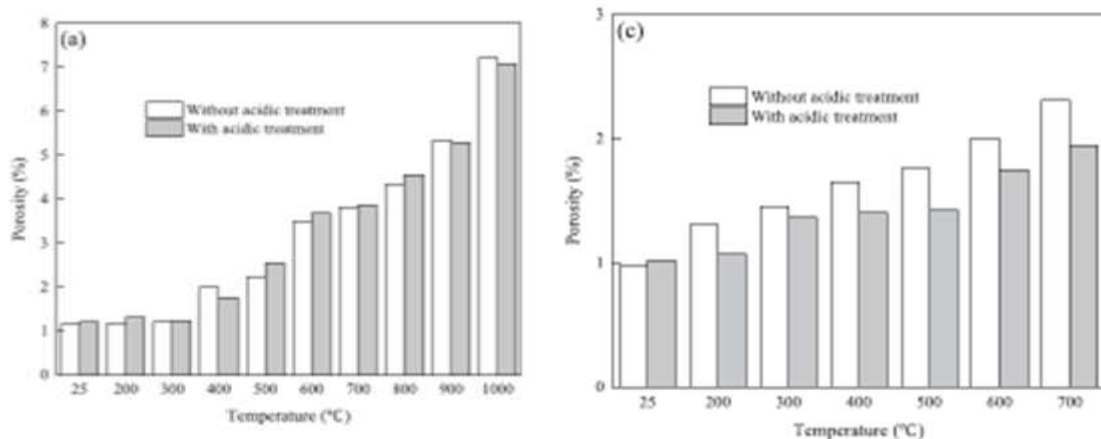


**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

Os efeitos da temperatura na porosidade nos três tipos de rocha granito, arenito e mármore, mostram que esta aumenta com a exposição à temperatura. Como mostra a Figura 4 a porosidade inicial do granito é de aproximadamente 1,22% à temperatura ambiente, valor indicativo de uma boa compactação. No entanto após a exposição à temperatura a valores na ordem dos 1000 °C a porosidade aumenta na ordem dos 7,08%. A massa das rochas pode alterar sob o efeito de alta temperatura, esta variação é causada por alterações internas, nomeadamente nos micróporos internos, microrroturas resultando em mudanças de porosidade e volume de vazios. Através de ensaios não destrutivos como a ressonância magnética nuclear é possível a caracterização estrutural microscópico interior das rochas com correlação no parâmetro da porosidade [4] [5] [6].



**Figura 4 Variação da porosidade (a) Granito (b) Mármore sob os efeitos da alta temperatura**



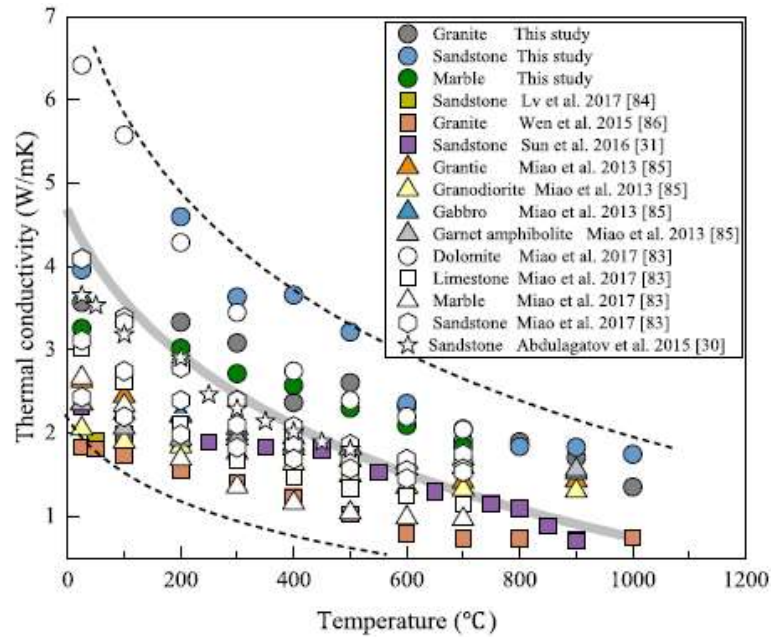
**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

A Figura 4 explicita os resultados da literatura sobre a porosidade e exposição à alta temperatura e, respetivamente com e sem tratamento ácido. Os resultados mostram que a porosidade do granito pode ser dividida em dois grupos principais, os granitos densos com uma porosidade inicial de aproximadamente 1% e granitos com porosidade de 5,3% com aumento da porosidade até 7,00% a 1000°C. O mármore, no entanto, é o que apresenta menores variações à temperatura com porosidades iniciais na faixa dos 0,23%-1,03% até valores finais de 2,30% [3] [7] [8] [9] [10] [11] [12].

A condutividade térmica é uma propriedade física natural dos materiais rochosos. Seu valor numérico reflete a integridade da estrutura interna das amostras de rocha. Quanto mais completa a estrutura interna das amostras de rocha, maior sua condutividade térmica. A comparação da condutividade térmica do granito com outras rochas é mostrada na Figura 5. Os resultados mostram que a condutividade térmica geralmente aumenta com um aumento na exposição à temperatura, com pequenas variações entre todas. O granito contém os minerais de feldspato mais abundantes e a condutividade térmica destes varia de 2 a 2,7 W/mK [9], portanto, a condutividade térmica inicial do granito é ligeiramente inferior à do arenito, com 3,57 W/mk e superior ao mármore. Para o granito, a condutividade térmica inicial varia na faixa de 1,83-3,57 W/mK, diminuindo finalmente para 0,74-1,43 W/mK sob o efeito da alta temperatura, com uma diminuição média de 56% [9] [13] [14] [15].

A evolução das tensões de cedência no deslocamento, em função da temperatura correspondem ao valor máximo da resistência à tração, conforme mostrado na Figura 6, a resistência à tração do granito diminuiu significativamente com o aumento da temperatura de ação e a imersão em soluções ácidas.

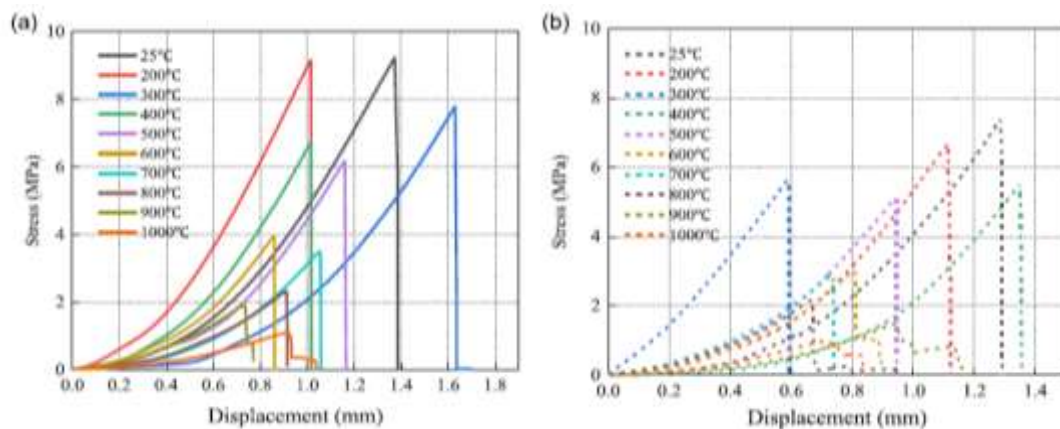
**Figura 5 Variação na condutividade térmica da rocha sob o efeito de temperatura.**



**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

A resistência à tração diminuiu para 1,10 MPa após ter experimentado a alta temperatura de 1000 °C, que era 88% menor em comparação com a resistência à tração de amostras de granito à temperatura ambiente ( $\sigma_t = 9,24$  MPa), e quando as amostras de granito experimentaram o efeito da imersão em solução ácida e a alta temperatura a 1000 °C, a resistência à tração diminuiu para 0,99 MPa, resultado 89% menor que as características iniciais.

**Figura 6 As curvas de tensão-deslocamento do granito. (a) Sem corrosão ácida, e (b) com corrosão ácida.**



**Fonte:** Construction and Building Materials (2021)

### 3 DISCUSSÃO

O granito exposto a altas temperaturas e sob o efeito da erosão pelas soluções ácidas, levam ao aparecimento de fissuras que destroem a estrutura e enfraquecem a ligação entre as partículas. Estas patologias levam ao início, propagação e penetração de fissuras, resultando em um aumento na porosidade e uma diminuição na sua integridade física. Assim, quaisquer propriedades físico-mecânicas do granito são em última análise determinadas pela escala atômica ou molecular e pelo tamanho estrutural dos micro defeitos [16] [17] [18].

**Tabela 1 Principais reações físico-químicas do granito exposto a altas temperaturas**

Litologia	Temperatura [°C]	Alterações Físicas	Reação química
Granito	25-300	Evaporação de água livre e combinada.	$H_2O \rightarrow H_2O \uparrow$
	500-900	Transição de fase do quartzo.	$\alpha\text{-quartz} \rightarrow \beta\text{-quartz} \rightarrow \beta\text{-tridymite}$
	300-1000	Transição de feldspato para microclina.	Feldspato $\rightarrow$ Microcline

**Fonte:** Adaptado de Construction and Building Materials (2021)

Um resumo das alterações químicas do granito está visível na Tabela 1. Esta alteração química e física altera também a condutividade térmica e finalmente a variação dos minerais e o desenvolvimento de microfissuras nas rochas levará à diminuição da sua resistência à tração.

### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da revisão da literatura evidenciam as boas propriedades físicas e mecânicas do granito para incorporação na terceira camada da infraestrutura (camada que fica em contacto com o ar), reduzindo significativamente a carga de combustível disponível para combustão, (uma vez que não contribui para esta). Esta disposição física na infraestrutura permite aos inertes de granito constituírem uma barreira isolante, apresentando valores de condutibilidade térmica de 0,74-1,43 W/mK mesmo sob os efeitos das altas temperaturas. Este fator favorece a mitigação da fase de secagem/pré-aquecimento da segunda camada da infraestrutura que será constituída por materiais com contribuição para o fogo limitada, mas que podem acelerar a sublimação a partir dos 150°C e conseqüente emissão de materiais voláteis. Os poucos resultados da resistência à tração diminuindo para 1,10 MPa após ter

experimentado altas temperatura de 1000 °C, não tem influência no design da infraestrutura uma vez que esta se comportará em termos de esforços somente à compressão, com residual impacto em termos de estabilidade. No que concerne ao aumento da porosidade com o aumento da temperatura, esta poderá ser de residual significância uma vez que o sequestro da água nos poros no granito não permite a infiltração no solo beneficiando a preservação dos valores dos sub-índices de teor de humidade no solo constituintes do *Fire Weather Index*. Importa referir que a disposição de diferentes granulometrias de inertes de granito na infraestrutura podem influenciar a evapotranspiração do solo ocupado pela infraestrutura, preservando a taxa de infiltração da água, fator benéfico conservação da natureza, biodiversidade e do *Fire Weather Index*.

## REFERÊNCIAS

- [1]C. David, B. Menendez, M. Darot. " Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite." **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 36 (1999): 433-448.
- [2]Chao Lü, Qiang Sun†, Weiqiang Zhang, Jishi Geng, Yueming Qi, Liangliang Lu. "The effect of high temperature on tensile strength of sandstone." **Applied Thermal Engineering** 111 (2017): 573-579.
- [3]Hao Li, Zuliang Zhong, Xinrong Liu, Yong Sheng, Dongmin Yang. "Micro-damage evolution and macro-mechanical property degradation of limestone due to chemical effects." **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 110 (2018): 257-265.
- [4]Hao Lia, Dongmin Yanga, Zuliang Zhongb, Yong Shenga, Xinrong Liub. " Experimental investigation on the micro damage evolution of chemical." **International Journal of Fatigue** 129 (2018): 23-32.
- [5] Hu Wen, Jun-hui, Lu. Yang Xiao, jung Deng. "Temperature Dependence of thermal conductivity, diffusion and specific heat capacity for coal and rocks from coalfield." **Thermochimica Acta** 619 (2015): 41-47.
- [6] I. M. Abdulagatov, Z. Z. Abdulagatova, S. N. Kallaev , A. G. Bakmaev, P. G. Ranjith. "Thermal-Diffusivity and Heat-Capacity Measurements of Sandstone at High Temperatures Using Laser Flash and DSC Methods ." **International Journal of Thermophysics** 36 (2015): 658-691.
- [7] Jianjun Hua, Qiang Suna, Shen-en Chenb, Weiqiang Zhanga. "The thermodynamic properties variation of cemented clay." **Construction and Building Materials** 182 (2018): 523-529.
- [8] Jingjing Li, Jianling Jiao, Yunshu Tang. "An evolutionary analysis on the effect of government policies on electric vehicle diffusion in complex network." **Energy Policy** 129 (2019): 1-12.

- [9] LianYing Zhang, XianBiao Mao & AiHong Lu. "Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature." *Science in China Series E: Technological Science* 52 (2009): 641-646.
- [10] Qiang Sun, Weiqiang Zhang, Lei Xue, Zhizhen Zhang, Tianming Su. "Thermal damage pattern and thresholds of granite ." *Environmental Earth Sciences* 74 (2015): 2341-2341.
- [11] Qiang Suna, Chao Lüa,n, Liwen Caoa, Weichao Lib, Jishi Genga, Weiqiang Zhanga. "Thermal properties of sandstone after treatment at high temperature." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 85 (2016): 60-66.
- [12] S. Q. Miao, H. P. Li & G. Chen. "Temperature dependence of thermal diffusivity, specific heat capacity, and thermal conductivity for several types of rocks." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 115 (2013): 1057-1063.
- [13] Shengjun Miaoa, Meifeng Caia, Qifeng Guoa, Peitao Wang, Mingchun Liang. "Damage effects and mechanisms in granite treated with acidic." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 88 (2016): 77-86.
- [14] Shi Liu, Jinyu Xu. "Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 71 (2014): 188-193.
- [15] Weiqiang Zhang, Qiang Sun, Shuyun Zhu, Bo Wang. "Experimental study on mechanical and porous characteristics of limestone affected by high temperature." *Applied Thermal Engineering* 110 (2017): 356-362.
- [15] X.L. Xua, M. Karakusb. "A coupled thermo-mechanical damage model for granite ." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 103 (2018): 195-204.
- [16] Zhao Hongbao, Yin Guangzhi, Chen, Lunjian. "Experimental study on effect of temperature on sandstone damage." *Journal of Rock Mechanics and Engineering* 28 (2009): 2784-2788.
- [17] Zhen Huang, Wei Zeng, Qixiong Gu, Yun Wu, Wen Zhong , Kui Zhao. "Investigations of variations in physical and mechanical properties of granite, sandstone, and marble after temperature and acid solution treatments." *Construction and Building Materials*, 2021.
- [18] Zhou, Sheqiang Miao & Yongsheng. "Temperature dependence of thermal diffusivity and conductivity for sandstone and carbonate rocks." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 131 (2017): 1647-1652.



## INTEGRATION OF BIM-VR-FM TOWARDS THE APPLICATION OF INSPECTION PROTOCOLS AND ENERGY-EFFICIENCY MEASURES

### ABSTRACT

*In the construction industry, new technologies are being studied for their incorporation into the built environment, towards increasing the efficiency of tasks and resources, and improving quality. Some of them are Digital Twins, Virtual Reality (VR), Building Information Modeling (BIM), Unmanned Aerial Vehicles, sensors, Virtual Design and Construction (VDC), Cloud Computing, among others. For this research, it was conceived to create a methodology of integration between BIM and VR for its application in Facilities Management (FM) tasks, to enhance the inspection protocols of energy and water systems in a real-world building, basing on virtual reality. The methodology was applied in the 3D model of the Systems Laboratory in the National Museum of Rio de Janeiro, modeled following the BIM methodology; its link with VR was accomplished using a plug-in within the BIM environment, which permitted the graphical visualization through a VR headset. The results show the possibility of integration between BIM and VR in FM tasks, following only few steps, representing a novel approach for this integration. It was concluded that the utilization of VR in 3D models could permit the application of inspection protocols, as well as other FM workflows to compare the state of real-world construction versus the project. Also, it can be possible to compare different design choices immersible via VR, which would permit, throughout the whole asset lifecycle, a better comprehension of the space, and with this, the application of energy-efficiency measures and sustainable strategies.*

**Keywords:** BIM, Virtual Reality, Facilities Management, Inspection Protocols, Buildings.

### RESUMO

Na indústria da construção, estão a ser estudadas novas tecnologias para a sua incorporação no ambiente construído, no sentido de aumentar a eficiência das tarefas e dos recursos, e melhorar a qualidade. Alguns deles são Gêmeos Digitais, Realidade Virtual (VR), Modelagem de Informações de Construção (BIM), Veículos Aéreos Não Tripulados, sensores, Projeto e Construção Virtual (VDC), Computação em Nuvem, entre outros. Para esta pesquisa, foi concebido criar uma metodologia de integração entre BIM e VR para sua aplicação em tarefas de Gestão de Facilities (FM), para aprimorar os protocolos de inspeções em sistemas de energia e água em um edifício do mundo real, baseado em realidade virtual. A metodologia foi aplicada no modelo 3D do Laboratório de Sistemas do Museu Nacional do Rio de Janeiro, modelado seguindo a metodologia BIM; sua ligação com a VR foi realizada através de um plug-in dentro do ambiente BIM, que permitiu a visualização gráfica através

de uns óculos de VR. Os resultados mostram a possibilidade de integração entre BIM e VR em tarefas de FM, seguindo apenas alguns passos, representando uma abordagem inovadora para esta integração. Concluiu-se que a utilização de VR em modelos 3D poderia permitir a aplicação de protocolos de inspeções de segurança, bem como outros fluxos de trabalho de FM para comparar o estado da construção no mundo real versus no projeto. Além disso, pode ser possível comparar diferentes opções de design imersíveis via VR, o que permitiria, ao longo de todo o ciclo de vida do ativo, uma melhor compreensão do espaço e, com isso, a aplicação de medidas de eficiência energética e estratégias sustentáveis.

**Palavras-chave:** BIM, Realidade Virtual, Gestão de Facilities, Protocolos de Inspeção, Edificações.

## 1 INTRODUCTION

In the heterogeneity of construction activities, such as project design, time constraints, work areas, environmental conditions, and facility locations, some activities are unique, and they demand increased attention from management (MUHAMMAD et al., 2020). The current state of job site monitoring progress includes manual and time-consuming work, non-systematic analysis, and visually/spatially complex reporting (BAEK; HA; KIM, 2019). Nonetheless, the utilization of 3D models can help to diminish the occurrence of errors and mistakes in the construction process, supporting planning performance (MUHAMMAD et al., 2020).

To complement 3D models, the applicability of visualization technologies is recognized. AR and VR are visualization technologies that have changed the way that the AEC industry interacts with visual information. It is expected that the size of the AR and VR market grow to \$80 billion in 2025, and 52 of the Fortune 500 companies are testing and deploying this technology, especially in areas such as education, training, and improvement (DAVILA DELGADO; OYEDELE, 2021).

Their benefits can be seen in the management of infrastructure works; inspection of structural systems; decision-making support; scenario design and evaluation of effects; simulations and predictions; analysis of construction progress versus planned, and so on (CHUNG et al., 2021). In practice, after the physical and the virtual models are aligned, they can be overlaid to determine the state of the physical state and compare the current state versus the expected state (BAEK; HA; KIM, 2019).

Nowadays, the reconstruction of precise 3D models is a common requirement for existing buildings. For this reason, some efforts have been made to model automatically structural and service components (external or internal). Recent studies have focused not only on recognizing the components to create 3D models of existing buildings but also on studying the integration of technologies to efficiently model their interactions (NATICCHIA; CORNELI; CARBONARI, 2020).

However, the adoption of VR and AR technologies is still low in the AEC industry (about 37% of construction companies have experience with AR and VR), although the built environment is intrinsically linked to the 3D space. Some authors have stated that one of the main limitations of the adoption of AR and VR technologies is the perception that they cannot be fully used in practice, and the need for special requirements for adoption (DAVILA DELGADO; OYEDELE, 2021). Also, the lack of theoretical and practical research causes consequently that a significant amount of work is still necessary to convert the 3D models into human-navigable and interactive environments.

This whole situation leads to a lack of utilization of technologies to create accurate 3D models of existing buildings, as well as a poor integration between the current ones to solve management issues. This permits us to propose the next research question: Is it possible to create an automatic process to present a 3D model using current visualization technologies to enhance asset management?

The utilization of AR and VR techniques would permit the representation of a building in an immersive experience. If properly modelled, it could be possible to observe and analyse its components, and the behaviour of its inner systems. With this, improvements could be expected to manage and control these components and systems.

Considering this perspective, the objective of this research is to develop a methodology of integration between 3D modelling and visualization technologies to observe the components of a building for improving the facilities management process.

This research is formed by 5 sections, the first one is an introduction to the subject; then, a literature review is developed in the second section to understand the theory related to the 4.0 technologies and their usage in facilities management. The third section presents the methodology of integration conceived according to previous-developed methodologies regarding this matter. The fourth section validates and discusses the application of the methodology in a case study. Finally, the fifth section presents the main findings, limitations, and suggestions for further research.

## **2 LITERATURE REVIEW (AR/VR/BIM/FM)**

AR is a vision-based technology that permits the representation of assets through 3D models. With this technology, it is possible to emulate a whole reality based on images according to a position regulated, to register a 3D model; also, real spaces are recognized and interpreted to be aligned to virtual objects; likewise, accurate tracking data of user's position could be reflected in the display in real-time (CHUNG et al., 2021).

On the other hand, VR technology replaces the real world with a computer-generated environment, modelling current and future realities. VR enhances the figurative and interactive functions with objects and spaces, offering an immersive design experience, reflecting the real-world



scene for further consideration of the environmental factors (DINIS et al., 2020; GAN; LIU; LI, 2022; HUANG; WANG; ZHOU, 2024; JOHANSSON; ROUPÉ, 2024; MERCADO et al., 2024; OMARAN; AL-ZUHERIY, 2023; UMAIR et al., 2022).

The uses of AR and VR include assistance in finding assets in complex sites, support in design reviews and immersive and collaborative design, improvement information retrieval during construction, improvement health and safety in facilities management, possibility to test different design choices, improve monitoring and inspections, visually document construction issues and progress, development of new maintenance processes, and improve the decision-making processes (CHUNG et al., 2021; DAVILA DELGADO; OYEDELE, 2021; SANGEETHA et al., 2022).

VR, as well as AR, presents three characteristics: interactive, spatial, and temporal (WANG, 2021). It allows people to experience the immersion of a building in a risk-free environment with a real-world feeling, whereas in the real world might be risky environments, allowing a better decision-making process in the building's lifecycle (BILLE et al., 2014; QASEM; ALMOHASSEN, 2023; MUHAMMAD et al., 2020; YU et al., 2022).

Another 4.0 technology is BIM, which is a digital representation of geometric and non-geometric information of buildings, supporting the visualization of physical and functional properties, and permitting the execution of a series of analyses (DINIS et al., 2020; KIM et al., 2021; MERCADO et al., 2024). The core activity for BIM is data management, creating a perfect database that collects effective information throughout the building's lifecycle (design, construction, operational, and decommissioning phases). In consequence, a rich 3D information model is formed to provide effective management of the project (UMAIR et al., 2022; WANG, 2021).

In construction management, BIM is a useful tool that allows to create models that can interact with the construction side for design and data transfer, providing support for the establishment of whole information model data (BILLE et al., 2014; HUANG; WANG; ZHOU, 2024; MUHAMMAD et al., 2020; QASEM; ALMOHASSEN, 2023).

Revit is a software that utilizes the BIM methodology to virtually construct, plan, manage cost, observe the performance of buildings in use, and render the completed building. To access the parameters, Revit provides a database and application programming interface. This software is commonly used by architects, structural, mechanical, and electrical engineers (BILLE et al., 2014; QASEM; ALMOHASSEN, 2023).

Nonetheless, the modelling process in Revit requires efforts, especially for existing buildings, whose drawings need to be translated into a BIM format (NATICCHIA; CORNELI; CARBONARI, 2020). Among the barriers to the implementation of BIM methodology are lack of BIM expertise and trained staff, high cost of BIM software packages, lack of awareness, and the need to transform BIM workflows and procedures towards its utilization in managing the systems of a building, such as facilities management, fire-

prevention, structural health monitoring, among others (UMAIR et al., 2022).

Facility Management is the process of keeping the initial expected asset value of a facility through maintenance strategies and improvements in quality during the operational stage of a building, which represents almost 85% of the whole life cycle cost (five to seven times more than the construction costs) (CHUNG et al., 2021).

FM is the longest phase of the whole lifecycle of a building, for this reason, the management of information flow is a critical challenge. Then, FM-optimized strategies are crucial to identifying and adopting efficient methods of management (NATICCHIA; CORNELI; CARBONARI, 2020).

FM includes maintenance work, assisted document retrieval, component localization, automated procedural management, personnel training, identification, and modelling of components. Defining and verifying the information for facilities management requires significant time and cost; to help with this issue, BIM technology can be adopted for effecting facility operation and maintenance (CHUNG et al., 2021).

This junction has gained popularity in the last 20 years due to its impact in better communication and managing processes, immersive experience, and effective decision-making process (NATICCHIA; CORNELI; CARBONARI, 2020; QASEM; ALMOHASSEN, 2023). Some methods have been deployed to identify costs, execute energy simulations considering different envelope materials using BIM capabilities, and conduct lighting design studies (OMARAN; AL-ZUHERIY, 2023; WONG et al., 2019; HUANG; WANG; ZHOU, 2024; QASEM; ALMOHASSEN, 2023; UMAIR et al., 2022).

Some authors have utilized Unity3D as a cross-platform game engine, where 3D building models can be imported from BIM, enriched and sent to a VR device (BILLE et al., 2014; MUHAMMAD et al., 2020; QASEM; ALMOHASSEN, 2023). For the coding part, Visual Studio has been utilized to create the C# codes that permit the representation of lights, fans, and other assets, enhancing the virtual-realistic experience (SANGEETHA et al., 2022). The VR headsets from different companies can be utilized for testing purposes (MUHAMMAD et al., 2020).

The integration of BIM-AR appears helpful in improving the usability and accessibility of information; however, more studies are required (CHUNG et al., 2021). Authors such as (DINIS et al., 2020; JOHANSSON; ROUPÉ, 2024) has stated that the main interoperability issues manifest in two forms: some data cannot be transferred, or there is a cumbersome or additional step to transfer the data, evidencing an inefficient and complex process.

The time-consuming processes evidences the lack of integration between BIM models and their replication through VR. Currently, there are plenty of post-processing software such as Paraview, Autodesk 3D Max, and Unity 3D for rendering or intermediate format conversion, evidencing a process that needs enhancements (GAN; LIU; LI, 2022).

Similarly, the lack of generalized context, and its testing on real-life projects (YU et al., 2022). Nowadays, there are no assessment frameworks for the maturity of BIM-VR applications (KIM et al., 2021). Also, the adaptation of its use depends on knowledge levels, skills, and tasks (DINIS et al., 2020).

Until now, the only way to transfer digital-building models is through the IFC formats. The process can be accomplished via file-based (importing a previously exported file) or add-in-based (where the VR session is initiated from the BIM authoring software using an application-specific plugin) (JOHANSSON; ROUPÉ, 2024).

Nonetheless, it has been stated that construction workers prefer to utilize AR/VR instead of desktop-BIM views, for its didactic representation of the work environment, being accurate in terms of size, scale, and details (JOHANSSON; ROUPÉ, 2024). In this regard, more research is required to include the application of AR and VR technologies during the FM phase and the building's operational stage (CHUNG et al., 2021; FAWAD et al., 2024; JOHANSSON; ROUPÉ, 2024).

### **3 PROPOSAL OF METHODOLOGY OF INTEGRATION BIM-VR-AR**

Some previous works have been developed to enhance the integration between BIM and other 4.0 technologies, as well as between BIM and FM. The most representative of them served as an inspiration to create the workflow of integration between BIM-VR-FM studied in this research.

Regarding the integration of BIM-AR, (MUHAMMAD et al., 2020) compared and validated the utilization of traditional methods and 3D site planning by adopting Revit and VR for job site organization. The process considered a BIM model of structural frame executed in REVIT and saved in AutoCAD format; adding objects from SketchUp; and rendered in Lumion; the VR experience was accomplished through a META headset.

(WONG et al., 2019) created a BIM model to study the conditions for indoor decoration and furniture layout. The BIM model was exported as an FBX file and an IFC file for texture mapping in 3ds Max. The Universal Material Converter (UMC) plug-in was employed to convert materials from Autodesk Materials to the ones utilized in the Unity environment. Afterward, DIALux was utilized to conduct the illumination simulations. Finally, the 3D model and the calculation results were imported into Unity using SteamVR Plugin to send the images to a Helmet Mounted Display.

(MERCADO et al., 2024) created an AR platform, with the plug-in Construtech that makes the project available for all its stakeholders seeking to optimize communication and collaboration in a construction project, permitting the visualization of internal and external content of a building, in a 1:1 scale by a telephone application. Similarly, (BAEK; HA; KIM, 2019) presented another AR platform, named Hybrid 4-Dimensional AR, which allowed field personnel to query and access 3D information on-site using photographs taken by standard mobile devices. The proposed

system combined user location and AR visualization to target on-site queries, reflecting project information on top of real-world imagery.

(YU et al., 2022) investigated the integration of BIM and VR technologies to develop solutions for a highway tunnel that increases the efficiency of emergency responses. The process starts by developing the asset's model in 3D Geometry CAD, then the BIM data is processed in a VR environment, and its integration in Unity for complete the VR sceneries, and finally the plans for emergency scenarios are developed and implemented.

(NATEPHRA; MOTAMEDI, 2019) proposed a method for integrating live sensor data visualization in VR, from a BIM-based 3D model, towards monitoring indoor conditions. The steps include the creation of the BIM model using Autodesk Revit; capture of environmental data such as air temperature, relative humidity, light intensity using sensors connected to Arduino microcontrollers; transfer of data to a game engine in FBX format from Revit to Autodesk 3DS Max (it was utilized Unreal Engine as the game engine); and updates of the visualization using live-stream data.

(FAWAD et al., 2024) explored the integration BIM-VR using a game engine to develop an AR application for bridge health monitoring. It considered a numerical modelling, proposal of an SHM system, development of a VR app using Unity 3D, and visualization of the SHM data in via HoloLens.

(DINIS et al., 2020) integrated point clouds and VR to create BIM models. It was divided into three phases: point cloud acquisition and treatment (utilizing Leica ScanStation P20 and exporting to Leica Cyclone 9.1), Virtual Reality Environment (where the user utilizes the Unity Platform for Visualization), and BIM project Update (where the file in .txt format is exported to a Dynamo script and imported directly to Autodesk Revit).

(CHEN et al., 2021) proposed a framework of integration for fire safety. The first module includes a series of sensors that save data in IoT databases; parallelly, a BIM model is created with geometry and component attributes; then, there is a junction of data from the sensors and the BIM model, integrating fire data and fire monitoring and alarming. In the second module, it is created an as-built BIM model which is read by the Unity game Engine, to find the shortest path for fire location. In the third module, the as-built BIM model and its visualization on the Unity software, permit the creation of a Fire Training system, and parallelly, a system evaluation that permits a whole data analysis.

In terms of tools, (JOHANSSON; ROUPÉ, 2024) has stated that the introduction of Oculus Rift HMD is useful, due to its low cost and high quality, for integrating VR with BIM models, consolidating a new paradigm of VR applied to the AEC industry. Some authors have considered Samsung Gear VR to enable the exploration of the virtual environment; or Oculus Rift, connected with Revit via a plug-in (OMARAN; AL-ZUHERIY,

2023). Also, the utilization of Oculus DK2 VR or Microsoft HoloLens as headsets has been highlighted (YU et al., 2022; BAEK; HA; KIM, 2019).

For the integration of BIM-FM, some authors have studied forms to obtain an efficiently enhanced workflow. (CHUNG et al., 2021) investigated the trends for integrating BIM and AR for FM tasks. They established an inspection plan, which was conducted identifying site conditions and defective areas, checking the maintenance records, and approving the execution of the maintenance and its procedure. The images captured by the inspector's camera are shared in real-time with the stakeholders to revise if there are defective conditions. If there is a defect, the information is sent to the FM manager to carry out the repair work.

(BAEK; HA; KIM, 2019) created an AR system for monitoring indoor conditions. It captures the image, sends it to a server for accurate location and orientation, and permits to selection of different objects and materials; also, it maps the space to locate the selected objects for considering different scenarios. It compares the images with BIM images, to understand the location information retrieving the closest BIM image.

(NATICCHIA; CORNELI; CARBONARI, 2020) proposed a system architecture to integrate BIM and VR to FM tasks, which is formed by a model constructed in BIM (in Revit), sent to a cloud-based platform for its enrichment with maintenance procedures and data required for its operation, and sent to a VR development platform (Unity).

(HESSELINK et al., 2023) created a framework for inspection in FM, based on a 3D model, to which is added the sensory data entries; this data is stored in a database. To achieve the visualization of sensory data, this data is retrieved every time there is a new measurement.

Ying-Mei Cheng proposed a list of construction defects to be considered in Quality Control for FM. It contemplates three levels: user perspectives related to system development, establishment of conceptual information model considering formats and documentation, attributes, interconnection, limitations, completeness, security and semantics considering the user needs, and internal information including formats, index establishment, appropriate software and hardware systems. The QC models can consider columns, walls, beams, floors, and stairs.

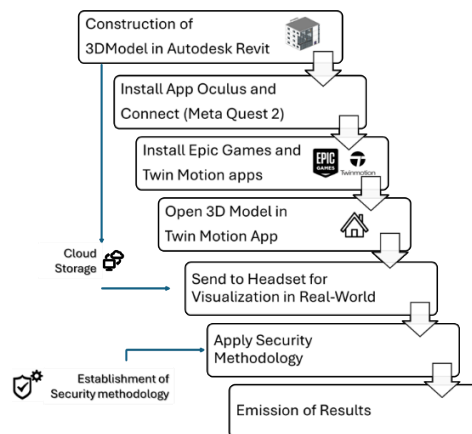
The list of construction defects cited by (CHENG, 2018) consider construction defects in concrete (cold or inadequate joints, honeycombs, holes, non-compliant concrete surface, left debris and residues, bursting, segregation of the aggregates), rebar (incorrect size, quantity, spacing, no details, inadequate lap length or angles, congestion, non-compliant protective covers or proportions, lack of starting bars, inadequate anchorage, corrosion, incorrect welding) and formwork (not organized,

poor quality, leakages, lacing defects, tilted formwork, not properly installed conduits, not cleaned).

According to the integration works mentioned, all of them follow a standard: it is created a 3D model in BIM, which could be enriched in parallel software according to the necessity, then the model is sent to a game engine to facilitate its visualization and the linkage with the headset for its final visualization. This work offers the next simplified workflow to integrate BIM-VR methodologies for its application in FM tasks in Figure 1.

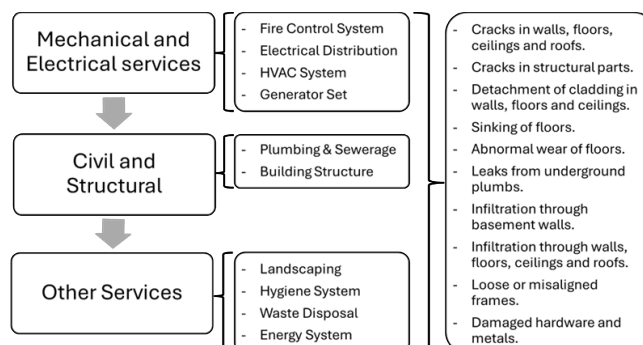
In the proposed methodology, the link between the 3D model for its representation in the VR environment happens automatically, by using the necessary plug-ins. The 3D model is constructed in the software Autodesk Revit; parallelly, it is installed the headset-controller software (Meta Quest 2), and the game-engine software (TwinMotion part of EpicGames); afterwards, the Revit' 3D model is sent to Twinmotion for its visualization by using a plug-in; then, the headset is registered within Twinmotion and the image is sent for its visualization; finally, inside the VR environment, it could be applied the security methodology of facilities for the emission of results, by comparing the VR images against the real-world state.

**Figure1 – Proposed general method integrating BIM-VR-FM.**



The security methodology was conceived by considering the previously mentioned methods for FM. In Figure 2, there are contemplated the most important components to be evaluated, and the parameters to analyse.

**Figure 2 – The proposed method for security inspection in FM.**



## 4 RESULTS AND DISCUSSION

The validation of the proposed methodology in the past section was accomplished by utilizing a 3D model of the National Museum of Rio de Janeiro. This Museum was located in the Quinta da Boa Vista Palace, in Rio de Janeiro. It was built in 1.810 and passed through a series of retrofits until 1892, when acquired its last form. In 2018, it was tragically engulfed by fire, resulting in the loss of most of its integrity (FAUSTO, 2020).

Afterward, this building was digitally modelled according to a series of images and historical records that were reunited and organized by our research group. It followed the original design, consisting of 3 floors, and a total area of 12.259 m<sup>2</sup>, divided in 10 wings, and enriched with 116 wall families, 29 window families, and 66 doors families.

The 3D model was accomplished in Autodesk Revit, in which information is included in the components that form a series of systems (structural, facilities, etc.) to create a whole data-enriched model (FERRANDIZ; BANAWI; PEÑA, 2018).

To access the model views, it was utilized the Twinmotion software. It is a real-time 3D immersion software that produces images, panoramas, or 360° videos efficiently. The utilization of both abovementioned software permits an automatic connection with VR by a series of plug-ins developed in the last years, to permit an efficient flow of information (TYTARENKO; PAVLENKO; DREVAL, 2023).

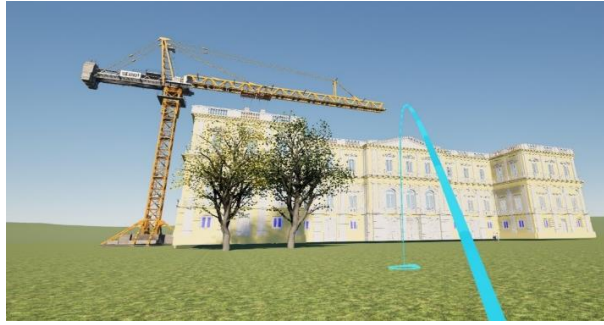
This software utilizes the Unreal Engine, by Epic Games, which is a game engine that permits the creators to quickly construct 3D content with freedom, fidelity, and flexibility, to accomplish graphical representations of the elements in high quality (HELENA JOKIKOKKO, 2024).

To execute the immersion in the VR environment, it was necessary to utilize the Meta Quest 2 headset, a high-quality, affordable, and wireless head-mounted display. It is the penultimate version of Meta Quest, capable of showing high-resolution graphics from the virtual world, enhancing the process of design in physical and digital environments (ABDLKARIM et al., 2024; TRINIDAD-FERNÁNDEZ et al., 2023).

To generate the results of this research, the National Museum was accessed by linking the 3D model created in Autodesk Revit to the Twinmotion by using its plug-in inside Revit. After the model was visible in the immersion software, it was sent to the registered headset for complete digital immersion (see Figure 3 and Figure 4).

When exploring the National Museum from the inside, it was possible to observe the walls, floors, windows and doors, and the facilities systems included in the 3D model, as shown in the next figures.

### **Figure 3 – Front view of the National Museum. Vision from the headset.**

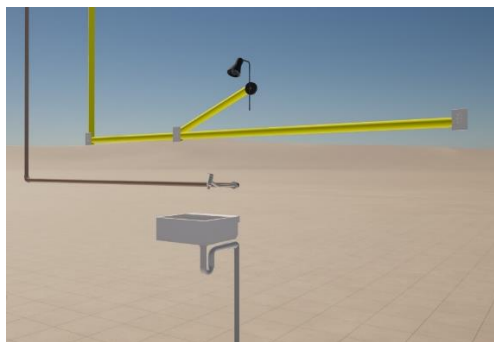


**Figure 4 – Side view of the National Museum. Vision from the headset.**



From these images, it is possible to execute the comparison between the real and the virtual environments. Figure 5 show in detail the position of some electrical and water systems, which were part of the Systems Laboratory of the National Museum, a restricted area dedicated to research activities. Its architectural view is shown in Figure 6.

**Figure 5 – Electrical and Water systems.**



**Figure 6 – Architectural perspective.**





The inclusion of these building systems in the VR environment proves that it is achievable to execute the proposed method for security inspection in facilities (see Figure 2), by comparing a perspective from real world to the images obtained via VR. It is important to highlight the necessity to properly document and register the information obtained from the comparison, for further management tasks.

According to figures 5 and 6, it is possible to dive into the 3D model of the building, and with this, to compare the project perspective versus the reality perspective. It could permit an evaluation of the current state of the building, as well as the elaboration of strategies for facilities management.

As mentioned in the literature review, several authors have studied the linkage between BIM and VR, and between BIM with FM, but few of them have done between BIM-VR-FM, which remains an achievement in this research. Despite several authors succeeding in integrating BIM and VR, such as (MUHAMMAD et al., 2020; WONG et al., 2019; BAEK; HA; KIM, 2019; DINIS et al., 2020; FAWAD et al., 2024), all of them worked following numerous steps that did not accomplish the integration efficiently.

(YU et al., 2022) went one step forward and integrated the link BIM-VR for an emergency response method, as well as (CHEN et al., 2021), who integrated with a fire safety protocol. (NATEPHRA; MOTAMEDI, 2019) integrated sensor data to enrich the 3D model in Autodesk Revit and made it possible to visualize within the oculus the environmental variables values obtained by the sensors.

Concerning FM and VR, (CHUNG et al., 2021; NATICCHIA; CORNELI; CARBONARI, 2020) created a correct method to link real-time photographs from a real-world building to a 3D model for its visualization in VR; (BAEK; HA; KIM, 2019) executed a similar work but putting also the sensor data in the 3D model. They all achieved the link between BIM-VR-FM but following a series of additional steps. In this regard, the present research integrated BIM and VR in an optimized way, incorporating FM by applying a security methodology.

In the next years, on-site facility management, data visualization, and real-time collaboration are expected to change positively the maintenance process, benefiting the economy (CHUNG et al., 2021). VR appears as one of the latest technological applications in the construction industry for building maintenance strategies (NATICCHIA; CORNELI; CARBONARI, 2020). The current research in VR is studying the development of diverse prototypes, which are still not tested in real-construction projects (JOHANSSON; ROUPÉ, 2024).

The roadmap for its adoption includes increasing training opportunities and access to expert knowledge, correcting industry perceptions and better branding, increasing client awareness, implementing systematic and automated workflows, implementing data-exchange standards (DAVILA DELGADO; OYEDELE, 2021).

## 5 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The objective of this research was accomplished because a methodology of integration between BIM-VR-FM was proposed and validated; the goal established was to apply a security workflow to observe the water and electricity systems in a building and compare it to the current state. The method was created after executing a literature review to understand the most profitable path to be followed when considering navigating through a 3D model in the VR environment, and the most important aspects to observe in a security inspection of a building system. Then, the abovementioned method was proposed and validated using the 3D model of the National Museum of Rio de Janeiro.

With this, the hypotheses and research question established were proven and answered, evidencing that it is possible to utilize the VR to have an immersive experience in a 3D model for the revision of components towards enhancing the management process of systems, in an automated way. The novelty of this research relies on offering an automated framework that consists of a few steps to apply security protocols in facilities using comparing the real and virtual worlds.

Nonetheless, some other aspects can be considered for further research. It seems necessary to apply the methodology in another case study presenting facilities systems in current functioning. Also, more security protocols for building systems should be considered to enrich the steps of revision. Finally, other software can be consulted to serve as a link between the headsets and the 3D model design. Future work should consider these limitations and continue testing the link between BIM-VR-FM to progress in enriching this need in science.

## REFERENCES

- ABDLKARIM, D. et al. **A methodological framework to assess the accuracy of virtual reality hand-tracking systems: A case study with the Meta Quest 2.** *Behavior Research Methods* Springer, , 1 Feb. 2024.
- BAEK, F.; HA, I.; KIM, H. Augmented reality system for facility management using image-based indoor localization. *Automation in Construction*, v. 99, p. 18–26, 1 Mar. 2019.
- BILLE, R. et al. **Extending building information models into game engines.** ACM International Conference Proceeding Series. *Anais...* Association for Computing Machinery, 2 dez. 2014.
- CHEN, H. et al. Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling. *Automation in Construction*, v. 125, 1 maio 2021.
- CHENG, Y. M. **Building information modeling for quality management.** ICEIS 2018 - Proceedings of the 20th International Conference on Enterprise Information Systems. *Anais...* SciTePress, 2018.

- CHUNG, S. et al. Smart facility management system based on open bim and augmented reality technology. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 21, 1 nov. 2021.
- DAVILA DELGADO, J. M. et al. Augmented and Virtual Reality in Construction: Drivers and Limitations for Industry Adoption. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 146, n. 7, jul. 2020.
- DAVILA DELGADO, J. M.; OYEDELE, L. Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. **Advanced Engineering Informatics**, v. 49, 1 ago. 2021.
- DINIS, F. M. et al. Improving project communication in the architecture, engineering and construction industry: Coupling virtual reality and laser scanning. **Journal of Building Engineering**, v. 30, 1 jul. 2020.
- FAUSTO, C. Under heavy fire: Brazil and the politics of anti-memory. **Latin American Antiquity**, v. 31, n. 2, p. 247–255, 1 jun. 2020.
- FAWAD, M. et al. Integration of Bridge Health Monitoring System With Augmented Reality Application Developed Using 3D Game Engine-Case Study. **IEEE Access**, v. 12, p. 16963–16974, 2024.
- FERRANDIZ, J.; BANAWI, A.; PEÑA, E. Evaluating the benefits of introducing “BIM” based on Revit in construction courses, without changing the course schedule. **Universal Access in the Information Society**, v. 17, n. 3, p. 491–501, 1 ago. 2018.
- GAN, V. J. L.; LIU, T.; LI, K. Integrated BIM and VR for Interactive Aerodynamic Design and Wind Comfort Analysis of Modular Buildings. **Buildings**, v. 12, n. 3, 1 mar. 2022.
- HELENA JOKIKOKKO, V. **THE POTENTIAL OF UNREAL ENGINE 5 IN GAME DEVELOPMENT**. [s.l: s.n.].
- HESSELINK, L. et al. Usability analysis of virtual-reality-enabled digital twin for the inspection of sewage pumping stations. **International Journal of Construction Management**, 2023.
- HUANG, R.; WANG, X.; ZHOU, S. Interior Space Design and Modelling Methods for Smart Homes-Integrating BIM and VR Technologies. **Applied Mathematics and Nonlinear Sciences**, v. 9, n. 1, 1 jan. 2024.
- JOHANSSON, M.; ROUPÉ, M. Real-world applications of BIM and immersive VR in construction. **Automation in Construction**, v. 158, 1 fev. 2024.
- KIM, J. I. et al. Evaluation framework for BIM-based VR applications in design phase. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 8, n. 3, p. 910–922, 1 jun. 2021.
- MERCADO, A. M. P. et al. **Use of BIM Technology For Augmented Reality In Buildings**. 2024 IEEE 14th Annual Computing and Communication Workshop

and Conference, CCWC 2024. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024.

MUHAMMAD, A. A. et al. Adoption of virtual reality (VR) for site layout optimization of construction projects. **Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers**, v. 31, n. 2, p. 9833–9850, 2020.

NATEPHRA, W.; MOTAMEDI, A. **BIM-BASED LIVE SENSOR DATA VISUALIZATION USING VIRTUAL REALITY FOR MONITORING INDOOR CONDITIONS**. [s.l.: s.n.].

NATICCHIA, B.; CORNELI, A.; CARBONARI, A. Framework based on building information modeling, mixed reality, and a cloud platform to support information flow in facility management. **Frontiers of Engineering Management**, v. 7, n. 1, p. 131–141, mar. 2020.

OMARAN, S. M.; AL-ZUHERIY, A. S. J. Integrating Building Information Modeling and Virtual Reality to Develop Real-time Suitable Cost Estimates using Building Visualization. **International Journal of Engineering, Transactions B: Applications**, v. 36, n. 5, p. 858–869, 1 maio 2023.

QASEM, A.; ALMOHASSEN, A. S. A virtual reality-based constructability index for construction projects. **Construction Innovation**, 2023.

SANGEETHA, V. et al. **Virtual Reality in Construction Design**. Proceedings - International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing, ICAAIC 2022. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.

TRINIDAD-FERNÁNDEZ, M. et al. Head-Mounted Display for Clinical Evaluation of Neck Movement Validation with Meta Quest 2. **Sensors**, v. 23, n. 6, 1 mar. 2023.

TYTARENKO, I.; PAVLENKO, I.; DREVAL, I. 3D Modeling of a Virtual Built Environment Using Digital Tools: Kilburun Fortress Case Study. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 13, n. 3, 1 fev. 2023.

UMAIR, M. et al. Impact of Virtual Reality-Based Design Review System on User's Performance and Cognitive Behavior for Building Design Review Tasks. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 14, 1 jul. 2022.

WANG, Y. **BIM + VR technology in construction management of construction engineering**. Journal of Physics: Conference Series. **Anais...**IOP Publishing Ltd, 7 out. 2021.

WONG, M. O. et al. **An experience-based interactive lighting design approach using BIM and VR: A case study**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 4 mar. 2019.

YU, X. et al. Integrating Virtual Reality and Building Information Modeling for Improving Highway Tunnel Emergency Response Training. **Buildings**, v. 12, n. 10, 1 out. 2022.



## **BAMBU COMO ELEMENTO DE CONTRAVENTAMENTO DE PÓRTICOS EM EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS METÁLICOS**

RODRIGUES, MATHEUS (1); CHICAIZA, ANGEL (2); OCHOA, SARA (2), GALA, PEDRO (1,3,4), PROLA, LUIS (1,4)

(1) (1) ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO, INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA, E-MAIL: [2232639@ipleiria.pt](mailto:2232639@ipleiria.pt); [pedro.gala@ipleiria.pt](mailto:pedro.gala@ipleiria.pt); [luis.prola@ipleiria.pt](mailto:luis.prola@ipleiria.pt);

(2) UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM, EQUADOR, E-MAIL: [angelchicaiza1@gmail.com](mailto:angelchicaiza1@gmail.com); [sara.ochoa@ikiam.edu.ec](mailto:sara.ochoa@ikiam.edu.ec)

(3) INESC COIMBRA, DEEC, PORTUGAL

(4) CDRSP, INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [LUIS.PROLA@IPLEIRIA.PT](mailto:LUIS.PROLA@IPLEIRIA.PT)

### **RESUMO**

Na generalidade, os pórticos em estruturas metálicas são contraventados com barras ou perfis de aço. O bambu possui propriedades mecânicas (resistência à tração e módulo de elasticidade) compatíveis com os elementos de contraventamento (resistência à tração e módulo de elasticidade). Tendo em consideração as vantagens de sustentabilidade do bambu como elemento de construção civil, este artigo propõe a simular o comportamento de estruturas de pórticos metálicos contraventados com bambu. Na sua primeira parte, é feita uma revisão bibliográfica do uso do bambu na construção, abordando-se os aspectos tecnológicos do uso do bambu como elemento estrutural. Em particular, sua resistência à tração e valor do módulo de elasticidade. A seguir, o artigo faz, a partir de projeto tradicional de pavilhão industrial em aço, simulações numéricas do comportamento estrutural de pórticos contraventados com bambu. Esforços e deformações elásticas e modos de instabilidade são analisados e comparados com resultados dos usuais pórticos contraventados com elementos de aço. No final do artigo são elaboradas conclusões sobre a viabilidade estrutural do uso do bambu como elemento de contraventamento, enunciando-se futuros trabalhos que incluem a parte tecnológica de sua aplicação na prática.

**Palavras-chave:** Bambu, Contraventamento, pórticos metálicos.

### **ABSTRACT**

*In general, frames in steel structures are braced with steel bars or profiles. Bamboo has mechanical properties (tensile strength and modulus of*

*elasticity) compatible with bracing elements (tensile strength and modulus of elasticity). Taking into account the sustainability advantages of bamboo as a civil construction element, this article proposes the simulation of the behavior of steel frame structures braced with bamboo. In its first part, a bibliographical review of the use of bamboo in construction is made, addressing the technological aspects of the use of bamboo as a structural element. In particular, its tensile strength and modulus of elasticity value. Next, the article makes, based on projects of standard steel buildings, numerical simulations of the structural behavior of frames braced with bamboo. Elastic stresses and deformations and instability modes not analyzed and compared with results from usual frames braced with steel elements. At the end of the article, conclusions are drawn about the structural feasibility of using bamboo as a bracing element, announcing future work that includes the technological part of its application in practice.*

**Keywords:** *Bamboo, bracing, steel frames*

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a humanidade enfrenta uma série de desafios ambientais, sociais e económicos. O setor da construção desempenha um papel importante nesta questão (HUSSIN; RAHMAN; MEMON, 2013; SPENCE; MULLIGAN, 1995). A utilização excessiva de recursos tem gerado problemas como: degradação da qualidade da água (GLEICK, 1998), produção de quantidades significativas de resíduos, perda significativa de biodiversidade, alterações no clima e poluição ambiental (HUSSIN; RAHMAN; MEMON, 2013) do ar, do solo e da água com uma série de implicações para a saúde e bem-estar de todos nós que habitamos o planeta. Neste sentido, é fundamental que as atividades relacionadas com a construção tenham uma abordagem sustentável; começando pela utilização de materiais que contribuam positivamente para os indicadores ambientais, sociais e económicos. Um exemplo destes materiais é o bambu, pois: (i) é um material natural renovável (MANANDHAR; KIM; KIM, 2019; RAMIREZ et al., 2012), (ii) tem uma elevada resistência à tração (MAHDAVI; CLOUSTON; ARWADE, 2011; MIDUVI MINISTRY OF URBAN DEVELOPMENT AND HOUSING, 2016), (iii) as suas culturas contribuem para a redução dos gases com efeito de estufa (ADIER et al., 2023; MANANDHAR; KIM; KIM, 2019), (iv) é "amigo" do ambiente (ADIER et al., 2023; RAMIREZ et al., 2012), (v) cresce rapidamente (KHOSHBAKHT et al., 2018; MAHDAVI; CLOUSTON; ARWADE, 2011; MANANDHAR; KIM; KIM, 2019) (entre aproximadamente 3 e 6 anos), (vi) é biodegradável (MAHDAVI; CLOUSTON; ARWADE, 2011), (vii) é abundante em regiões subtropicais, temperadas amenas e tropicais (HAILEMARIAM et al., 2023; MANANDHAR; KIM; KIM, 2019) muitas destas áreas com elevados indicadores de pobreza; (viii) gera oportunidades de emprego para as pessoas das comunidades locais que possuem um amplo conhecimento do material (ADIER et al., 2023), (ix) pode ser utilizado de múltiplas formas (ADIER et al., 2023; FAHIM et al., 2022) vigas,

pavimentos, colunas, elementos de persiana, laminados, tetos, mobiliário, utensílios, andaimes, aplicações nas indústrias cosmética, farmacêutica, alimentar, de mobiliário, têxtil, papel e outras entre elas na área habitacional e indústria de construção de equipamentos urbanos (BELTRAME et al., 2024; TAIB; AHMAD; NOGROHO, 2023), (ix) incentiva o desenvolvimento económico das localidades e (x) contribui para indicadores de sustentabilidade (ADIER et al., 2023; ARIAS GUTIÉRREZ et al., 2015; CHEN e outros, 2023).

Apesar dos seus muitos benefícios, a informação para o projeto de estruturas de bambu é relativamente escassa (HAILEMARIAM et al., 2023) e a sua utilização técnica é recente se comparada com o betão e a madeira (CHICAIZA et al., 2024; HAILEMARIAM et al., 2023).

O objetivo desta investigação é avaliar a viabilidade da utilização do bambu como elemento de contravento de pórticos de aço, substituindo-se os perfis de aço utilizados usualmente, acrescentando maior sustentabilidade aos pavilhões em estruturas metálicas. O estudo exploratório do uso de bambu como elemento de contraventamento em pavilhões metálicos motiva-se pelas suas boas qualidade mecânicas (principalmente a resistência à tração e o seu módulo de elasticidade)

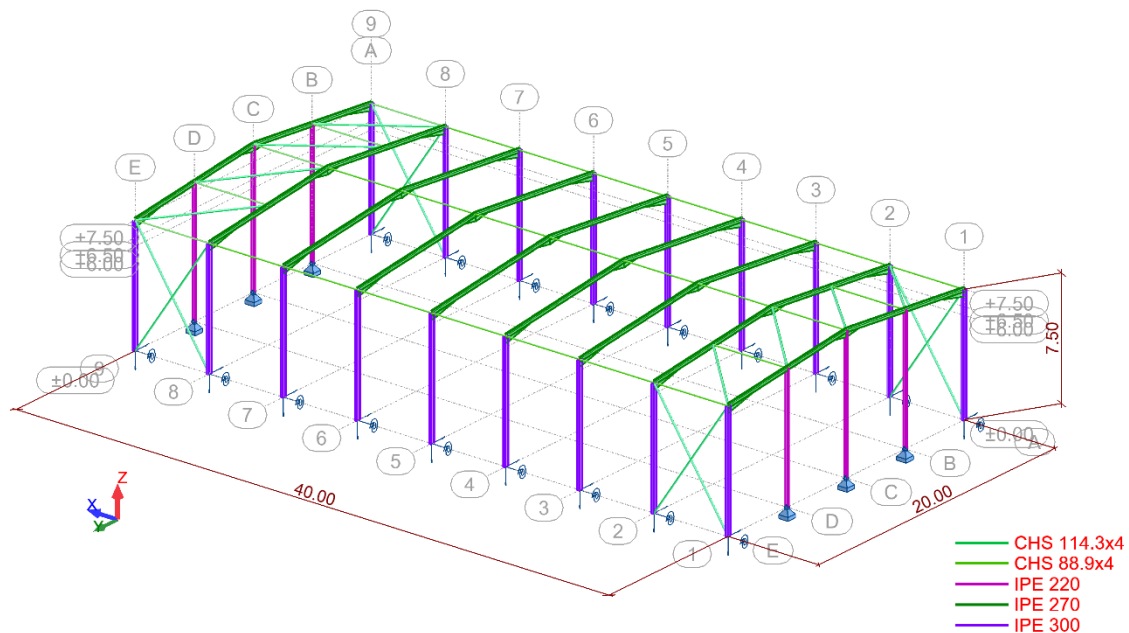
Até aqui foi feita uma revisão bibliográfica sobre a utilização do bambu como elemento sustentável na construção civil, abordando os aspetos tecnológicos da utilização do bambu. De seguida, será efetuada uma simulação do comportamento de pórticos metálicos utilizando elemento de bambu nos travamentos e comparando-os com travamentos tradicionais em aço. Por fim, são analisados os resultados para avaliar a viabilidade da utilização do bambu como elemento de contravetamento em pavilhões metálicos.

Adicionalmente, são sugeridos trabalhos futuros, que incluem as questões tecnológicas da sua aplicação prática.

## **2 CONTRAVENTAMENTO EM PÓRTICOS METÁLICOS**

A estrutura de um edifício industrial é um sistema tridimensional, formado pela associação de elementos estruturais lineares (vigas, colunas) dispostos, em geral, em planos horizontais e verticais, como mostra o pórtico espacial da Figura 1, que será usado como exemplo neste artigo. Neste exemplo, as vigas são construídas em perfis IPE 220, os pilares laterais de IPE 300 e os pilares interiores IPE 270. Os contraventamentos (ou travamentos) entre pilares no plano lateral são feitos em perfis CHS 88.9 x4 e, no plano inclinado, CHS 114.3x4.

**Figura 1 – Exemplo de pórtico espacial de estrutura de edifícios industriais metálicos.**



**Fonte:** Autores (2024)

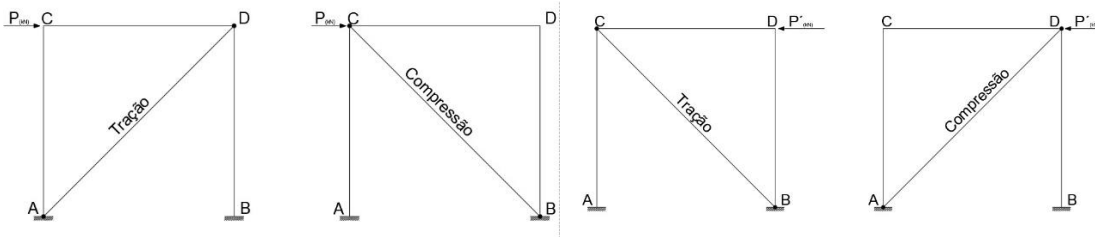
Este tipo de estrutura, que sustenta um edifício de grandes dimensões submetida a cargas permanentes de pequeno valor, é esbelta e suscetível (i) às deformações causadas por forças laterais (transversais e longitudinais, direções x e y na Figura 1, como são os casos do vento e sismo, e (ii) problemas de instabilidade estrutural.

Os contraventamentos são peças secundárias que são usadas justamente para combater os deslocamentos laterais e prevenir problemas de instabilidade estrutural do pórtico espacial.

A Figura 2 explica, esquematicamente, o funcionamento do contraventamento numa estrutura metálica. É desejável que o contravento absorva as cargas laterais e transmita à estrutura principal (pórtico) apenas forças que serão levadas às fundações. Isto é conseguido pela utilização de rótulas nas extremidades dos contraventamentos, impedindo transmissão de momentos e esforços transversos. Assim, as barras de contraventamento podem estar submetidas aos esforços de tração ou compressão, dependendo do seu posicionamento no pórtico e do sentido da força lateral. A Figura 2, explica, esquematicamente, como funciona o mecanismo de transmissão das forças laterais nos contraventamentos. Também é desejável que as barras de travamento, pela sua esbelteza, não sejam submetidas aos esforços de compressão. Assim, para prever resistência dos contraventamentos para ambos os sentidos (opostos) das cargas que se utiliza o sistema da Figura 3 (contraventamento em X ou cruz de Santo André), onde, independente da direção das forças sempre haverá uma barra que resiste à tração.

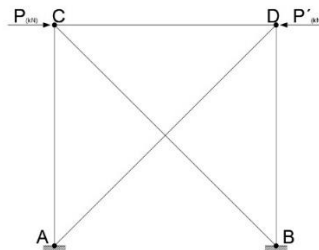


**Figura 2 – Esquema de transmissão de forças laterais nos contraventamentos.**



Fonte: Autores (2024)

**Figura 3 – Contraventamento em X.**



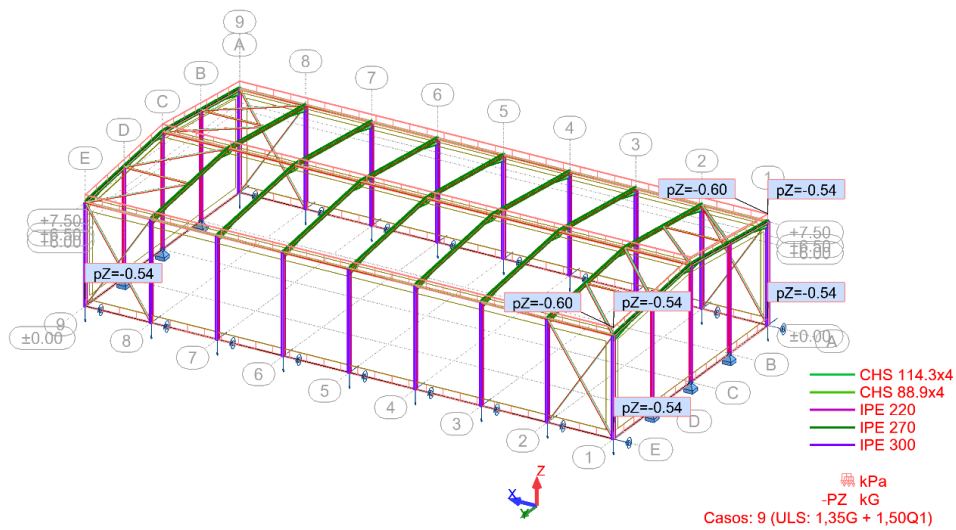
Fonte: Autores (2024)

Pela alta resistência à tração do bambu e por suas vantagens no que se refere à sustentabilidade, o presente artigo efetua, nas suas próximas seções, comparações do comportamento de pórticos contraventados com (i) os usuais perfis metálicos e (ii) barras de bambu. Estas comparações têm por objetivo analisar a viabilidade da substituição dos contraventamentos metálicos por bambu.

### 3 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

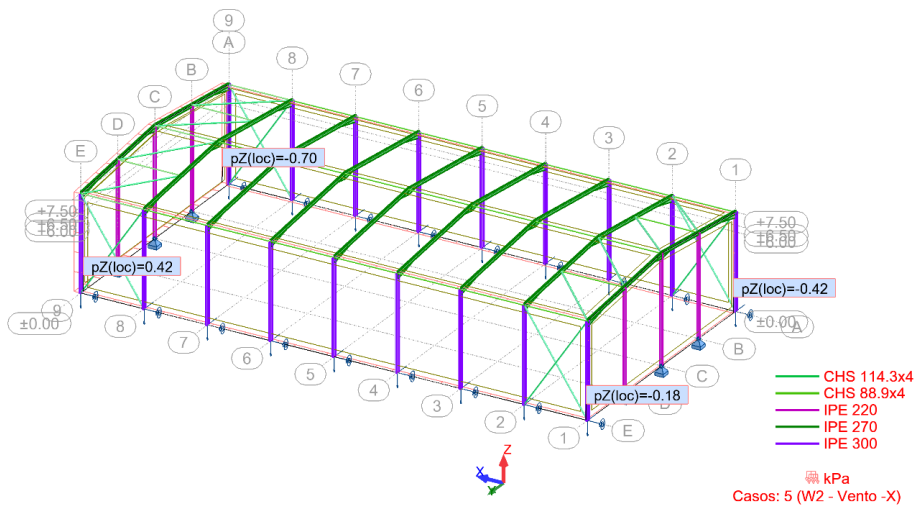
Considera-se, nas seguintes análises, a estrutura metálica com contraventamentos em perfis de aço, mostrada na Figura 1, submetida à combinação de carregamentos de gravidade indicada na Figura 4, para o Estado Limite Último (ELU). A carga permanente ( $G$ ) é de  $40 \text{ kN/m}^2$  e a ação variável (sobrecarga  $Q$ ) é de  $0,40 \text{ kN/m}^2$ .

**Figura 4 – Combinação de carregamento no pórtico espacial para ações gravíticas (ELU).**

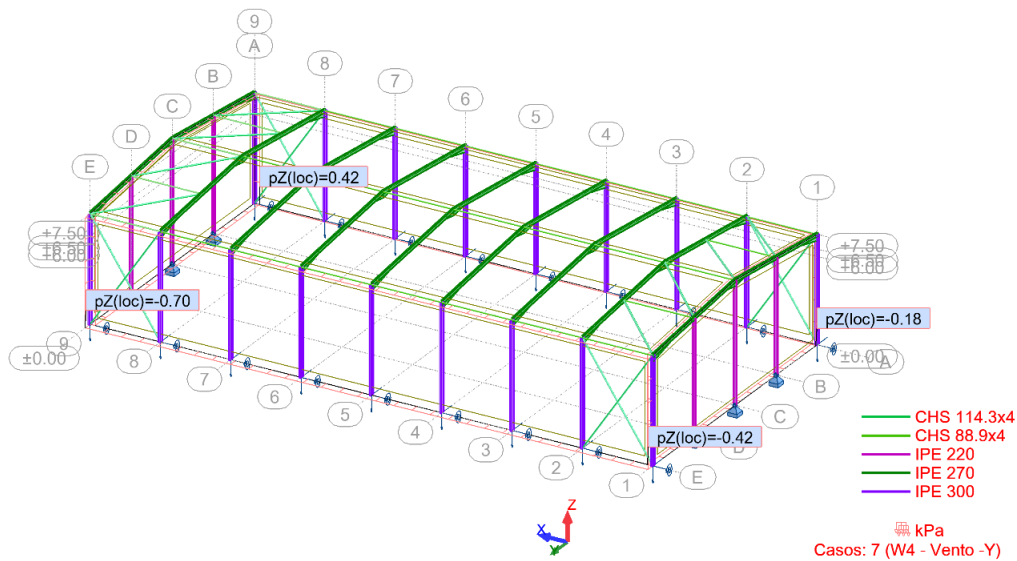


São consideradas, na análise estrutural, as cargas do vento nas direções x (Figura 5.a.) e y (Figura 5b).

**Figura 5 – Combinação de carregamento no pórtico espacial para ações do vento nas direções x (5.a) e y (5.b)**



a)



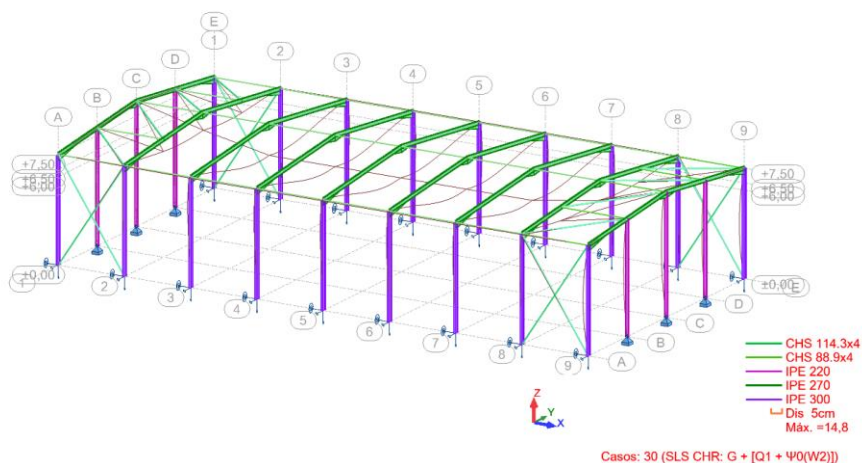
b)

## 4 ANÁLISE ESTRUTURAL

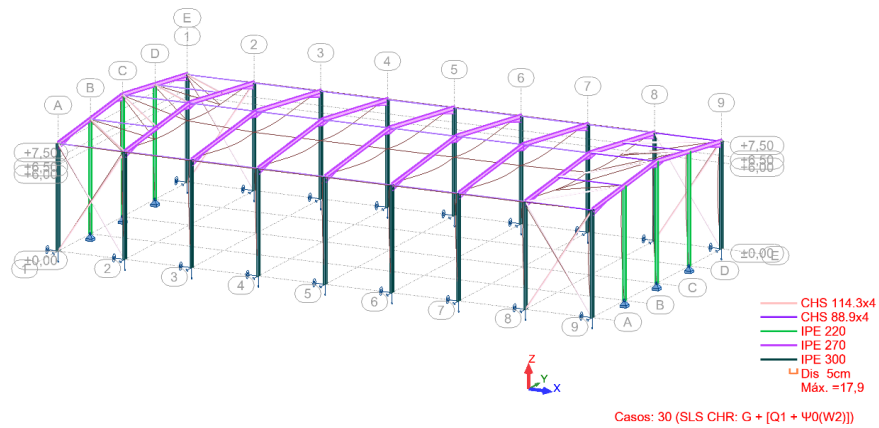
### 4.1 Deformações

A seguir são comparadas as deformações para dois contraventamentos: (i) metálicos e (ii) com bambu, para o Estado Limite de Serviço (ELS). Para os contraventamentos em bambu são utilizadas secções circulares vazadas com as mesma dimensões do contraventamento em aço (para termos de comparação,  $A = 13,85 \text{ cm}^2$ , igual a do perfil CHS 114,3x4), com as seguintes propriedades materiais: módulo de elasticidade ( $E$ ) de 10 GPa, tensão de cedência ( $F_y$ ) igual a 120 MPa e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) igual a 0,36. São comparados resultados das deformações do vento na direção  $x$  (Figura 6) e  $y$  (Figura 7).

**Figura 6- Deformação devido ao vento na direção  $x$ : a) contraventamentos metálicos e b) contraventamentos em bambu**

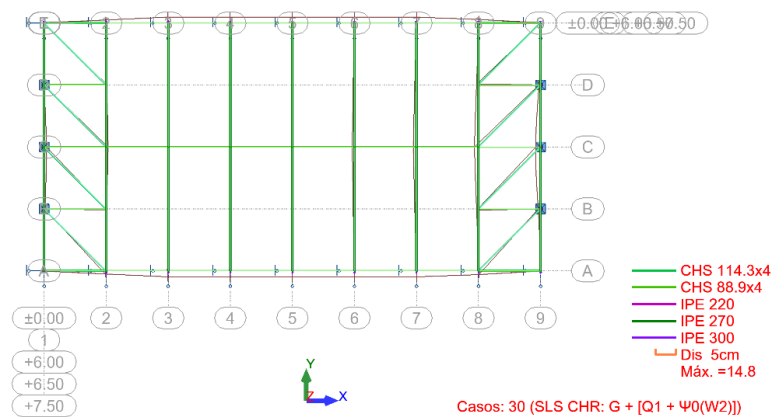


a)

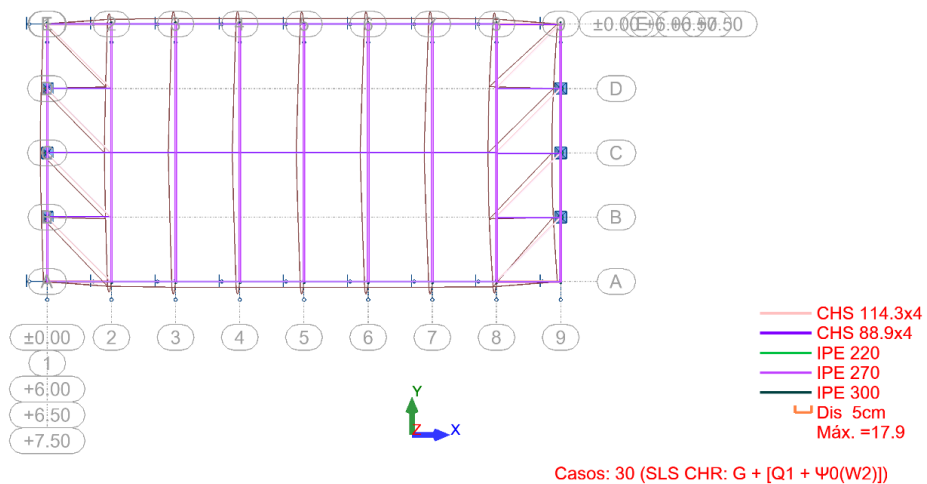


b)

**Figura 7- Deformação devido ao vento na direção x: c) topo contraventamentos metálicos e d) topo contraventamentos em bambu. (Continuação).**



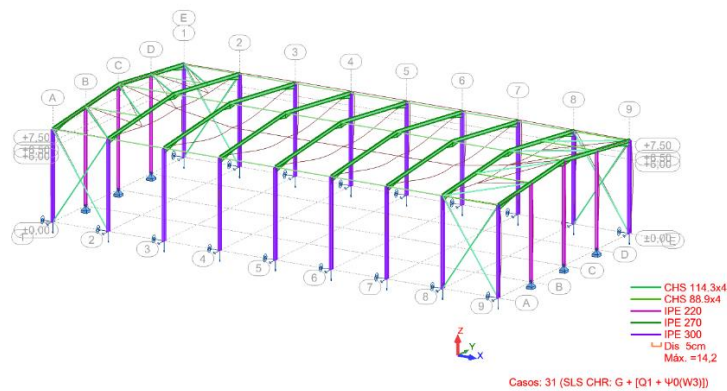
c)



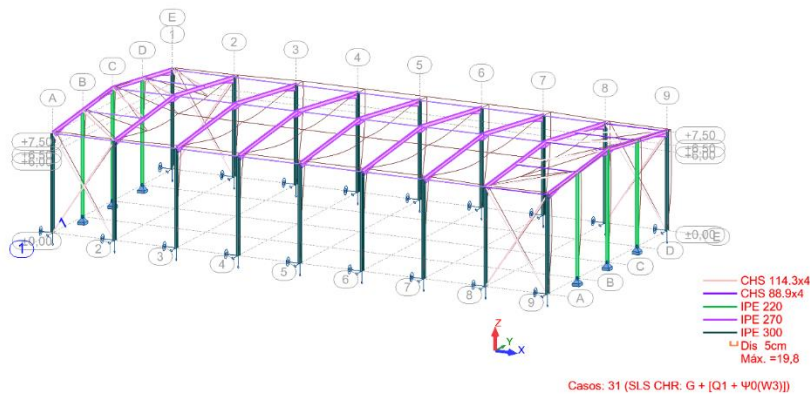
d)

O aumento na deformação máxima quando se usa contraventamentos em bambu em relação aos contraventamentos metálicos é de 3.1 mm (17,9-14,8) que resulta num acréscimo de cerca de 21%.

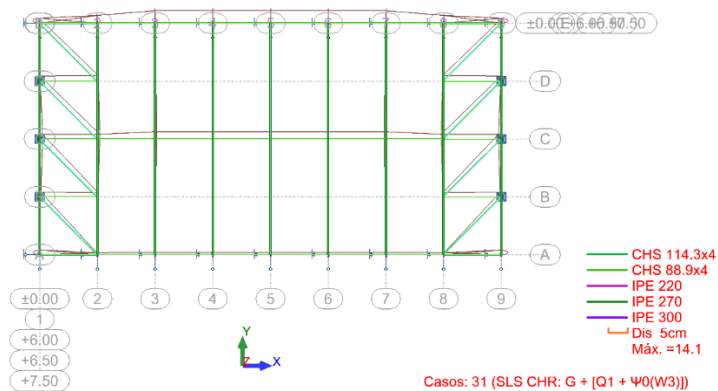
**Figura 8- Deformação devido ao vento na direção y: a) contraventamentos metálicos, b) contraventamentos em bambu e c) topo contraventamentos metálicos e d) topo contraventamentos em bambu.**



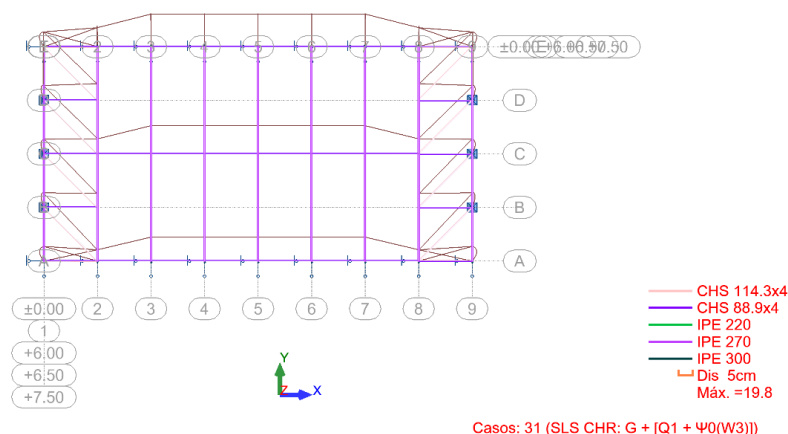
a)



b)



c)



d)

O aumento na deformação máxima quando se usa contraventamentos em bambu em relação aos contraventamentos metálicos é de 5.6 mm (19,8-14,2) que resulta num acréscimo de cerca de 39%.

## 4.2 Encurvadura

É importante comparar a resistência à instabilidade global da estrutura quando se usam contraventamentos com bambu. O coeficiente de instabilidade ( $\alpha$ ) é definido como o fator multiplicador das cargas atuantes que provoca a encurvadura do pórtico.

Os valores encontrados dos coeficientes  $\alpha$  para o modo crítico de encurvadura (o mais baixo) é igual a 3,93 para o pórtico com contraventamentos metálicos e 2,82 quando se usa o bambu. Observa-se então uma redução de cerca de 28% no valor de  $\alpha$ . Refira-se que a parte 1.1 do eurocódigo 3 (2010) obriga a que sejam levados em conta os efeitos de 2ª ordem (efeitos P- $\delta$ ) quando este coeficiente é menor que 10. Ou seja, nos cálculos dos efeitos de segunda ordem, que amplificam os momentos fletores solicitante, terão uma agravamento muito maior quando se utilizam contraventamentos em bambu. Este assunto requer estudos posteriores para quantificar este aumento.

## 4.3 Estudo da espécie *angustifolia kunth*

No contexto deste artigo, a espécie *Angustifolia Kunth* foi selecionada como exemplo de aplicação, devido à sua relevância como espécie endêmica da América do Sul e ao fato de ser amplamente investigada nas normas técnicas de vários países, incluindo Equador, Brasil, Colômbia e Peru. Essa escolha justifica-se pela importância da espécie em projetos de construção e investigações recentes, tornando-a uma das mais representativas para utilização.

Os valores definidos pela norma equatoriana refletem os padrões locais de resistência e comportamento estrutural do bambu, sendo cruciais para garantir o uso seguro e eficiente do material em diversas aplicações, especialmente na construção civil. A *Guadua angustifolia*, conhecida por suas propriedades mecânicas favoráveis, como resistência, leveza e

alta renovabilidade, é amplamente utilizada em projetos sustentáveis e infraestruturas alternativas. Destaca-se como uma opção ecológica de baixo impacto ambiental. As suas propriedades mecânicas estão no Quadro 1.

Quanto ao módulo de elasticidade é 8,31 GPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,36. A seção transversal será obtida com a equação 1.

$$A = \frac{N_{max}}{\sigma_{adm}} \quad (1)$$

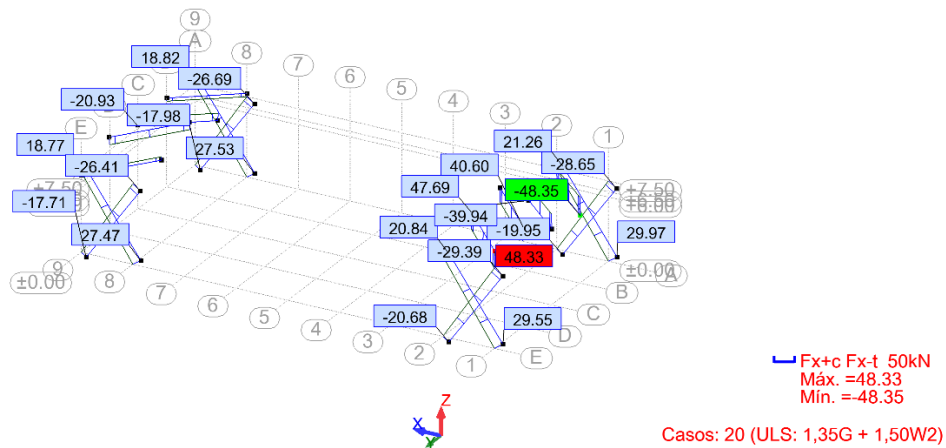
Onde  $N_{max} = 48,35$  kN é o máximo esforço de tração no contraventamento obtido da análise estrutural para o ELU (ver Figura 7). A máxima tensão admissível à tração é 19 MPa. Com estes dados obtém-se uma área mínima requerida de 25,44 cm<sup>2</sup>.

Adota-se, então, para os contraventamentos uma secção de 80 mm de diâmetro com uma espessura de 15 mm, totalizando uma área de 30,633 cm<sup>2</sup>, o que satisfaz as condições de segurança.

**Quadro 1 – Tensões admissíveis em (MPa), teor de umidade=12%**

<b>Esforço admissível a flexão (MPa)</b>	<b>Esforço admissível a tração (MPa)</b>	<b>Esforço admissível a compressão paralela (MPa)</b>	<b>Esforço admissível a flexão transversal (MPa)</b>	<b>Esforço cisalhante (MPa)</b>
<b>15</b>	<b>19</b>	<b>14</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>

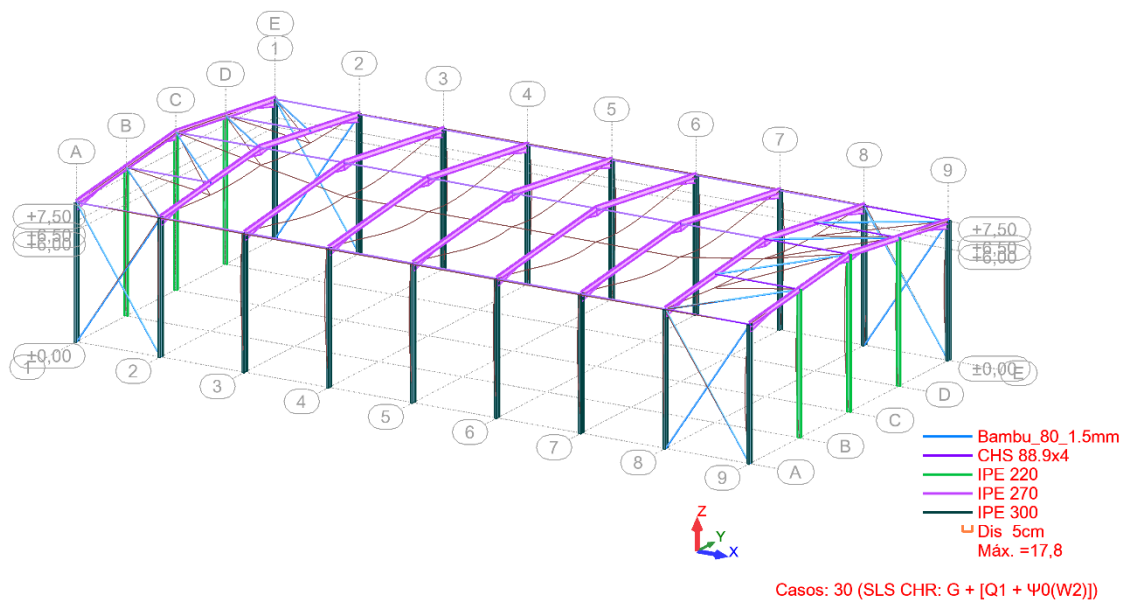
**Figura 9 – Esforços normais nas estruturas para a combinação de cargas condicionante no ELU**



São comparados resultados das deformações do vento na direção x (Figura 10) e y (Figura 11).

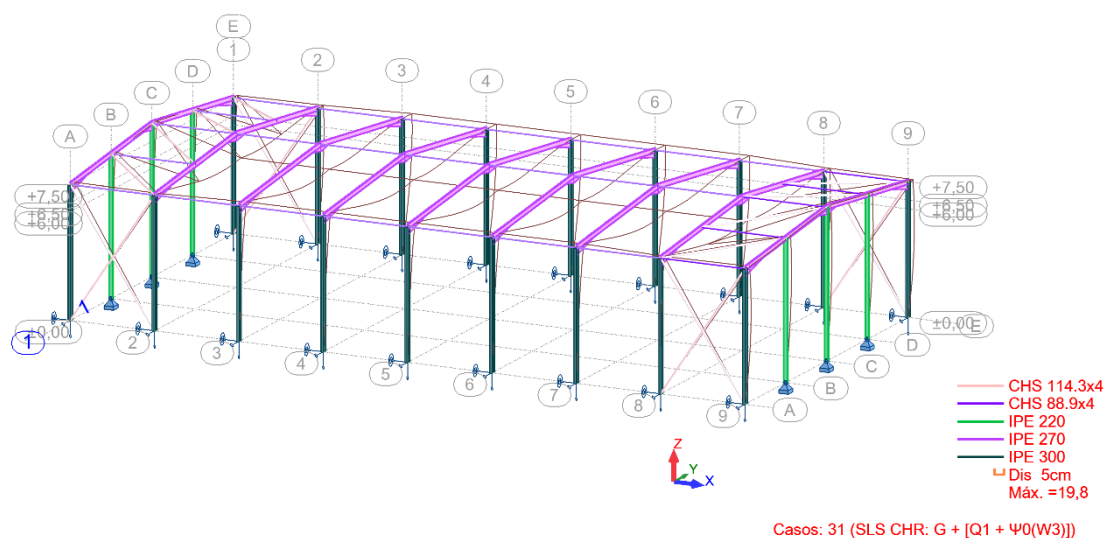
Relativamente ao uso do bambu como elemento de contraventamento relatado no tópico 4.1 deste artigo, não se observou alterações no que se refere às deformações. Refira-se que, pense embora, um aumento de área o material considerado tem menor módulo de elasticidade.

**Figura 10- Deformação devido ao vento na direção x**



**Figura 11- Deformação devido ao vento na direção y**





O coeficiente de encurvadura é menor para o pórtico metálico com contraventamentos com bambu da espécie *Angustifolia Kunth* (igual a 2,71).

## 5 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparativamente com o aço, o bambu apresenta propriedades mecânicas interessantes para seu uso como contraventamento de pórticos metálicos. Dependendo de vários fatores (espécie, umidade, etc) as propriedades do bambu (Módulo de Elasticidade e tensão de cedência, principalmente) variam. Mas os valores destas propriedades nos seus intervalos de variações (mínimos e máximos) são aptos a que se realizem testes do uso do bambu como contraventamento. Isto motivou a elaboração deste artigo.

Ressalte-se, inicialmente, que para tornar realidade o uso de bambu como contraventamento em pórticos metálicos mais estudos ainda precisam ser realizados, como, por exemplo: mais simulações de resistência e rigidez, tipos ligações entre o bambu e o aço, durabilidade, entre outros.

Dos resultados obtidos no presente artigo, comparativamente com um exemplo de pórtico com contraventamentos metálicos (tradicionais) pode-se dizer que estão dentro dos parâmetros aceitáveis para o uso do bambu como elemento de contraventamento. As deformações, a resistência e a análise de encurvadura o bambu usado como contraventamento correspondeu positivamente, embora mais estudos devem ser efetuados.

Para que se avance na efetivação do uso do bambu como elemento de contraventamento de pavilhões metálicos, são necessários, também,

investigações sobre os aspetos tecnológicos (ligações bambu-aço, por exemplo), bem como o seu comportamento dinâmico.

## REFERÊNCIAS

**ADIER, Maria Fe V.; SEVILLA, María Emilia P.; VALERIO, Daniel Nichol R.; ONGPENG, Jason Maximino C.** Bamboo as sustainable building materials: a systematic review of properties, treatment methods, and standards. *Buildings*, v. 13, n. 10, p. 2449, 2023.

**ARIAS GUTIÉRREZ, Ruth Irene; GONZÁLEZ SOUSA, R.; HERRERA SORZANO, Angelina; ALEMÁN PÉREZ, Reinaldo Demesio.** Diagnóstico integral de comunidades Kichwa amazónicas ecuatorianas para la elaboración de la estrategia de desarrollo sostenible. II. Indicadores socio-económicos. *Comprehensive assessment of Kichwa Ecuadorian Amazon communities for the elaboration of the Strategy for Sustainable Development. II. Socioeconomic indicators. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 42, n. 3, p. 73–79, 2015. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=109014067&lang=es&site=ehost-live>.

**BELTRAME, Fabiola Rago; PAPPALARDO JUNIOR, Alfonso; LÁZARO, Alberto Alonso; REAL, Lígia Vitória.** Utilização de bambu para equipamentos urbanos: projetos de um ponto de ônibus. *Revista de Ciências da Administração*, v. 1, n. Especial SE-Artigos, p. 1–17, 9 jan. 2024. DOI 10.5007/2175-8077.2023.e96273. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/adm/article/view/96273>.

**CARBONARI, G.; JUNIOR, N. S.; PEDROSA, N. H.; ABE, C. H.; SCHOLTZ, M. F.; ACOSTA, C. C. V.** Bambu – O aço vegetal. *Mix Sustentável*, v. 3, n. 1, p. 17-25, 2017.

**CHEN, Linbi; HAN, Shanyu; LI, Deyue; DENG, Jianchao; CHEN, Fuming; WANG, Ge.** Vibration performance of bamboo bundle/wood veneer composite floor slabs for joist-type floor coverings. *Buildings*, v. 13, n. 5, p. 1265, 2023. DOI <https://doi.org/10.3390/buildings13051265>.

**CHICAIZA, Angel; ORTIZ, Marcia; CHÁVEZ, Luis; TOAZA, Mishelle.** Desafíos y evolución de las normativas en el diseño de estructuras de bambú: un estudio comparativo global y la perspectiva ecuatoriana. 2024.

**CÓRDOVA, P.** *Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de la caña Guadua angustifolia Kunth del Ecuador*. 2014. Trabalho de graduação. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.

**DA MOTA, I. D. O.; DE AZEVEDO PEREIRA, M.; DAMACENA, P. C.; DOS SANTOS, L. C. B.** Estudo das propriedades físicas e mecânicas do bambu

brasileiro (*Bambusa vulgaris vittata*) para aplicação na construção de sistemas hidráulicos alternativos de distribuição de água à baixa pressão. *Revista de Estudos Ambientais*, v. 19, n. 1, p. 18-26, 2017.

**FAHIM, Muhammad; HARIS, Muhammad; KHAN, Wajid; ZAMAN, Saeed.** Bamboo as a construction material: prospects and challenges. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, v. 16, n. 3, 2022.

**GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B.** Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v. 9, n. 1, p. 107-114, 2005.

**GLEICK, Peter H.** Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, v. 8, n. 3, p. 571–579, 1998.

**HAILEMARIAM, Ezra Kassa; HAILEMARIAM, Leule Mebratie; AMEDE, Ermias Adane; NURAMO, Denamo Addissie.** Identification of barriers, benefits and opportunities of using bamboo materials for structural purposes. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 30, n. 7, p. 2716–2738, 2023.

**HUSSIN, Jamilus Md; RAHMAN, I Abdul; MEMON, Aftab Hameed.** The way forward in sustainable construction: issues and challenges. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, v. 2, n. 1, p. 15–24, 2013.

**JUNIOR, A. P. A.; VERDE, L. A.; RIBEIRO, S. C. P. M.; PORTO, T. B.** Contribuição ao estudo do bambu na engenharia civil. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 1, n. 1, 2019.

**KHOSHBAKHT, Niloufar; CLOUSTON, Pegg L.; ARWADE, Sanjay R.; SCHREYER, Alexander C.** Computational modeling of laminated veneer bamboo dowel connections. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 2, p. 4017285, 2018.

**MAHDAVI, M.; CLOUSTON, P. L.; ARWADE, S. R.** Development of laminated bamboo lumber: review of processing, performance, and economical considerations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, n. 7, p. 1036–1042, 2011.

**MANANDHAR, Rashmi; KIM, Jin-Hee; KIM, Jun-Tae.** Environmental, social and economic sustainability of bamboo and bamboo-based construction materials in buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, v. 18, n. 2, p. 49–59, 2019.

**MIDUVI MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA.** *NEC Norma Ecuatoriana de la Construcción. Estructuras de Guadúa (GaK)*. Quito, Ecuador: [s. n.], 2016.

**RAMIREZ, Fernando; CORREAL, Juan; YAMIN, Luis; ATOCHE, Juan; PISCAL, Carlos.** Dowel-bearing strength behavior of glued laminated Guadua bamboo. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, n. 11, p. 1378–1387, 1 nov. 2012. DOI [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000515](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000515).

**SPENCE, Robin; MULLIGAN, Helen.** Sustainable development and the construction industry. *Habitat International*, v. 19, n. 3, p. 279–292, 1995.

**TAIB, Mohd Zafrullah Mohd; AHMAD, Shamsidar; NOGROHO, Widhi.** A new paradigm in using bamboo as sustainable material for future building construction. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, v. 8, n. 23, p. 195–200, 2023.



## GLOBAL STABILITY IN GABION WALLS

TONDO, VINÍCIUS (1); PAULA, ANTÓNIO MIGUEL (2)

(1) UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ,  
e-MAIL: VPTONDO@GMAIL.COM

(2) INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA, e-MAIL: MPAULA@IPB.PT

### ABSTRACT

*Gabion walls, composed of double-twisted galvanized steel mesh cages filled with rocks, are widely used in civil engineering as retaining structures for slopes, allowing for steeper inclinations than the natural slope of the soil, optimizing space and ensuring construction safety. This study aimed to analyze the influence of different soil parameters on the design of these gravity walls, using the Geo5 software (2020) to verify their ultimate limit states according to Eurocode 7, with a focus on global stability through different methods. The analysis involved the variation of the following parameters: foundation soil cohesion, backfill soil friction angle, and backfill soil type. It was found that cohesion and friction angle significantly influence shear strength, with more favorable parameters resulting in greater structural stability. Additionally, it is noted that a higher backfill soil friction angle also affects the foundation by causing variation in the eccentricity values of the reaction force. The Fellenius/Petterson method (1955) proved to be conservative due to its simplifications, yielding significantly lower safety factors compared to other methods. In contrast, the Janbu (1954) and Morgenstern-Price (1965) methods demonstrated more consistent and closely aligned results in all analyses. These findings underscore the importance of a detailed and accurate analysis of soil parameters and proper compaction of the backfill soil to ensure the safety and effectiveness of gabion walls as retaining structures.*

**Keywords:** Gabion wall; global stability; gravity wall; support structure.

### RESUMO

Muros de gabiões, constituídos por gaiolas de malha de aço galvanizado de dupla torção preenchidas com rochas, são amplamente utilizados na engenharia civil como estruturas de suporte para taludes, possibilitando nestes uma inclinação maior do que a natural do solo, permitindo otimizar o espaço e garantindo segurança em construções. Este estudo teve como objetivo analisar a influência de diferentes parâmetros do solo no dimensionamento desses muros de gravidade, utilizando o programa Geo5 (2020) para realizar a verificação quanto aos estados limites últimos do Eurocode 7, com foco na estabilidade global, a partir de diferentes métodos. A análise envolveu a alteração dos seguintes parâmetros: coesão do solo de fundação, ângulo de atrito do solo de aterro e tipo de

solo de aterro. Verificou-se que a coesão e o ângulo de atrito têm uma influência significativa na resistência ao corte, com parâmetros mais favoráveis resultando em maior estabilidade da estrutura. Além disso, nota-se que um maior ângulo de atrito do solo de aterro impacta também na fundação, por gerar variação dos valores de excentricidade da força de reação. O método de Fellenius/Petterson (1955) revelou-se conservador devido às suas simplificações, apresentando fatores de segurança significativamente menores em comparação à outros métodos. Já os métodos de Janbu (1954) e Morgenstern-Price (1965) demonstraram resultados mais consistentes e próximos entre si em todas as análises realizadas. Estes resultados destacam a importância de uma análise detalhada e precisa dos parâmetros do solo e da compactação adequada do solo de aterro para garantir a segurança e a eficácia dos muros de gabiões como estruturas de suporte.

**Palavras-chave:** Muro de gabiões; estabilidade global; muro de gravidade; estrutura de suporte.

## 1 INTRODUCTION

The need for modifications in space, aiming for its optimization, is recurrent, often leading to large-scale slopes and consequently creating the need for structures to support these conditions. In this context, gabion walls have been developed—composite structures made of steel and rock, consisting of double-twisted galvanized steel cages filled with weather-resistant rocks. These form according to Barros (2021) a monolithic, draining structure and capable of withstanding small plastic deformations due to the steel components.

Designing such a structure requires knowledge of soil parameters, acting loads, and the type of intended use. In this study, the design of a gabion wall for a particular case will be carried out, with variations in soil parameters to assess their respective impacts. The “Slope Stability” and “Gabion Wall” modules of the Geo5 (2020) software will be used, following the guidelines of Eurocode 7 – Geotechnical Design (NP EN 1997-1:2010).

The objective of this work is to analyze the influence of backfill and foundation soil parameters on the ultimate limit states of gabion walls, in accordance with Eurocode 7, with an emphasis on global stability, through the comparison of different verification methods.

## 2 THEORETICAL FRAME

### 2.1 Shear strength and earth pressure

The shear strength of soils is fundamental for understanding the limitations of soil in resisting earth pressure forces, requiring knowledge of the soil's cohesion and internal friction angle. The definition follows the principles presented by the Mohr-Coulomb Failure Criterion (1773), as shown in Equation 1.

$$s = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

where,                     $s$  = shear strength;  
                               $c$  = cohesion  
                               $\sigma$  = normal stress;  
                               $\phi$  = internal friction angle.

The earth pressure can be defined as the force or pressure that the soil exerts on the retaining structure and is categorized into active, passive, and at-rest pressure.

For the calculation of earth pressures, the most commonly used methods are those of Rankine (1857) and Coulomb (1776), the latter being the one used in this work.

The Coulomb method (1776) was defined to find the minimum and maximum limit forces between the soil and the wall, being in some cases subject to an analytical solution.

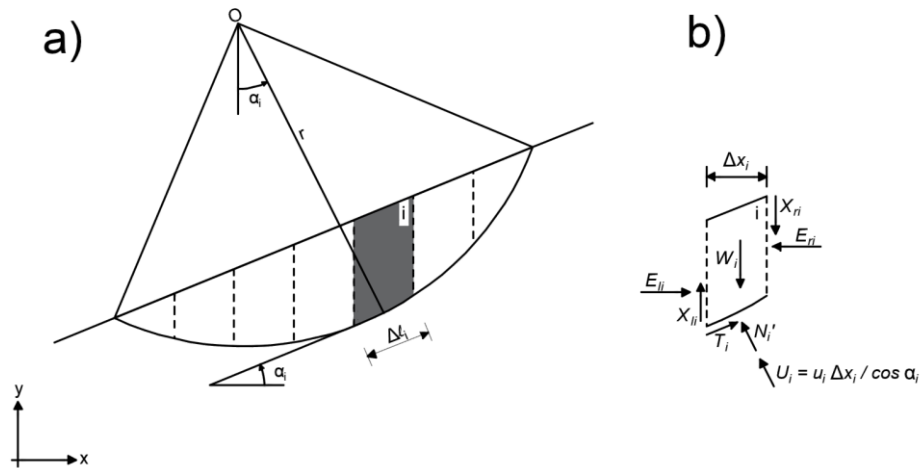
## **2.2 Slope stability**

The support structure must also be evaluated with respect to slope stability, preventing mass sliding movements that could lead to its overall collapse. Soils that exhibit a certain degree of homogeneity and isotropy tend to display a circular-shaped sliding surface, whereas heterogeneous soils generally exhibit a non-circular sliding surface.

To perform this evaluation, the method of slices can be employed. In this method, starting from a radius ( $R$ ), the slope is divided into slices, and by summing the forces acting on each slice, the global safety factor is calculated.

Incorporated into the limit equilibrium theory, the method assumes that failure occurs along a circular surface, or any other surface, and the condition of imminent failure is simultaneously reached by all elements along this surface (GERSCOVICH, 2016).

Figure 1 shows the considerations in the formulation of the general model of the slice method.



**Figure 1 – Method of slices: a) Land mass under analysis; b) Generic slice with applied forces**

**Source:** Adapted from Fernandes (2015)

The general formulation is shown in Equation 2.

$$FoS = \frac{\sum c' \times \Delta l + N' \times \tan \phi'}{\sum W_i \sin \alpha} \quad (7)$$

where,

FoS = Safety factor;

$W_i$  = Weight;

$N'_i$  = Resultant of the effective normal stress at the base of slice;

$U_i$  = Resultant of the pore water pressure at the base of the slice;

$T_i$  = Resultant of the mobilized tangential stress at the base of slice;

$E_{li}$  e  $X_{li}$  = The normal and tangential components of the interaction forces on the left face;

$E_{ri}$  e  $X_{ri}$  = The normal and tangential components of the interaction forces on the right face.

The challenge of the method of slices lies in its statically indeterminate nature, presenting, according to Fernandes (2015),  $3n$  available equations and  $4n-2$  unknowns. To render the problem statically determinate, various authors have proposed different assumptions in their calculations. These assumptions are the factors that define the uniqueness of each method, leading to varying values in the calculation of the safety factor.

The Fellenius Method (1936), also known as the Swedish Method, was the first to verify slope stability, bringing significant contributions to this field. It is a conservative method, which is due to its simplifications and the fact that it was a manual calculation method, considering the time when it was conceived.



An improvement to the Fellenius Method (1936) was made by Petterson, with the inclusion of the interference of water effects on slope stability, thereby creating the Fellenius/Petterson Method (1955), which offers greater accuracy in the calculations.

The Bishop Method (1955) disregards the shear forces  $X_i$  between slices, and with the factor of safety in both terms of the equation, this value is calculated through iterations. With fewer simplifications than the Fellenius/Petterson Method (1955), this method provides greater accuracy.

One of the challenges to be overcome until then was the simultaneous calculation in terms of force and moment equilibrium, which was achieved in the Spencer Method (1967). In this method, inter-slice forces are considered, with a constant inclination, and the sum of the resulting forces forms a force  $Q$  (in terms of total stresses) with an inclination  $\theta$ , passing through the intersection point of other acting forces (GERSCOVICH, 2016).

The Janbu Method (1954) is considered a rigorous and complex method. The planes between the slices are always considered vertical, with the line of action of the block weight ( $W_i$ ) passing through the center of the sliding surface ( $M$ ), where the normal force also acts.

Morgenstern & Price (1965) developed a method distinct from the others mentioned, where the inclination of the resultant ( $\theta$ ) is altered by a function along the failure surface, with the forces acting on infinitesimal slices (GERSCOVICH, 2016). The method still treats the slices as vertical.

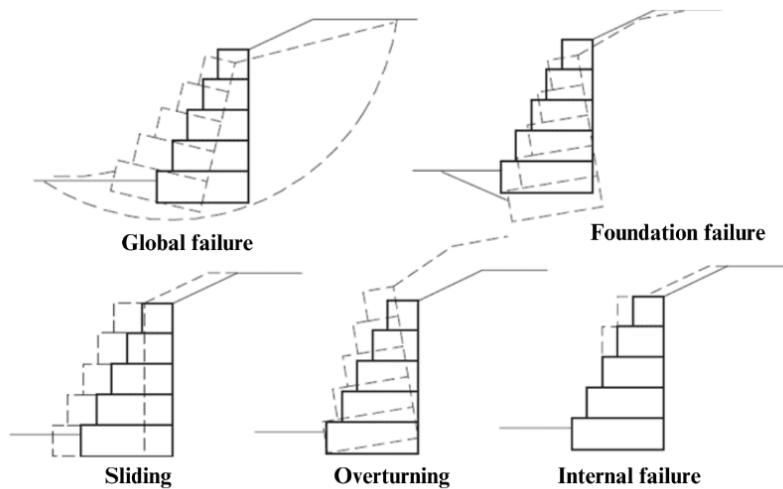
A relationship between the tangential and normal components of the interaction forces is adopted, based on an arbitrarily chosen function and a dimensionless scale factor ( $\lambda$ ), thus having a number of unknowns equal to  $3n$ , the same as the number of available equations, making the problem statically determinate (FERNANDES, 2015).

### **2.3 Eurocode 7**

The Eurocode 7 presents three calculation approaches for verifying actions and resisting forces. In Portugal, the standard is to use Calculation Approach 1. Calculation Approach 1 is distinguished by its verification of safety for Combination 1 and Combination 2, choosing the one that yields the lower value of the factor safety.

Combination 1 increases both permanent and variable actions, while the soil properties remain constant, whereas Combination 2 decreases these properties and increases only the variable actions.

EC 7 (2010) also specifies the need to verify the Ultimate Limit State (ULS) for the following conditions: global failure, foundation failure, sliding, overturning, and internal failure, which are illustrated in Figure 2.

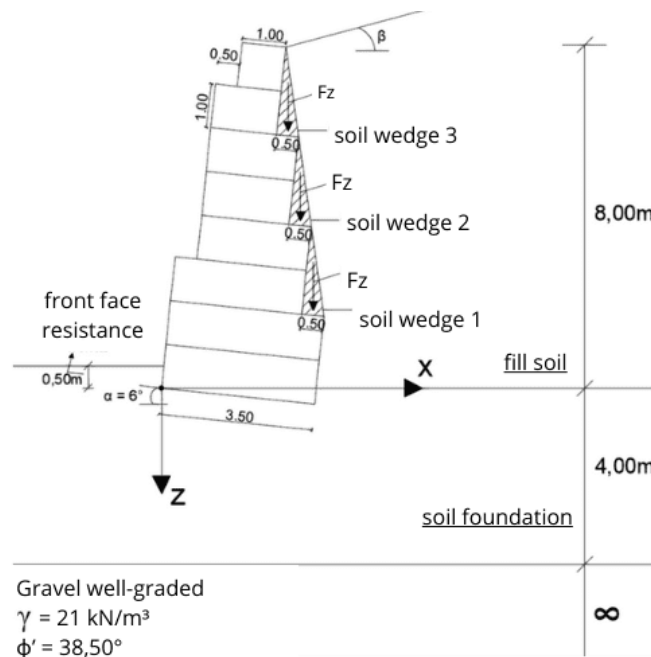


**Figure 2 – Gabion wall failures**

Fonte: Adapted from Barros (2021)

### 3 METHOD

The general model to be designed is presented in Figure 3. This figure also shows the values used in the calculations and the illustration of the soil wedges behind the wall.



**Figura 3 – General model**

Source: Author (2024)

The checks regarding earth pressure forces, overturning and sliding, foundation bearing capacity, and, above all, global stability will be presented.

Since the stepped face of the gabion wall is oriented toward the back of the wall, the soil-structure friction angle ( $\delta$ ) was assumed to be equal to the soil's effective friction angle ( $\phi'$ ). This is due to the roughness of the structure and the formation of soil wedges along this face.

Because the study focuses on the analysis of soil parameters, the values of the structural parameters and others were standardized and are defined in Table 1.

**Table 1 – Standardized parameter values in sizing**

Sector	Paramater	Value
Gabion fill	Unit weight ( $\gamma$ )	17 kN/m <sup>3</sup>
	Internal friction ( $\phi$ )	40°
	Cohesion (c)	0 kPa
Mesh	Mesh tensile strength	40 kN/m
	Connection strength (Rs)	40 kN/m
	Vertical spacing of dividers	1,00 m
Wall inclination	( $\alpha$ )	6°
Foundation bearing capacity	(Rd)	300 kPa
Slope inclination	$\beta$	15°

For calculation purposes, it was decided to follow the guidelines set forth in the European Standard EN 1997-1:2010 – Eurocode 7 (EC 7), and the Calculation Approach 1.

Table 2 presents the variation of the soil parameters that were evaluated. In models A.1, A.2, and A.3, the friction angle of the fill soil is varied. In models B.1 and B.2, the cohesion of the foundation soil is altered, and finally, in model C, the granular fill soil is replaced with high or very high plasticity soil, with firm consistency.

Analyses and verifications will be carried out using the "Gabion Wall" and "Slope Stability" modules of the Geo5 (2020) software, modifying the following parameters: backfill soil friction angle, foundation soil cohesion, and changing the backfill soil from granular material to high or highly plastic silt. The earth pressure calculation method used in the Geo5 (2020) software was Coulomb's method (1776).

In the verifications, a minimum safety factor of 1.50 will be considered. The selection of this value must be made carefully by the designer, analyzing the geotechnical characteristics and the specifics of the project. Therefore, in this case, for the verification to be satisfied, the design resistance must be 1.50 times greater than the design load.

For the ultimate limit state verifications, except for slope stability, the coordinate system is defined in Figure 3.

**Table 2 – Values of soil parameters used**

Model	Fill soil			Foundation soil		
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi' = \delta$ (°)	$c'$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'_{cv} = \delta$ (°)	$c'$ (kPa)
A.1	Granular fill			Clayey sand		
	20	30	0	20	30	10
A.2	Granular fill			Clayey sand		
	20	25	0	20	30	10
A.3	Granular fill			Clayey sand		
	20	35	0	20	30	10
B.1	Granular fill			Clayey sand		
	20	30	0	20	30	20
B.2	Granular fill			Clayey sand		
	20	30	0	20	30	40
C	Silt with high or very high plasticity (firm consistency)			Clayey sand		
	21	17	7	20	30	10

In the verification of the foundation's bearing capacity, the reaction stresses will be considered in a trapezoidal shape, as this offers greater fidelity to reality compared to rectangular ones, which is the other option available in the Geo5 program (2020). The maximum eccentricities must also be satisfied.

The following slice methods for circular surfaces will be used to check slope stability: Bishop (1955), Fellenius/Petterson (1955), Spencer (1967), Janbu (1954), Morgenstern-Price (1965). The origin point of the coordinates (X, Z) is at the top rear corner of the gabion wall, with X+ to the right and Z+ upwards.

#### 4 RESULTS

Based on the calculations performed using the Geo5 (2020) software, the results for the weight of the gabion wall, earth pressures, and verification of the ultimate limit states were obtained.

As there was no change in the values of the filling material, the weight and points of application of the gabion wall was constant, according to Table 3.

**Table 3 – Weight of the gabion wall**

Resultant forces		Coordinates	
Fx (kN/m)	Fz (kN/m)	X (m)	Z (m)
0,00	323,00	1,93	-3,00

The Table 4 shows the result of the earth pressures and the forces due to the soil wedges are shown in Table 5.

**Table 4 – Results of earth pressures**

Model	Passive earth Pressure				Active earth Pressure			
	Resultant forces		Coordinates		Resultant forces		Coordinates	
	Fx (kN/m)	Fz (kN/m)	X (m)	Z (m)	Fx (kN/m)	Fz (kN/m)	X (m)	Z (m)
A.1	12,23	-4,90	0,02	-0,22	-221,93	177,13	3,36	-2,50
A.2	12,23	-4,90	0,02	-0,22	-287,48	183,61	3,36	-2,50
A.3	12,23	-4,90	0,02	-0,22	-172,13	167,69	3,36	-2,51
B.1	19,40	-8,09	0,02	-0,23	-221,33	176,67	3,36	-2,51
B.2	33,74	-14,48	0,03	-0,24	-221,33	175,76	3,36	-2,51
C	12,23	-4,90	0,02	-0,22	-420,94	164,43	3,42	-2,35

**Table 5 - Results of wedge soils**

Model	Fz (kN/m)	Soil wedge 1		Soil wedge 2		Soil wedge 3	
		Coordinates		Coordinates		Coordinates	
		X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)
A.1 = B.1 = B.2	4,72	3,39	-1,97	3,10	-4,01	2,81	-6,05
A.2	4,88	3,39	-1,98	3,10	-4,02	2,82	-6,06
A.3	4,78	3,39	-1,98	3,10	-4,02	2,82	-6,06
C	7,69	3,41	-2,14	3,12	-4,18	2,83	-6,23

The soil wedges contribute to the stability of the structure, with the force Fz generating moments opposing overturning. The magnitude of the moment depends on the distance from the X-axis at which the force is applied.

The verification of the foundation's bearing capacity is shown in Table 6.

**Table 6 - Foundation bearing capacity**

Model	Eccentricity		Foundation bearing capacity		Factor of safety (FoS)	Verification Fos ≥ 1,50
	e <sub>max</sub>	e	Rd (kPa)	σ (kPa)		
A.1	0,333	0,117	300	258,36	1,16	No
A.2	0,333	0,200	300	346,44	0,87	No
A.3	0,333	0,054	300	195,82	1,53	Yes
B.1	0,333	0,114	300	253,27	1,18	No
B.2	0,333	0,107	300	243,05	1,23	No
C	0,333	0,359	300	743,22	0,40	No

Model A.3 was the only one where the FoS was achieved, due to a higher friction angle, which reduced active pressure and eccentricities. Model C, with the same foundation parameters as A.1 but a lower friction angle, exceeded the maximum eccentricity and had the lowest factor of safety (FoS).

Table 7 presents the verification of the overturning and sliding.

**Table 7 - Verification of the overturning and sliding**

Model	Overturning		Sliding	
	Mres (kNm/m)	Move (kNm/m)	Hres (kN/m)	Hsli (kN/m)
A.1	1262,25	552,45	824,34	155,31
	FoS = 2,28		FoS = 5,42	
A.2	1285,95	714,83	734,35	219,78
	FoS = 1,80		FoS = 3,34	
A.3	1231,23	428,71	921,21	106,75
	FoS = 2,87		FoS = 8,63	
B.1	1260,56	550,84	844,27	147,97
	FoS = 2,29		FoS = 5,71	
B.2	1257,20	547,25	848,59	134,47
	FoS = 2,30		FoS = 6,31	
C	1257,07	948,88	514,54	353,63
	FoS = 1,28		FoS = 1,46	

Model C was the only one where the required factor of safety was not met; this is due to its lower values for the fill soil parameters.

Table 8 shows the value and verification of the critical circular slip surfaces for the models presented.

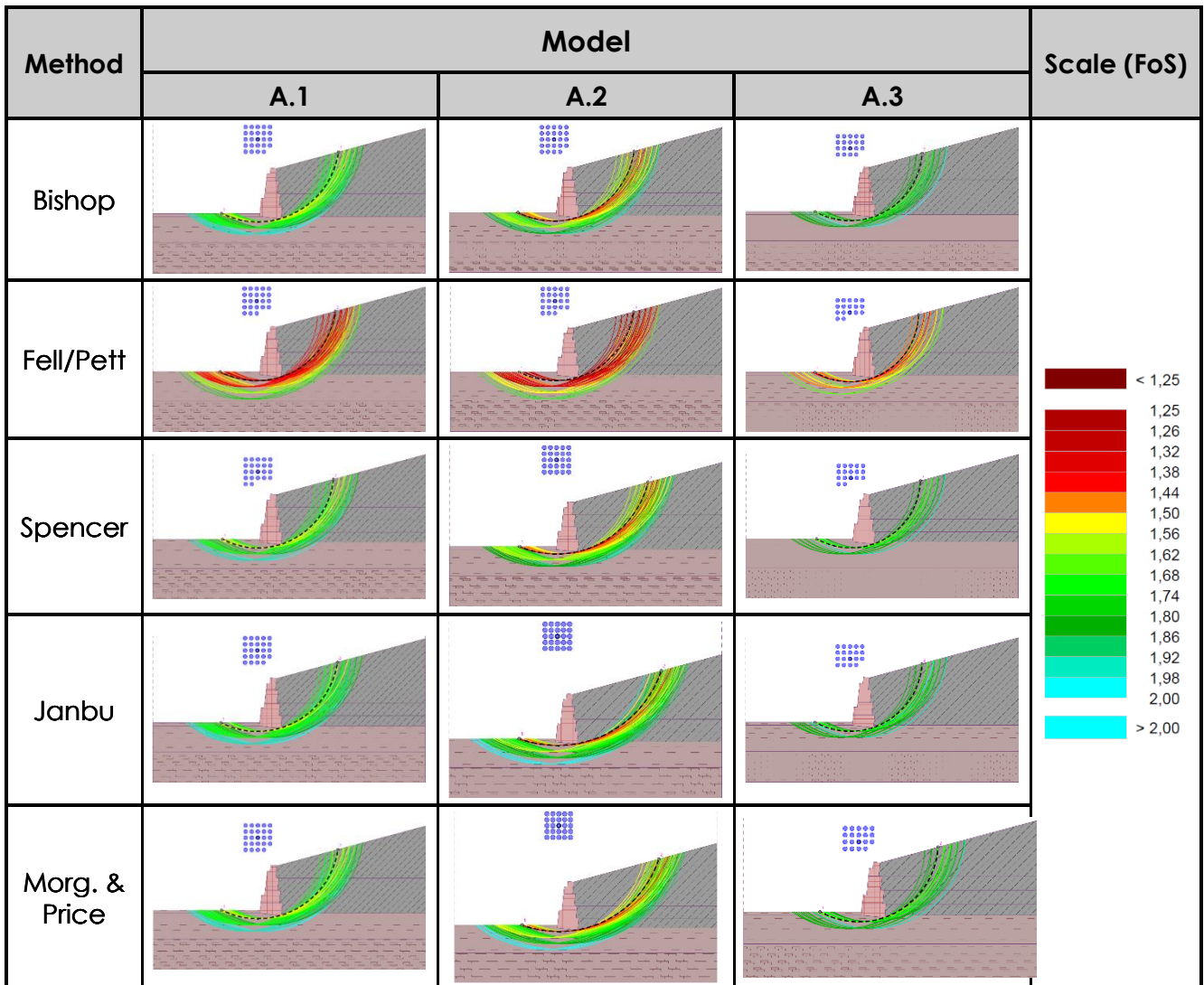
**Table 8 – Result and verification of the critical circular slip surface**

Model	Method	Critical circular slip surface			Factor of safety (FoS)	Verification
		x (m)	z (m)	R (m)		FoS $\geq 1,50$
A.1	Bishop	-3,12	4,74	13,37	1,51	Yes
	Fell/Pett	-3,27	4,21	12,92	1,29	No
	Spencer	-3,08	3,7	12,38	1,51	Yes
	Janbu	-3,15	4,6	13,25	1,51	Yes
	Morg-Pric	-3,15	4,6	13,25	1,51	Yes
A.2	Bishop	-3,14	4,55	13,2	1,37	No
	Fell/Pett	-3,09	4,39	13,03	1,18	No
	Spencer	-2,78	6,91	15,39	1,39	No
	Janbu	-2,54	9,51	17,89	1,42	No
	Morg-Pric	-2,54	9,51	17,89	1,42	No
A.3	Bishop	-3,18	3,06	11,79	1,66	Yes
	Fell/Pett	-3,24	2,43	11,23	1,38	No
	Spencer	-3,10	2,67	11,4	1,63	Yes
	Janbu	-3,18	3,06	11,79	1,63	Yes
	Morg-Pric	-3,18	3,06	11,79	1,63	Yes
B.1	Bishop	-2,59	5,16	13,65	1,69	Yes
	Fell/Pett	-2,91	2,76	11,43	1,44	No
	Spencer	-2,58	6,39	14,84	1,70	Yes
	Janbu	-2,21	7,93	16,29	1,70	Yes
	Morg-Pric	-2,19	7,75	16,1	1,70	Yes
B.2	Bishop	-2,52	4,9	13,38	2,01	Yes
	Fell/Pett	-2,12	3,94	12,35	1,72	Yes
	Spencer	-2,13	4,96	13,36	1,98	Yes
	Janbu	-2,25	5,36	13,77	1,98	Yes
	Morg-Pric	-2,57	5,06	13,55	1,99	Yes
C	Bishop	-2,59	5,16	13,65	1,23	No
	Fell/Pett	-2,57	5,06	13,55	1,11	No
	Spencer	-3,33	7,75	16,34	1,27	No
	Janbu	-3,33	7,75	16,34	1,30	No
	Morg-Pric	-3,33	7,75	16,34	1,30	No

The visual comparison of these values, using the optimized method in the program, helps to understand the influence of the parameters. The color scale used represents the factor of safety.

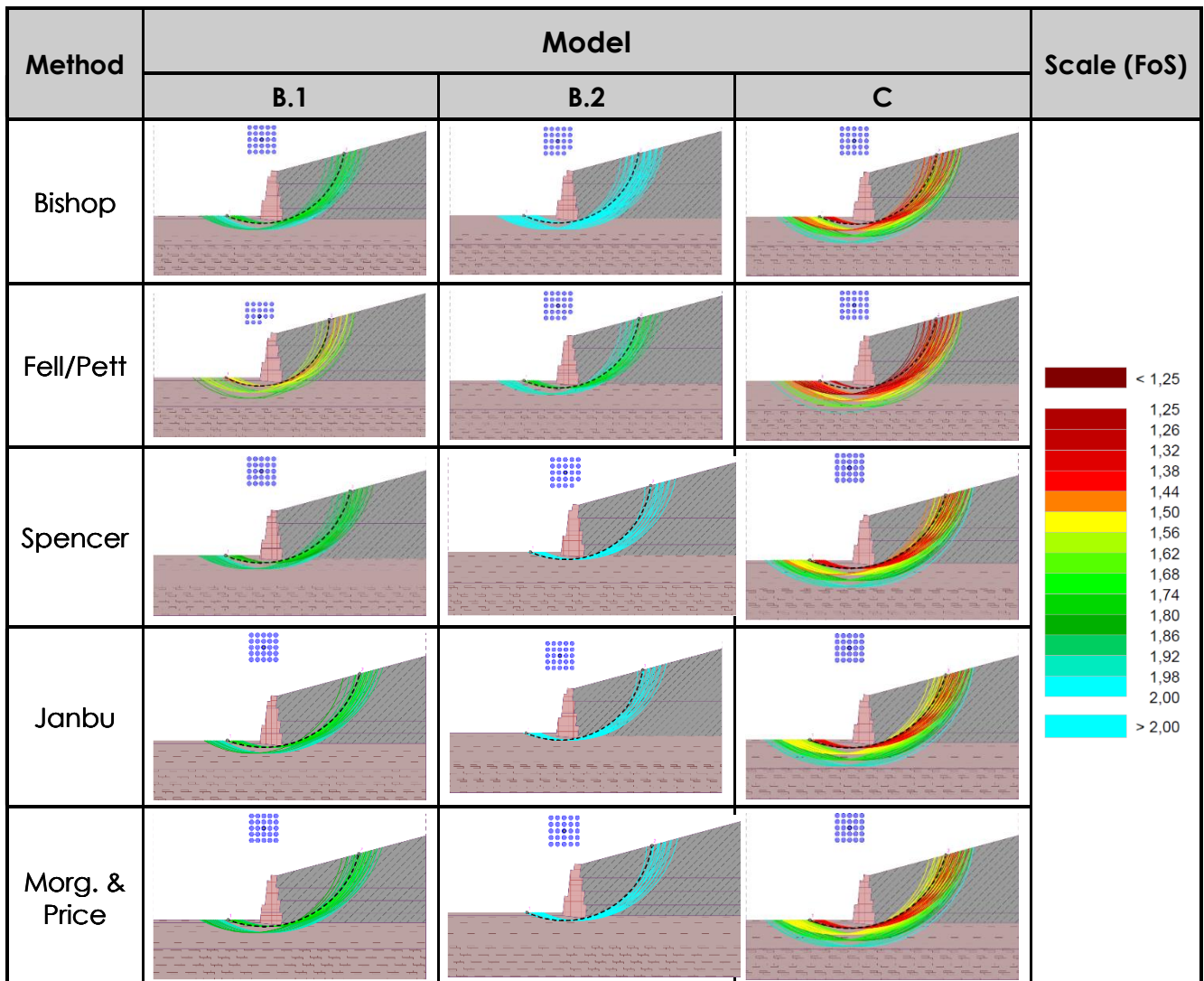
Table 9 presents the figures related to the slope stability verification for models A.1, A.2, and A.3, while Table 10 presents the figures for models B.1, B.2, and C.

**Table 9 – Comparison between the figures in models A, A.1 and A.2**





**Table 10 – Comparison between the figures in models B.1, B.2 and C**



It is possible to observe the importance of soil shear strength, as defined by the Mohr-Coulomb failure criterion. In models A, A.1, and A.2, the influence of the soil's friction angle was observed, where higher values of this parameter favor the stability of the structure. This occurs because the higher the friction angle, the less prone the soil is to deformation.

Models B.1 and B.2 present the same value as A.1 for backfill soil parameters, but those models have a higher cohesion value for foundation soil. It is evident that this increase in cohesion enhances stability, which is explained by the Mohr-Coulomb failure criterion.

Model C differs from the others, as in this case, no method met the required FoS ( $FoS \geq 1.50$ ). This is due to a lower friction angle in the backfill soil compared to the others, highlighting the relevance of this parameter, which is related not only to soil shear strength but also to the soil-structure friction angle ( $\delta$ ).

Fellenius/Petterson (1955) method proved to be conservative, with safety factors ranging from 10.81% to 20.34% lower than the others. This can be noted in models A.1, A.2, and B.1, where the FoS verification was not achieved only by this method.

## **5 CONCLUSIONS**

From the design process and the presentation of the results, conclusions regarding the backfill and foundation soil parameters in gabion walls can be drawn.

The friction angle of the backfill soil can be considered one of the predominant parameters in gabion walls, influencing both the active earth pressure and the foundation demands.

Soil wedges provide an important connection between the backfill and the structure, with their contribution depending on the geometry adopted in the design.

The factor of safety for sliding was lower than that for overturning in all cases. Therefore, generally, if the structure shows favorable results for overturning, it will also likely meet sliding criteria. However, both checks should always be performed.

In global stability analysis, the Fellenius/Petterson method (1955) consistently yielded lower FoS values, which was expected given its conservative nature. The methods of Spencer (1967), Janbu (1954), and Morgenstern & Price (1965), despite differences in their formulations regarding adopted simplifications, produced similar results.

The foundation soil properties influenced the global stability results, with models featuring superior soil properties showing more satisfactory outcomes.

Proper backfill soil compaction is crucial for the structure's effectiveness, alongside testing to obtain accurate parameter values, ensuring a design that reflects the site conditions.

The objectives were achieved, as the variation in soil parameters allowed the observation of the impacts caused by these changes. Regarding global stability, differences and similarities between the various methods were noted, highlighting which produced the best results.

This study did not include the presence of water or dynamic analysis; therefore, future work should analyze the influence of saturated soils and seismic activity in this context.

## **REREFENCES**

[1] Barros, P. L. de A. (2021). Obras de contenção: Manual técnico. Jundiaí: Maccaferri do Brasil.

[2] Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.

- [3] Coulomb, C.-A. (1776). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mémoires de mathématique & de physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences par divers savans, 7, 343-382. Paris.
- [4] FINE Software. (2020). Geo5 version 2020 [Computer software]. Praga: FINE Software.
- [5] Fellenius, W. (1936) Calculation of the Stability of Earth Dams. Transactions 2nd Congress on Large Dams, Washington DC, 445-462.
- [6] Fernandes, M. M. (2015). Introdução à Engenharia geotécnica – Volume 2 (2ª ed.). Porto: FEUP Edições.
- [7] Gerscovich, D. M. S. (2016). Estabilidade de taludes (2ª ed.). São Paulo: Oficina de Textos.
- [8] Janbu, N. (1954). Application of composite slip surfaces for stability analysis. In Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes (pp. 43-49). Stockholm, Sweden.
- [9] Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique, 15(1), 79-93.
- [10] NP EN 1997-1:2010. Eurocódigo 7 – Projeto Geotécnico – Parte 1: Regras gerais. Instituto Português da Qualidade.
- [11] Petterson, K. E. (1955). The early history of circular sliding surfaces. Géotechnique, 5(4), 275-296. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.4.275>
- [12] Rankine, W. J. M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9-27. <https://doi.org/10.1098/rstl.1857.0003>
- [13] Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Geotechnique, 17(1), 11-26.

## **A IMPLEMENTAÇÃO DO SIG NO MUNICÍPIO DE ÍLHAVO – REFORMULAÇÃO E REVITALIZAÇÃO PARA UMA NOVA ESTRUTURA**

SEMEDO, JOÃO DIOGO (1); VILARINHO, BEATRIZ (2); LOPES, JULIANA (3)

(1) Engenheiro Civil, Vice-presidente e Vereador da Câmara Municipal de Ílhavo, E-mail: [joao.semedo@cm-ilhavo.pt](mailto:joao.semedo@cm-ilhavo.pt)

(2) Arquitecta, Assessora para o Planeamento Urbano e Projetos Estratégicos no Município de Ílhavo, E-mail: [beatriz.vilarinho@pl-arq.pt](mailto:beatriz.vilarinho@pl-arq.pt)

(3) Pós-Graduada em Sistemas de Informação Geográfica, Técnica Superior de Sistemas de Informação Geográfica no Município de Ílhavo, E-mail: [juliana.lopes@cm-ilhavo.pt](mailto:juliana.lopes@cm-ilhavo.pt)

### **RESUMO**

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) municipal deve congrega informação de todas as áreas de intervenção que sejam competência do Município, tendo em vista uma maior eficiência nos processos de análise de informação para apoio à decisão. Num SIG, o suporte dos dados é um mapa, ferramenta fundamental para a visualização da informação, que se interliga a partir da sua localização geográfica, podendo ser organizada e apresentada de forma diferente, conforme a temática. Assim, o SIG organiza, comunica e permite analisar dados de uma forma rápida.

Para qualquer Município, entendemos, ter uma base de dados organizada a partir da localização geográfica permite uma análise espacial imediata e facilitadora dos processos diários e, em casos mais avançados, também facilitadora da interação entre município e munícipe e/ou demais entidades.

Em 2021, o SIG do Município de Ílhavo, apesar dos grandes investimentos feitos no passado e das colaborações com a empresa responsável pelo desenvolvimento da plataforma, encontrava-se estagnado, com uma utilização residual, que apenas servia a gestão corrente dos processos de obras particulares, ou questões relacionadas com os instrumentos de gestão territorial. No final de 2021, com o início de um novo ciclo político, entendeu-se priorizar esta ferramenta, pelo que se tornou necessário estruturar todo o SIG do Município, para que se tornasse efetivamente possível tirar proveito de uma base de dados cuja informação fosse atual, fidedigna e útil, a partir da qual fosse possível aceder a informação, em tempo real, por toda a estrutura municipal.

O presente trabalho pretende resumir a implementação deste processo de transformação digital, na área dos SIG, evidenciando todo o processo, desde a concepção e construção da base de dados, até à forma como este projeto tem vindo a ser implementado, com sucesso. O trabalho científico apresenta a perspectiva da visão técnica, mas também a visão política por detrás de um projeto que se encontra, a cada dia, em melhoria e adaptação contínuas.

**Palavras-chave:** Sistema de Informação Geográfica, Estrutura Municipal, Visão técnica, Visão política.

### **ABSTRACT**

*A municipal Geographic Information System (GIS) should bring together information from all areas in the municipality scope of intervention, having as a goal enhancing efficiency in the processes of analyzing information in order to support decision-making. In a GIS, data is supported by a map, fundamental tool to visualize information, once this is showed and linked based on its geographic location. The information can be organized and present in different ways, depending on the theme one wants to access. GIS organizes, communicates and allows data to be showed and analyzed quickly.*

*We believe that having a databased organization based on geographic location, allows to any municipality to achieve a better process analysis, facilitating all daily processes and, in some advanced cases, improve the interaction between the institution and citizen or other entities.*

*In 2021, the Municipality of Ílhavo's GIS, despite large investments made in the past, and despite all the collaborations with the company responsible for the platform, was in stalemate, and it's use was residual, serving only day-to-day management of incoming private building projects processes or some issues related to territorial management instruments. At the end of the same year, with a new political cycle, it was decided to prioritize the GIS. This has made necessary to re-structure the entire system in order to be possible to access updated, accurate and reliable information, in real time by the entire municipal structure.*

*This article aims to summarize this digital transformation project in the scope of GIS, highlighting all the process, since it's conception through the overall implementation, with success, in the Municipality of Ílhavo. This work presents, not only the technical view, but also the political strategy behind a project that's been improving continuously.*

**Keywords:** Geographic Information Systems, Municipal Structure, Technical vision, Political vision.

## **1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NO MUNICÍPIO DE ÍLHAVO**

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de âmbito municipal congrega dados de todas as áreas de intervenção que sejam competência do município, com o objetivo principal de promover a eficiência na análise da informação para apoio à decisão. Através do SIG é possível relacionar informação de forma rápida, visualmente fácil de interpretar e, portanto, comunicar dados, de forma organizada, através de mapas e tabelas.

Num sistema como o SIG, a localização geográfica é a chave para a compreensão de muitos fenómenos, sejam eles naturais, ou humanos. É possível, num sistema deste tipo, relacionar e sobrepor espacialmente vários formatos de informação, organizando-os de forma a obter o máximo de conhecimento sobre o território.

Os SIG relacionam a informação, preferencialmente existente em base de dados, e representam-na através de mapas, que são a ferramenta de suporte para a representação da informação. A localização geográfica é, no entanto, apenas um atributo, que juntamente com os restantes dados consegue executar análises de dados, otimizando o tempo para a decisão. É através da localização espacial que os atributos de um determinado elemento se relacionam e se apresentam aos utilizadores.

O projeto sobre o qual este trabalho incide foi desenvolvido numa estrutura municipal. Neste caso, considera-se que, ter uma base de dados organizada a partir da localização geográfica dos elementos, é facilitadora das análises que possam ser necessárias realizar. Os Municípios são entidades que produzem ou processam diariamente volumes consideráveis de informação geográfica, pelo que, se tornou premente aproveitar esse facto. A informação, organizada e apresentada a partir de uma localização geográfica específica, permite uma análise espacial imediata, de fácil leitura e que promove uma gestão municipal diária mais eficiente e, em casos mais avançados, também facilitadora da interação entre município e munícipe e/ou demais entidades.

No início do mandato autárquico 2021-2025, percebeu-se que o SIG do Município de Ílhavo tinha uma base de dados muito incompleta que, à data, apenas servia para dar resposta à gestão corrente relacionada com os processos de obras particulares, ou com questões relacionadas com os instrumentos de gestão territorial. Não obstante os investimentos financeiros e outros recursos disponibilizados para a aquisição da plataforma e sua implementação, a própria estrutura municipal não tirava partido de uma ferramenta que, entende-se, fulcral para uma melhoria da eficiência no trabalho, nomeadamente no que concerne ao acesso à informação.

Tornou-se premente, particularmente no que respeita ao executivo que iniciava funções numa estrutura municipal consolidada, encontrar

uma forma de analisar a informação e os processos, que fosse rápida e intuitiva, mas, acima de tudo, fidedigna, para que pudesse prestar um verdadeiro apoio na tomada de decisão. De notar que a própria estrutura municipal, salvo exceções, não compreendia a utilidade de uma base de dados com qualidade, apresentada através de um SIG, que pudesse permitir a cada utilizador, dentro daquelas que são as suas competências e as áreas de atuação dentro da própria estrutura, gerir tarefas do dia-a-dia, produzir e analisar informação geográfica. Para o executivo municipal, contudo, era premente a construção desta estrutura, revitalizá-la e melhorá-la, otimizando-a para dar resposta às rápidas e exigentes dinâmicas decorrentes da gestão do território. Em última análise, entendeu-se necessário criar uma ferramenta que viesse a servir todos, incluindo o reforço de apoio na tomada de decisão.

No seguimento, em 2022, foi iniciado o projeto que aqui se apresenta, de desenho e conceção de um SIG que pudesse ser implementado, em primeira instância, de forma exclusivamente interna aos serviços municipais, para responder e colmatar todas as necessidades de acesso à informação que foram sendo identificadas. Desde então, o SIG existente passou por uma fase de desenvolvimento acelerado, construindo uma base de dados em colaboração com as equipas municipais.

Desta forma, com o voto de confiança e de incentivo do Executivo Municipal para o desenvolvimento e implementação deste projeto, foi reconhecida a importância da congregação de dados numa plataforma única. O objetivo de trabalho foi claramente definido, transformar o SIG do Município, por forma a que este passasse a ser uma ferramenta transversal a todos os serviços municipais, houvesse uniformização nos acessos e que viesse efetivamente a permitir uma gestão eficaz da informação geográfica com que cada divisão lida diariamente, de forma célere, promovendo também, a longo prazo, um aumento de produtividade geral em todas as áreas de atuação.

O objetivo central da reformulação e revitalização do SIG do Município de Ílhavo correspondia, e corresponde, ainda, à construção (ou reconstrução) de uma plataforma SIG, ligada a uma gestão de bases de dados dinâmica, rápida, atualizada e fidedigna. A plataforma tem ferramentas onde é possível produzir, consultar e, acima de tudo, reunir informação que se encontrava dispersa pela estrutura municipal, muitas das vezes em suportes não digitais ou que, efetivamente, não existia de todo. A implementação e desenho de uma nova estrutura para o SIG do Município procurou também garantir a resposta a questões cada vez mais prementes na gestão autárquica, como por exemplo, a promoção de uma maior eficiência no tratamento dos processos internos, o que se reflete, indubitavelmente, na prestação de um melhor serviço aos munícipes.

## **2 METODOLOGIA E AÇÕES DESENVOLVIDAS**

Numa primeira fase, foi necessário proceder a um levantamento da informação geográfica que interessava aos serviços, para que depois fosse possível integrar uma base de dados e, ao mesmo tempo, catalogar, para estabelecer uma estrutura organizada por temáticas/serviços responsáveis.

O desenho da nova estrutura do sistema de informação geográfica, constituiu por isso, uma fase inicial de trabalho determinante para o desenvolvimento de todas as ações que se seguiram. Para dar cumprimento a esta necessidade, foram realizadas diversas reuniões com as diferentes Divisões Municipais, para se compreender melhor as necessidades de cada uma e qual a informação que entendiam como mais importante, para o desenvolvimento das tarefas correntes do dia-a-dia.

Contudo, e face ao desconhecimento geral sobre as potencialidades de uma ferramenta deste género, foi também necessário desenvolver algumas reuniões cujo objetivo passou, essencialmente, pela consciencialização e sensibilização dos técnicos municipais para as potencialidades e benefícios em utilizar este tipo de estrutura como ferramenta de trabalho. Dessa forma, investigaram-se outros exemplos, visitaram-se plataformas de outros Municípios, o que contribuiu também para o desenvolvimento do desenho da estrutura que, apesar de ter um diagnóstico que envolveu, essencialmente, os Chefes de Divisão, foi proposto e desenvolvido por um grupo de trabalho mais amplo, definido para o efeito, tendo posteriormente sido coordenado e estabilizado, pelo grupo de autores que apresenta este trabalho.

Apesar da quantidade de bons exemplos de informação disponibilizada publicamente, o Município de Ílhavo encontrava-se numa fase muito insipiente, que não permitia, desde logo, esse tipo de abordagem. Entendeu o Executivo, pelo Vereador e Vice-Presidente, responsável pela coordenação deste projeto, que a prioridade passaria por uma implementação interna que, quando devidamente consolidada, poderia vir a permitir a divulgação de alguma informação para o exterior da estrutura municipal. Essa fase, contudo, ainda não foi atingida, encontrando-se ainda o Município a trabalhar nesse sentido. A sensibilidade de alguns dos dados com que algumas divisões municipais lidam diariamente obrigou a uma hierarquização de acessos e de permissões, constituindo esta também uma parte essencial da implementação do novo SIG: a decisão sobre as permissões a conceder aos diferentes utilizadores do sistema.

No decorrer do desenvolvimento da estrutura da base de dados percebeu-se que muita da informação necessária não existia, ou encontrava-se muito desatualizada, face ao hiato temporal decorrido desde a altura em que tinha sido carregada e desde a qual não tinha sofrido qualquer atualização ou verificação. De destacar que,



inicialmente, a estrutura SIG do Município contava apenas com a georreferenciação dos processos de obras particulares, com a existência de informação relativa aos instrumentos de gestão territorial e cartografia, para a emissão de plantas de localização e das rotas de recolha de resíduos, com indicação dos pontos de existência de Ecopontos. Em tempos teria existido uma tentativa de congregar dados relativos ao património municipal, sem sucesso e, toda a restante informação carregada no sistema, era avulsa, pontual, raramente verificada, ou inexistente. Assim, foi necessário adotar metodologias para levantamento e validação da informação. Em alguns casos específicos, com maior complexidade, como por exemplo o levantamento da sinalética e do mobiliário urbano existentes no Município, ou o levantamento do arvoredo urbano (que necessita dar resposta a determinadas exigências legais), foi contratualizada a realização desses levantamentos com empresas especializadas. O Município, para estes casos, estabeleceu as exigências técnicas adequadas às necessidades dos serviços e aos campos a que era necessário dar resposta, decorrentes do desenho e da estrutura definidos inicialmente para a composição da base de dados. Noutros casos, a base de dados tem vindo a ser alimentada com informação recolhida pelo corpo técnico municipal, pelo que se estabeleceu, para cada área de atuação, um técnico responsável pela validação dos dados inseridos. Posteriormente virá a ser necessário implementar outras metodologias de trabalho que incluam, de forma recorrente, a atualização da informação existente.

**Figura 1 - Temáticas com Informação Geográfica no Sistema de Informação Geográfica do Município**

**Fonte: Município de Ílhavo (2024)**

O SIG do Município continua, ainda, em fase de implementação, ainda que, maioritariamente esteja já bem consolidada, reunindo muita

informação que, até há cerca de um ano, não se encontrava sequer disponível para consulta interna pelos serviços. Neste âmbito, entende-se importante destacar algumas ações desenvolvidas, que têm permitido a efetivação da construção desta nova estrutura.

## **2.1 Catalogação da Informação Geográfica**

A catalogação da informação geográfica (existente e prevista) constituiu o primeiro passo, e mais importante, uma vez que é a partir dela que se pode concretizar a existência de uma nova estrutura. A partir do desenho deste catálogo tem-se vindo a construir todo o sistema, depois de identificadas as áreas temáticas a desenvolver. Este trabalho conta com a colaboração de diversos elementos técnicos do corpo de trabalhadores municipais, das várias áreas, por forma a enriquecer a discussão e a melhor perceber a que necessidades é que se deverá dar resposta.

## **2.2 Reuniões periódicas com as equipas**

As reuniões periódicas têm-se sido cruciais, não apenas para o desenho do catálogo, mas sobretudo para, continuamente, relembrar e sensibilizar as diversas equipas relativamente à importância da informação geográfica no seu trabalho diário. É também nestas reuniões que se alerta para a necessidade de avaliar a qualidade dos dados e de se aferir a sua veracidade, para que a informação disponível seja sempre fidedigna.

## **2.3 Reestruturação da Informação Geográfica**

De uma forma geral, a informação geográfica existente na estrutura municipal encontrava-se dispersa. Esta questão era agravada por uma grande quantidade de informação disponível não ser digital, ou não estar sequer digitalizada, e, mesmo nesses casos, raramente estava devidamente sistematizada. Inúmeros serviços municipais detinham ainda uma grande parte do seu arquivo exclusivamente em papel ou até, eventualmente, centrados num único técnico, sem que outros tivessem acesso a essa mesma informação. A reestruturação da informação, mais do que a reestruturação da informação geográfica, era, por isso, premente, por forma a promover a segurança dos dados e, posteriormente, passar a integrá-la na base de dados, já depois de devidamente validada e atualizada.

## **2.4 Programação e Desenho dos Sistemas**

Apesar de, numa fase inicial, ter sido possível o desenho e a conceção da estrutura, bem como a definição de ações a desenvolver,

sem a necessidade de uma abordagem estritamente especializada, a partir de um determinado ponto passou a ser essencial concretizar a programação e desenho dos sistemas, conforme havia sido preconizado. Desta forma, foram necessárias as seguintes tarefas:

- Restabelecer conectores de acesso/ leitura a outras bases de dados através da tecnologia existente SIG e ERP;
- Criar e desenvolver o site interno que reúne toda a informação e permite a consulta e produção da mesma;
- Gerir, de forma contínua, os acessos à informação, incluindo a atribuição de novos utilizadores, o que tem vindo a acontecer de forma gradual, à medida que o sistema é implementado;
- Criar novos conteúdos ("dashboards", "webmaps", formulários e documentos de apoio) temáticos, direcionados para a análise de dados, com base no tipo de informação carregada na base de dados;
- Criar circuitos de sistematização da nova informação geográfica que é gerada internamente, nomeadamente entre a ERP e o SIG;
- Estabelecer ligação a bases de dados externas para leitura e apresentação de alguma informação com relevo para o Município, em diversos formatos (como por exemplo, informação relativa ao cadastro da rede de abastecimento de águas);
- Implementar, nas informações técnicas dos serviços, coordenadas universais (WGS84), no texto, para auxílio na localização dos assuntos, geralmente mais direcionados para obras/ empreitadas.

## **2.5 Disponibilização de Novos Dados**

A disponibilização de dados inexistentes exigiu, não apenas um esforço interno para alimentar a informação já existente, mas não sistematizada, mas também a programação de aquisições, designadamente nos casos em que a complexidade dos dados a recolher era mais complexa. Desta forma, o Município procurou tirar partido da informação necessária para dar cumprimento a determinadas imposições legais (por exemplo, o levantamento do arvoredo urbano), por forma a que fossem simultaneamente garantidas respostas a outras necessidades dos serviços municipais. A programação das aquisições teve em atenção, não apenas estas necessidades, elencadas pelas diferentes divisões municipais, mas também a necessidade de integração e disponibilização facilitada dos dados na nova estrutura SIG. Os produtos adquiridos têm vindo a ser rapidamente integrados e disponibilizados na plataforma SIG municipal, para que as equipas possam ter acesso imediato aos dados e, a partir daí, colmatar

algumas necessidades específicas. A título de exemplo, as imagens capturadas no âmbito da aquisição do levantamento da sinalética e do mobiliário urbano permitirão adensar e atualizar questões relacionadas com os números de polícia ou fiscalização.

## **2.6 Capacitação de técnicos para a utilização do software**

A capacitação de técnicos para a utilização do software tem vindo a ser uma tarefa essencial para se manter toda a estrutura devidamente funcional e constantemente atualizada. Por conseguinte, tem vindo a ser possível expandir o número de acessos "desktop" a técnicos que desenvolvam competências para tal, otimizando a capacidade de recolha e carregamento de informação. Ainda neste âmbito, é possível criar condições para produção de informação em ambiente "web", mais simples, cujo acesso é concedido a técnicos que não possuam competências para a utilização do sistema em versão "desktop" e que permite, de uma forma geral, alimentar a base de dados de forma direcionada (disponibilizando, por exemplo, apenas alguns campos específicos de preenchimento, facilitando o processo de alimentação da base de dados).

## **3 CONSEQUÊNCIAS E IMPACTOS DA IMPLEMENTAÇÃO DA NOVA ESTRUTURA SIG NO MUNICÍPIO DE ÍLHAVO**

A curto prazo, a nova estrutura tem já proporcionado diversos benefícios para o Município de Ílhavo como, por exemplo, o acesso rápido a informação atualizada e com maior fiabilidade. Num primeiro momento, foi possível perceber, no âmbito dos serviços SIG, uma diminuição do número de solicitações por parte de colegas de outras divisões para obtenção de informação temática. A estrutura desenhada e a forma como tem vindo a ser implementada, tem permitido aos colegas, sem conhecimento técnico de base específico nesta área, conseguir encontrar a informação que necessitam de uma forma autónoma, otimizando, de uma forma geral, o funcionamento dos diversos serviços. A redução dos pedidos foi notada, essencialmente, no âmbito da necessidade de análise de informação sobreposta, em mapa, uma vez que até já está disponível para consulta. Todavia mantêm-se os pedidos relacionados com a obtenção de determinados ficheiros em formato editável, nomeadamente quando o âmbito do assunto excede a mera necessidade de consulta da informação (a título de exemplo: solicitações, por entidades externas, de informação em formato "shapefile").

Com a nova estrutura SIG, a atualização de dados tornou-se mais eficiente, com cada equipa responsável a produzir os dados dentro da sua área de atuação. Foi também possível melhorar a precisão da informação ao balcão, prestada aos munícipes, uma maior flexibilidade

e responsabilidade no uso de dados geográficos, tornando a resposta a pedidos (internos e externos) mais célere, completa e totalmente desmaterializada, uma vez que cada divisão está hoje capacitada para recolher e analisar informação geográfica de forma independente. Existe hoje, em toda a estrutura municipal, uma maior consciencialização da importância da localização geográfica e da análise de dados para uma melhor gestão de recursos.

Na generalidade, os técnicos responsáveis pelos SIG defendem permanentemente a necessidade de fomentar a disponibilização de dados. Esta questão, que normalmente é debatida de forma teórica é, na maioria das vezes, colocada em prática com alguma lentidão, em grande parte dos Municípios, ou de outras estruturas que utilizam este tipo de sistema, principalmente, quando estamos perante um corpo técnico mais pequeno o que, forçosamente, faz com que a informação geográfica e a capacidade de a trabalhar se concentrem num, ou dois, postos de trabalho.

O Município de Ílhavo, com estratégia e metodologias associadas à implementação desta nova estrutura SIG, no período dos últimos dois anos, aumentou o número de utilizadores SIG internos em 370%, passando de um total de 17 técnicos utilizadores, para um total de 80. Este aumento, abrange técnicos especialistas, técnicos de produção online e utilizadores de consulta. Toda a estrutura municipal, de forma devidamente articulada, e tendo em conta as permissões específicas de cada um, está hoje habilitada a aceder a conteúdos geográficos necessários ao seu trabalho diário.

**Figura 2 - Evolução da estrutura SIG do Município de Ílhavo. Os números pequenos correspondem ao estado no início de 2022**

A implementação da nova estrutura SIG do Município de Ílhavo tem vindo, progressivamente, a assumir o seu impacto, cada vez mais relevante, na gestão diária dos trabalhos inerentes ao Município. De facto, a informação sistematizada numa única base de dados, permite aferir dados atualizados, de forma imediata, sobre questões de infraestruturação, espaço público, recursos naturais, espaços verdes, entre outros. A disponibilização dos dados e a informação atualizada, têm vindo a permitir às equipas uma melhor gestão das suas ferramentas de trabalho, otimizando recursos e permitindo, mais facilmente, estabelecer prioridades no que respeita às tarefas diárias.

As Zonas Industriais, bem como outras áreas territoriais para investimento, representam, para o Município de Ílhavo, um assunto crucial, no âmbito do desenvolvimento económico. Desta forma, é necessário que a gestão do território seja desenvolvida com a maior quantidade de informação disponível, nomeadamente no que respeita à disponibilidade de informação relativa a possíveis locais para desenvolvimento de indústria. Assim, no que respeita a esta temática, foram aproveitadas estruturas de dados existentes, não apenas geográficos, e deu-se início ao desenho de ferramentas que apoiem na análise da informação disponível relativa às Zonas Industriais. Foi criado de raiz um “*dashboard*” que, de forma automática e dinâmica, apresenta informação produzida na base de dados SIG, tendo as seguintes fontes: a própria georreferenciação, documentos “*excel*”, levantamentos realizados no terreno, fotografias e dados ERP. O acesso ao “*dashboard*” e restantes dados é restrito a um grupo de utilizadores e, a partir desse, é possível conhecer o estado do lote industrial (vazio ou ocupado), que empresas estão instaladas e outros dados relacionados com a própria atividade económica que ali se desenvolve.

Também no que respeita à gestão dos espaços verdes, regas e cortes, esta informação encontra-se já sistematizada num “*dashboard*” especificamente criado para o efeito. Neste âmbito, o Município de Ílhavo não tinha ainda qualquer sensorização, pelo que não existiam dados disponíveis através de uma plataforma tecnológica. A informação reunida foi carregada manualmente na base de dados. Numa fase inicial da criação do “*dashboard*” foi necessário desenvolver um trabalho exaustivo relacionado com a análise dos dados retirados das faturas relativas às despesas com rega. Com estes dados é agora possível avaliar, por exemplo, qual o custo da rega de cada um dos espaços verdes e, dessa forma, consegue-se também saber, por exemplo, por freguesia. Ainda no “*dashboard*” relativo aos espaços verdes, o Município encontra-se, neste momento, a conceber uma plataforma de “*workforce*” para o efeito, que permita acompanhar as necessidades de intervenção de um determinado local, com o registo das últimas intervenções e do responsável pela manutenção do espaço. Aceder a este tipo de informação de forma rápida e devidamente informatizada, organizada a partir da sua localização geográfica, melhora efetivamente a forma como diariamente as equipas se podem distribuir

e posicionar no terreno, a partir de uma análise da informação relativa a necessidades já respondidas e outras ainda pendentes. A qualidade da informação disponível é igualmente determinante e, quando o sistema estiver 100% implementado, com a sua operacionalização devidamente afinada, passará a ser possível que as equipas, de forma totalmente independente, consigam fazer a gestão do trabalho diário, trazendo como consequências: um menor gasto de água, a aferição de locais que precisam de intervenção e a definição de prioridades, permitindo ainda, em tempo real, sinalizar as áreas já intervencionadas. Consequente deste trabalho sistematizado, sobretudo para uma vertente mais operacional, será também possível, ao Município, quantificar custos e perceber, por exemplo, o valor do custo mensal, ou anual, de cada metro quadrado de espaço verde, por rua, ou por freguesia, etc. Também numa fase posterior, em que o SIG do Município de Ílhavo esteja já devidamente consolidado internamente, poder-se-á disponibilizar, à semelhança de outros municípios no país, a possibilidade de sinalização de ocorrências por parte dos Municípios, também nesta vertente específica aqui explanada.

A implementação de uma nova estrutura SIG no Município trouxe consigo alguns benefícios que foram perceptíveis, logo desde uma fase inicial, nomeadamente pelas equipas que rapidamente perceberam que, dispendo desta ferramenta de trabalho, a necessidade de recorrerem aos colegas técnicos de SIG para sistematização de informação era muito menor, podendo desenvolver as suas tarefas com maior autonomia, apenas possível pela possibilidade de visualizar a informação sobre um mapa. Ao nível do Executivo, também a possibilidade de consulta de informação através, não só dos mapas, mas também dos "dashboards", tornou mais simples a consulta de alguns processos, ou de informação relativa a uma determinada temática, de forma completamente independente.

### **Figura 3 – Resumo da Implementação do Sistema de Informação Geográfica no Município de Ílhavo. Análise dos dados em Power BI.**

**Fonte: Município de Ílhavo (2024)**

É ainda de destacar que a implementação desta nova estrutura, numa fase inicial, não teve qualquer custo associado. Este novo desenho do SIG do Município suportou-se, essencialmente, na utilização de recursos já existentes, para a reorganização e adaptação de estruturas que já existiam, bem como na formação/ consciencialização para a criação de novos conteúdos. Foi necessário instalar software que também já existia, noutras postas, ocupando licenças que o Município já dispunha e que não estavam a ser utilizadas. Apenas numa fase posterior foi necessário adquirir, não apenas alguns levantamentos de informação, mas também novos servidores, para apoio à estrutura, ainda que a sua finalidade não se prenda exclusivamente com o SIG.

Entendemos ser ainda de destacar a sustentabilidade do projeto que permite, de forma contínua, uma constante reorganização, sempre que tal se verifique necessário, como consequência da sua utilização. Desta forma é possível enriquecer, cada vez mais, a estrutura municipal com dados temáticos fiáveis, em permanente atualização, relacionados entre si, o que se concretizará na tomada de decisões mais conscientes sobre as temáticas da gestão municipal.

#### **4 DIFICULDADES NA IMPLEMENTAÇÃO E DESAFIOS NA CONTINUIDADE**

Além da resistência normalmente existente perante processos de mudança, verificou-se também alguma dificuldade, por parte de alguns técnicos, na leitura de mapas. Nem todos os técnicos se encontram devidamente capacitados para a leitura e interpretação de mapas, o



que se refletiu na necessidade de apoio em determinadas tarefas. Esta dificuldade despertou para a necessidade de assegurar que, em cada equipa, existe, pelo menos, um elemento que esteja perfeitamente à vontade com o suporte geográfico e com a sua interpretação, por forma a garantir que a informação é carregada no ponto ou polígono corretos.

Por outro lado, a dificuldade de sensibilizar os colegas que habitualmente não usam este tipo de sistemas tem vindo a ser ultrapassada, apesar de, nesta fase, ainda se verificarem alguns constrangimentos. De uma forma genérica, a estrutura está comprometida em trabalhar, constantemente, para quebrar preconceitos e consciencializar colegas da facilidade e da utilidade da leitura da informação geográfica, demonstrando o potencial que a interpretação dessa informação pode trazer.

Na fase de implementação atual podem-se sinalizar dois grandes desafios na continuidade: a necessidade de criar hábitos de atualização constantes e a criação de novas ferramentas para leitura de dados. A atualização da informação constante da base de dados é determinante para o sucesso da implementação deste sistema, uma vez que apenas desta forma será possível garantir, não apenas a disponibilidade de informação, mas, acima de tudo, a sua fiabilidade, assegurando sempre que esta se encontra atualizada e correta. Desta forma, um dos grandes desafios passará por inculcar, nos diversos técnicos, a rotina de confirmar e atualizar informação, sempre que haja qualquer intervenção/ ação, que influencie a informação inicialmente carregada para a base de dados. Por outro lado, e no que respeita a uma questão mais técnica, relacionada com o desenvolvimento e programação do sistema, o grande desafio atual prende-se com o desenvolvimento da plataforma SIG: alargar a outras formas de aquisição de dados, mais conhecimento e mais aplicações de disponibilização para a análise de dados ("*dashboards*", por exemplo, ou outras ferramentas de visualização da informação).

## **5 CONCLUSÕES**

Numa estrutura municipal que tinha realizado grandes investimentos no contrato realizado com a empresa fornecedora da tecnologia para os sistemas de informação geográfica, o SIG implementado era, em 2021, insipiente. A estrutura apresentava-se, ao grupo restrito de utilizadores, com uma interface básica e minimizada, que não correspondia às potencialidades deste tipo de sistema. Em ambiente interno, as únicas divisões com contacto direto com este tipo de sistema seriam a Divisão de Obras Particulares e Gestão Urbanística, o Atendimento ao Município (para emissão de plantas) e a Divisão de Planeamento, Ordenamento e Mobilidade. Com a implementação do projeto, e sobretudo com a consciencialização da facilidade de ler a informação geográfica, a estrutura municipal começou a perceber a importância do

desenvolvimento deste tipo de sistema e, em pouco tempo, com os recursos humanos da estrutura municipal, foi possível começar a enraizar métodos de trabalho para alimentar o SIG e, acima de tudo, para o implementar como ferramenta de trabalho diária. A implementação desta estrutura SIG no Município de Ílhavo reveste-se, na nossa opinião, de um carácter diferenciador pela sua abrangência, amplitude e rápida mudança associada. A finalidade deste trabalho não se centra num grupo específico de técnicos municipais, nem surgiu como resposta a uma necessidade única. A necessidade de reestruturar o SIG do Município de Ílhavo surgiu, efetivamente, de uma falha grave de acesso à informação, notada essencialmente, por parte do Executivo, mas responde, transversalmente, a toda a estrutura municipal, desde as equipas de jardinagem, passando pelas equipas de gestão de projetos, ou mesmo de atendimento ao Município. Tem um carácter tão abrangente, desde a sistematização e otimização das rotas de recolha de resíduos, identificação do património privado municipal, até à gestão de serviços a que a Ação Social presta apoio. Na estrutura municipal, é raro o técnico, trabalhador ou membro do executivo e dos seus gabinetes, que não tenha precisado, em algum momento, de recorrer a informação geográfica, ou a dados que possam ser disponibilizados através desta. Um Município com uma estrutura de Informação Geográfica sólida, é um Município mais operacional, mais ágil, melhor gerido e que vê os seus recursos serem utilizados de forma mais eficiente.

## **6 BIBLIOGRAFIA**

O presente artigo refere-se à implementação de um projeto de reformulação do Sistema de Informação Geográfica no Município de Ílhavo. Pretende descrever o processo de implementação, pelo que não foi utilizada qualquer bibliografia de referência, tendo apenas sido descrita a metodologia utilizada e os resultados obtidos, dentro da estrutura municipal.



## **ANALYSIS OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF RAIL AND ROAD FREIGHT TRANSPORT: A CASE STUDY IN PORTUGAL**

### **RESUMO**

O setor dos transportes representa cerca de 21% das emissões de CO<sub>2</sub> na Europa e 28% em Portugal. De acordo com o balanço energético nacional, o sector dos transportes é altamente dominado pelo transporte rodoviário e pela queima de combustíveis fósseis. Considerando o planeamento estratégico europeu e português para a descarbonização até 2050, é importante mudar para modos de transporte altamente eficientes (em MJ/km ou MJ/ton) e com baixas emissões de CO<sub>2</sub>.

No contexto português, nomeadamente para o transporte de mercadorias, o transporte ferroviário eletrificado pode ser uma solução para substituir o transporte rodoviário. Este artigo analisa a energia e as emissões de gases de efeito estufa associados aos modos de transporte de mercadorias ferroviário e rodoviário. Ao comparar viagens com origem e destino semelhantes (com cerca de 500 km) realizadas pelos dois modos de transporte, a nível macroscópico, foi possível avaliar o impacto energético e ambiental das atuais tecnologias de propulsão.

Resultados preliminares de duas viagens utilizadas como caso de estudo indicam que o transporte ferroviário de mercadorias tem potencial para reduzir até 4,4 toneladas de CO<sub>2</sub> e 53% no consumo de energia face ao transporte rodoviário de mercadorias. Contudo, tem a penalização de acrescentar mais uma hora ao tempo total de viagem.

**Palavras-chave:** Transporte ferroviário de mercadorias, Transporte rodoviário de mercadorias, Energia, Eficiência, Emissões de CO<sub>2</sub>.

### **ABSTRACT**

The transportation sector represents circa 21% of CO<sub>2</sub> emissions in Europe and 28% in Portugal. According to the national energy balance, the transportation sector is highly dominated by road transport and burning of fossil fuels. Considering the strategic European and Portuguese planning for decarbonization until 2050, it is important to shift to highly efficient transport modes (in MJ/km or MJ/ton), with low CO<sub>2</sub> emissions.

Within the Portuguese context, particularly for freight transport, electrified rail freight can be a solution to replace road freight. This paper analyses the energy and greenhouse gas emission of rail and road freight transport modes. By comparing trips with similar origin and destination (of circa 500 km) made by the two transport modes at a macroscopic level, it was possible to assess which was the least energy intensive and harmful for the environment using the current propulsion technologies.

Preliminary results for two case study trips indicate that rail freight has the potential to reduce up to 4,4 ton of CO<sub>2</sub> and 53% less energy consumption than a full road freight transport, although with a penalty of adding one more hour to the total trip time.

**Keywords:** Rail Freight, Road Freight, Energy, Efficiency, CO<sub>2</sub> emission.

## 1 INTRODUCTION

A reduction in greenhouse gas (GHG) emissions is necessary to prevent the rise of the global temperature above 1,5 °C compared with pre-industrial temperatures (MARTINICH et al., 2018). One of the most pollutant sectors is the transport sector, responsible for 24,6% of the total emissions on the European Union (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2023).

Towards reducing greenhouse gas emissions and achieve the objectives of the Paris agreement, the European Union and its Member States developed the European Green Deal roadmap, which sets the ambition to reach the carbon neutrality by 2050, representing a 90% reduction compared to 1990 values (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2023). One of the measures contributing to the decrease of GHG emissions is a shift to more sustainable transport modes, where rail freight is expected to have an increase in its activity by 50% until 2030 and 100% until 2050 (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2023).

Rail investment in Europe have stagnated over the last 20 years and within this time frame many countries have lost a significant share of distance in railroad, mostly shifted to road transport. This is of particular relevance for the road freight market, which has been increasing 1.6% per year over the last 20 years (reaching 1764.8 billion tonne-kilometres in 2019), compared to a growing of 0.7% in the same period for rail (reaching 407.9 billion tonne-kilometres in 2019) (EUROPEAN UNION, 2022). The European Union announced several investments in the rail network, to connect and boost the transport infrastructure between the member states by 2030 (EUROPEAN CLIMATE, 2022; INVESTIGATE EUROPE, 2021).

Rail freight appears as one of the solutions to contribute to reduce GHG emissions, particularly when compared with road freight, due to its higher energy efficiency: tank-to-wheel efficiency of an electric powertrain locomotive is around 76%; while the tank-to-wheel energy efficiency of a conventional internal combustion engine semi-truck varies between 42% to 46% (ANG-OLSON; SCHROEER, 2002; HOFFRICHTER et al., 2012; KOBAYASHI; PLOTKIN; RIBEIRO, 2009). Additionally, rail freight can use energy vectors that are associated to lower GHG emissions, such as electricity (although this depends on the production system), while road freight is still highly associated with fossil fuels.

Moreover, the rail freight also presents a lower energy use per ton.km of cargo hauled, since the rail has the capability to haul much larger quantities of cargo to one destination and its powertrain is more efficient than heavy-duty vehicles.

However, rail freight presents a great disadvantage that is the last mile delivery. Nowadays the rail infrastructure is not yet prepared to provide a door-to-door service between businesses and the inexistence of this kind of services creates a more appealing and easier logistics management towards the use of road freight.

Many new solutions were created to boost the use of the rail: two of the most interesting solutions are the Light Freight Railway (LFR) and the transport of trucks on a train. The LFR consists of a locomotive of a smaller dimension capable of transporting container cargo to the destination and in this case, the train is constituted by two locomotives one at each end of the train for easier movement. Also, the locomotives are capable of being attached to another locomotive, where this can be transported together with another cargo for a longer journey (PIETRZAK, 2016; PIETRZAK; PIETRZAK; MONTWIŁŁ, 2021). Another option could be the transport of a truck on a train, allowing to maintain the door-to-door service and the use of a more efficient and less pollutant transport for the biggest percentage of the journey. The loading of the truck on a train facilitates the logistic management by eliminating the time needed to switch the cargo from the truck to the train and eliminating the last mile issues. This has already been done in Central Europe areas, connecting several countries and areas (T2S, 2024), allowing for CO<sub>2</sub> emission reductions while limiting the truck mileage, as well as limiting the stops in non-Schengen countries (such as Switzerland).

Considering the potential of rail freight, the main objective of this paper is to compare the energy and environmental impacts of replacing road freight by rail freight in Portugal, in order to evaluate the energy and GHG outcomes versus the logistic time lost between the trans-shipment of the transport mode. This analysis is made numerically recurring to a macro analysis, adequate for long distance trips.

## **2 METHODOLOGY**

A literature review was made to identify and estimate functional parameters such as average energy consumption, tare vehicle weight, electrified railroads and circulation conditions for railroads, average circulation speed, average loaded capacity, among other parameters. This allows analysing long trips in a macroscopic approach, allowing to study several rail routes to be implemented in Portugal. Table I presents the parameters used on this study.

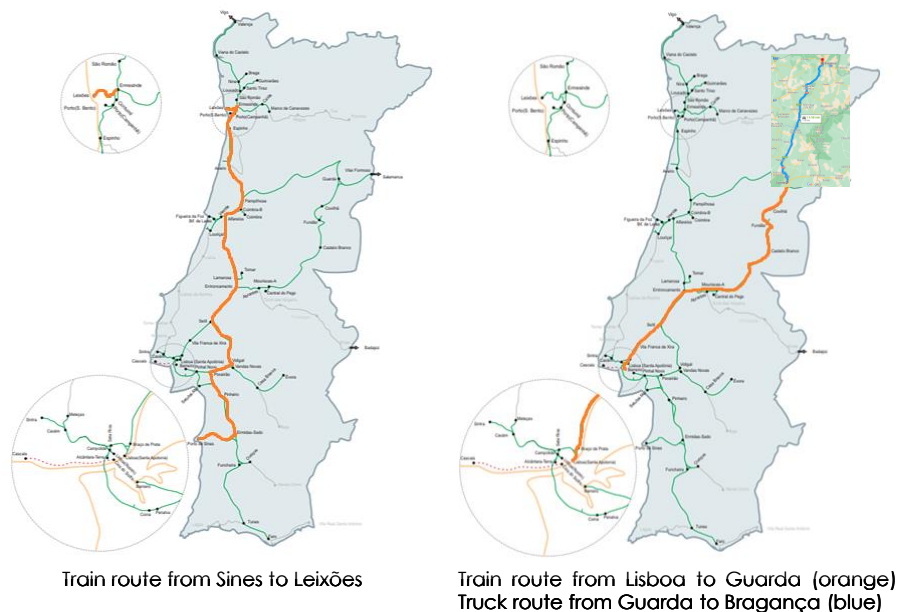
The routes selected include one where the rail transport can go from point to point without the intervention of the road transport and a second route where the intervention of road transport was necessary, due to lack of rail infrastructure.

**Table 1 – Parameters used for trains and trucks**

	Average Value Used
Train energy consumption	0,1989 MJ/ton.km
Truck energy consumption	1,6190 MJ/ton.km
Train CO <sub>2</sub> emission (electricity)	41,9 gCO <sub>2</sub> /MJ
Truck CO <sub>2</sub> emission	90 gCO <sub>2</sub> /MJ
Train Load	960 ton
Truck Load	30 ton
Average Train Speed	90 km/h
Average Truck Speed	90 km/h

The case study trip where the train can go from point to point, connects the two main maritime ports in Portugal (Sines-Leixões) and can be done exclusively by rail. A second case study considered a trip between Lisboa and Bragança, where the railroad infrastructure cannot reach the destination, being Guarda the closest point. This way, 175 km must be done by road freight between Guarda and Bragança. Figure 1 shows the 2 routes selected. Highlighted in orange are the parts performed by train (all trip for Sines-Leixões). Similarly, for Lisboa-Bragança, the orange route between Lisboa and Guarda is presented in orange, while the road freight between guarda and Bragança is highlighted in blue.

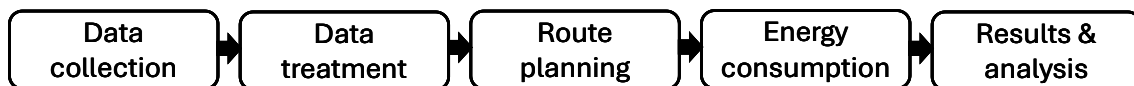
**Figure 1 – Case-studies: Sines-Leixões; and Lisboa-Bragança**



**Source:** Authors

Based on parameters such as the length of the routes for both road and rail transport, as well as the travel time and the cargo transported, it is possible to estimate the energy use and the respective CO<sub>2</sub> emissions, considering the propulsion system and the electric energy production. Figure 2 generically presents the methodology used in this work. Data collection was obtained from several literature sources regarding transport modes energy use and CO<sub>2</sub> emissions; Data treatment and route planning consisted of defining the suitable routes for truck and train based on existing infrastructure; energy consumption is described below.

**Figure 2 – Methodological algorithm**



**Source:** Authors

The average energy consumption of the vehicles is calculated according to (1).

$$E = C_e \times d \times p \quad (1)$$

where,

- E = energy consumption (MJ);
- C<sub>e</sub> = specific energy consumption (MJ/ton.km);
- d = distance travelled (km);
- p = cargo transported (ton).

The emissions produced during the journey depend on the amount of energy consumed, therefore a specific emission factor according to the transport mode used is applied to obtain the total CO<sub>2</sub> emitted to the atmosphere, following (2).

$$E_{CO_2} = E \times F_e \quad (2)$$

where,

- E<sub>CO<sub>2</sub></sub> = CO<sub>2</sub> emission (g);
- E = energy consumption (MJ);
- F<sub>e</sub> = emission factor (gCO<sub>2</sub>/MJ);

The time expended on the journey is calculated by the length of the route taken and the average speed of the vehicle, according to (3). It should be noted that cargo loading and unloading time was not considered.

$$T_f = \frac{d}{v} \quad (3)$$

where,

- T<sub>f</sub> = trip duration (h);
- d = distance travelled (km);
- v = average speed (km/h);

It is important to underline that the macroscopic approach used includes some limitations, particularly, not using specific data (such as

instantaneous speed, road grade, etc) for the trips considered. Therefore, the results of energy consumption and emissions are an estimate based on a large sample of data and not the exact value used by the vehicles.

### **3 RESULTS**

#### **3.1 Sines-Leixões case study**

For the first case study, Sines-Leixões, the train travels a distance of 544 km at an average speed of 90 km/h, using 6 hours to arrive to its destination. The total weight of the train plus the cargo is 1408 tons, representing a total energy consumption of 152500 MJ and the emission of CO<sub>2</sub> of 6900 kg.

The same journey made by a truck would travel a distance of 441 km, at an average speed of 90 km/h, using circa 5 hours to complete. The total weight of the semi-truck (10 ton) plus the cargo is the 40 tons establish by law, representing an energy consumption of 26500 MJ and a CO<sub>2</sub> emission of 450 kg. To transport the same amount of cargo, there would be necessary 32 trucks and about 5,5 times more energy than the train, emitting 2 times more CO<sub>2</sub> to the atmosphere.

#### **3.2 Lisboa-Bragança case study**

For the second case study, Lisboa-Bragança, the train travels a distance of 346 km, taking 4 hours to arrive to the intermediate point, Guarda. The total weight of the train plus the cargo is 1408 tons, leading to a total energy consumption of 97000 MJ and a CO<sub>2</sub> emission of 4400 kg. The rest of the journey would be done by truck. To carry the total load on the train it would be necessary that 32 trucks travel an additional 175 km, adding 2 hours and 30 minutes to the journey, consuming 10500 MJ per truck and a total of 336000 MJ of energy and emitting 5700 kg of CO<sub>2</sub>. The total energy consumption for the train journey is 433000 MJ, emitting 10100 kg of CO<sub>2</sub>.

The same journey fully done by a truck leads to a lower distance (484 km) and takes about 6 hours to complete. In this case, the energy use is 29000 MJ and 500 kg of CO<sub>2</sub> are emitted. To transport the same amount of cargo of the train would be needed 32 trucks and about 2,1 times more energy than the train and would be emitted to the atmosphere 1,6 times more CO<sub>2</sub>.

#### **3.3 Discussion**

Table 2 presents a summary of the total energy consumed and CO<sub>2</sub> emissions in both case studies. It becomes evident that road freight has a significant impact in energy use. For Sines-Leixões, where direct trade between road freight to rail freight is possible, a reduction of 82% energy use can be achieved. Similarly, a reduction of 52% on CO<sub>2</sub> emission could also be obtained, considering the transport of 960 ton of cargo.

For Lisboa-Bragança, a reduction on the energy use is lower (up to 53%) due to the impact of road transport between Guarda and Bragança, due



to lack of rail infrastructure. Nonetheless, it is still possible to save 37% in CO<sub>2</sub> emissions.

The trip time in rail freight in both case studies increases one additional hour compared to road freight. However, for non-perishable, non-urgent cargo, the energy and emission savings can overcome the additional trip time.

**Table 2 – Transport mode comparison**

Route	Energy consumption (MJ)	CO2 Emission (kg)	Time (h)
Sines – Leixões (Train)	152500	6900	6
Sines – Leixões (Truck)	848000	14400	5
% difference (truck as basis)	-82.0%	-52.1%	20%
Lisboa – Bragança (Train+Truck)	433000	10100	6,5
Lisboa – Bragança (Truck)	928000	16000	6
% difference (truck as basis)	-53.3%	-36.8%	8.3%

#### 4 CONCLUSIONS

An investment in new routes and electrification of the existing rail infrastructure for train freight will help reduce the gap between train and truck use. If the train freight is able to get closer to the end destination and the main channels of freight distribution are covered, it could represent a significant amount of energy and CO<sub>2</sub> emissions savings per journey and per year. The case-studies presented show that the impact of using road transport is very significant, therefore results show that rail infrastructure could be particularly important to connect logistic hubs (such as seaports), where large volumes of cargo are transported.

As presented, a shift in transport mode can provide a significant step towards the greenhouse gas reduction plans in European Union, indicating that a more sustainable transport sector can start without the need of introducing new technologies.

Future work includes better assessment of infrastructure aspects such as topography, due to its impacts on energy use and emissions, as well as perform a country analysis of the existing rail infrastructure and location of major logistic hubs and analyse further planned expansions of rail infrastructure.

## REFERENCES

ANG-OLSON, J.; SCHROEER, W. Energy Efficiency Strategies for Freight Trucking: Potential Impact on Fuel Use and Greenhouse Gas Emissions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1815, n. 1, p. 11–18, 1 jan. 2002.

EUROPEAN CLIMATE, I. AND E. E. A. Transport infrastructure: EU invests EUR 5.4 billion to support key projects across the continent. Disponível em: <[https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/transport-infrastructure-eu-invests-eur-54-billion-support-key-projects-across-continent-2022-06-29\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/transport-infrastructure-eu-invests-eur-54-billion-support-key-projects-across-continent-2022-06-29_en)>. Acesso em: 11 set. 2024.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Rail and waterborne : best for low-carbon motorised transport. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport/rail-and-waterborne-best/#notes>>. Acesso em: 11 set. 2024.

EUROPEAN UNION. EU Transport in figures - Statistical Pocketbook 2022. [s.l: s.n.].

HOFFRICHTER, A. et al. Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 17, n. 1, p. 28–34, jan. 2012.

INVESTIGATE EUROPE. Data Analysis: Trains remain underfunded in Europe. Disponível em: <<https://www.investigate-europe.eu/en/posts/despite-public-support-for-rail-trains-remain-underfunded-in-europe>>. Acesso em: 11 set. 2024.

KOBAYASHI, S.; PLOTKIN, S.; RIBEIRO, S. K. Energy efficiency technologies for road vehicles. *Energy Efficiency*, v. 2, n. 2, p. 125–137, 6 maio 2009.

MARTINICH, J. et al. Chapter 29 : Mitigation: Avoiding and Reducing Long-term Risks. Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: The Fourth National Climate Assessment, Volume II. Washington, DC: [s.n.].

PIETRZAK, K. Analysis of the Possibilities of Using “Light Freight Railway” for the Freight Transport Implementation in Agglomeration Areas (Example of West Pomerania Province). *Transportation Research Procedia*, v. 16, p. 464–472, 2016.

PIETRZAK, K.; PIETRZAK, O.; MONTWIŁŁ, A. Light Freight Railway (LFR) as an innovative solution for Sustainable Urban Freight Transport. *Sustainable Cities and Society*, v. 66, p. 102663, mar. 2021.

T2S. Road-rail. Disponível em: <<https://www.t2s.com/EN/roadrail.html>>. Acesso em: 21 out. 2024.



## VARIAÇÃO DO VOLUME ÚTIL EM UMA BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ESGOTO FECAL

SILVA, ADIVÂNIA (1); CARRILLO, ADRIANA (2); SCALIZE, VINICIUS (3);  
LAMARRE, KERVENS (4); RUGGERI JUNIOR, HUMBERTO (5); ALBUQUERQUE,  
ANTONIO (6); SCALIZE, PAULO (7)

(1) Universidade Federal de Goiás, E-mail: [adivaniaeng@gmail.com](mailto:adivaniaeng@gmail.com)

(2) Universidade Federal de Goiás, E-mail: [adrianadcarrillo@gmail.com](mailto:adrianadcarrillo@gmail.com)

(3) Universidade Federal de Goiás, E-mail: [vinicius.scalize@discente.ufg.br](mailto:vinicius.scalize@discente.ufg.br)

(4) Universidade Federal de Goiás, E-mail: [kervenslamarre83@gmail.com](mailto:kervenslamarre83@gmail.com)

(5) Universidade Federal de Goiás, E-mail: [hcruggeri@ufg.br](mailto:hcruggeri@ufg.br)

(6) GeoBioTec, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura,  
Universidade da Beira Interior, E-mail: [antonio.albuquerque@ubi.pt](mailto:antonio.albuquerque@ubi.pt)

(7) Universidade Federal de Goiás, E-mail: [pscalize.ufg@gmail.com](mailto:pscalize.ufg@gmail.com)

### RESUMO

O objetivo do estudo foi determinar os índices de volumes de vazios ( $I_v$ ) existentes nos materiais utilizados no enchimento de uma Bacia de Evapotranspiração (BET) em operação. Assim, determinou-se o volume ocupado pelos componentes da BET: pneu, tijolo, brita e areia, assim como o volume ocupado pela água, através de ensaio de coluna e verificações *in loco* por 30 dias (19/junho a 19/julho de 2024), período de seca, em uma BET que recebe exclusivamente esgoto fecal de uma residência localizada na Comunidade Quilombola dos Almeidas (Silvânia, Goiás, Brasil). Os índices encontrados, resultaram em: pneu (0,90), tijolo (0,788), brita (0,548) e areia (0,033). O monitoramento em campo da BET reportou um volume mínimo de 3.180 m<sup>3</sup> e 0,52 m de nível diário de esgoto, e um volume máximo de 3.516 m<sup>3</sup> e 0,63 m, atingindo 99,5 % do seu volume útil (3.516/3.533). É possível inferir que os volumes de vazios influem diretamente na capacidade volumétrica da composição das camadas da BET, sendo um parâmetro importante a considerar na escolha dos materiais e na tomada de decisão durante a concepção do projeto, e em função do volume de esgoto para o tratamento. Recomenda-se mais pesquisas e monitoramento em períodos longos, pois nessa temática há poucas publicações científicas. A BET é uma tecnologia social baseada na natureza (SbN) que pode contribuir para a ampliação do saneamento básico em áreas rurais, a fim de garantir

melhor qualidade de vida e dignidade para populações desprovidas dessa política pública.

**Palavras-chave:** BET, descarga zero, saneamento básico, tratamento de esgoto, sistema baseado na natureza.

## ABSTRACT

*The objective of the study was to determine the void volume indices (Iv) present in the materials used to fill an Evapotranspiration Basin (BET) in operation. Thus, the volume occupied by the BET components—tire, brick, gravel, and sand—as well as the volume occupied by water, was determined through column testing and in situ verifications over 30 days (June 19 to July 19, 2024), a dry period, in a BET that exclusively receives fecal sewage from a residence located in the Quilombola Community of Almeidas (Silvânia, Goiás, Brazil). The indices found were as follows: tire (0.90), brick (0.788), gravel (0.548), and sand (0.033). Field monitoring of the BET reported a minimum volume of 3,180 m<sup>3</sup> and a daily sewage level of 0.52 m, and a maximum volume of 3,516 m<sup>3</sup> and a level of 0.63 m, reaching 99.5% of its usable volume (3,516/3,533). It is possible to infer that the void volumes directly influence the volumetric capacity of the BET layer composition, being an important parameter to consider when selecting materials and making decisions during project design, considering the sewage volume for treatment. Further research and long-term monitoring are recommended, as there are few scientific publications on this topic. BET is a nature-based social technology (NbS) that can contribute to expanding basic sanitation in rural areas, ensuring a better quality of life and dignity for populations deprived of this public policy.*

**Keywords:** Evapotranspiration basin, zero discharge, basic sanitation, wastewater treatment, nature based solutions.

## 1 INTRODUÇÃO

Soluções sustentáveis para o esgotamento sanitário, considerando a fácil implementação, operação e com custo acessível, é fundamental para a sua aceitação. No Brasil e no mundo, as áreas rurais apresentam um maior déficit de atendimento, sendo comum o esgoto sanitário ser lançado *in natura* no solo ou ainda disposto em fossas rudimentares (ANDERSSON *et al.* 2020).

A universalização dos serviços de saneamento básico é um desafio mundial, mas faz-se necessário para garantir condições sanitárias e

socioambientais propícias ao bem-estar humano e melhorar a qualidade e continuidade da vida (UNICEF 2021).

Nesse cenário, tecnologias sociais para o tratamento de esgoto fecal utilizando processos naturais e abordagens eficientes, como propõem as soluções baseadas na natureza (SbN), podem ser consideradas na ampliação do saneamento básico em sistemas descentralizados (CROSS *et al.* 2021), de forma a garantir atendimento a populações dispersas.

Assim, SbN como bacias de evapotranspiração (também chamadas de tanques/leitos, e originalmente “fossa séptica Watson Wick”), wetlands construídas (também designadas por leitos de macrófitas), dentre outras, são alternativas para a gestão de águas residuárias (REIS *et al.* 2023a; MIWORNUNYUIE *et al.* 2024), principalmente no atual contexto de adaptação às mudanças climáticas que exige maiores esforços para a preservação dos recursos ambientais.

Na concepção de uma tecnologia social para a destinação final do esgoto doméstico como uma bacia de evapotranspiração (BET), em termos de aspectos construtivos, é importante o seu adequado dimensionamento, de modo a evitar: i) o sub ou superdimensionamento; ii) sub ou superestimar um determinado parâmetro de projeto; e iii) o inadequado funcionamento da solução.

Uma BET pode ser construída de diferentes formas e materiais com dimensões variados, além de possibilitar o plantio de diversos cultivares. Em relação aos materiais, em geral, utilizam-se àqueles que são passíveis de reutilização e/ou reciclagem, ou que simplesmente seriam descartados sem critério algum no meio ambiente, como por exemplo: materiais cerâmicos (azulejos, contrapiso); pneus usados; cascalho grosso (PAULO *et al.* 2019); areia; brita; fragmentos de telhas (REIS *et al.* 2023b); resíduos de construção ou demolição (entulhos); pedras; tijolo furado (MACHADO *et al.* 2018), além de uma cobertura de solo para o cultivo de plantas, comestíveis ou não.

No plantio, é comum cultivar espécies de rápido crescimento e com grande demanda hídrica (amplo sistema foliar, principalmente) para promover alta taxa de evapotranspiração. Dessa forma, utilizam-se plantas comestíveis como bananeiras, taiobas (PAULO *et al.* 2013), mamoeiros (FIGUEIREDO *et al.* 2019), e plantas ornamentais como a *Canna*, *Beri* (PAULO *et al.* 2019).

Como as BET estão sendo construídas em vários locais (COELHO, REINHARDT, ARAÚJO 2018; PAULO *et al.* 2019; FIGUEIREDO *et al.* 2019), é necessário e indispensável um monitoramento da sua operação para permitir perceber como funcionam em diferentes condições climáticas e de descarga, bem como para a obtenção de dados de projeto. No entanto, ainda são poucos os trabalhos disponíveis na literatura científica, limitando as possibilidades de comparações e otimização de critérios de desempenho do sistema.

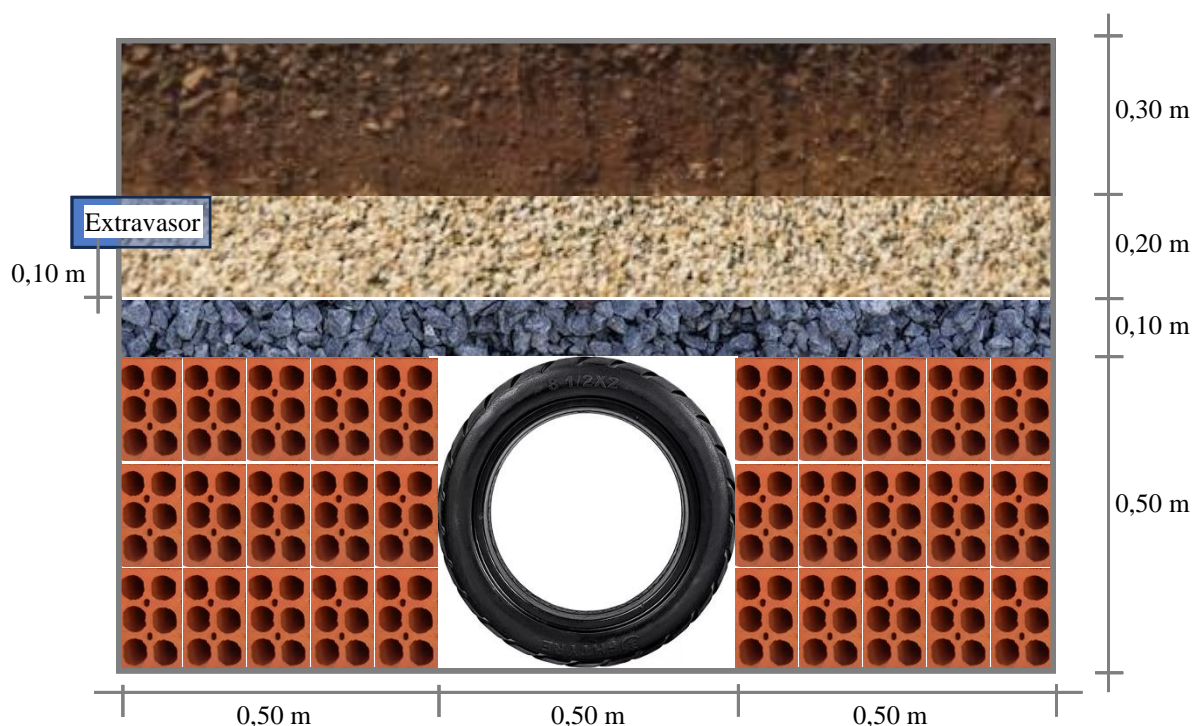
Nesse contexto, um dos aspectos críticos para a otimização das BET é a determinação do volume de esgoto condizente com a realidade, levando em consideração o volume dos materiais e seus vazios. Estes dados são fundamentais para calcular as variações volumétricas dentro da bacia e, conseqüentemente, as taxas de evapotranspiração, o que impacta diretamente o seu adequado dimensionamento.

Conhecer a porcentagem de espaços vazios existentes em uma BET, durante a sua operação, é essencial para a determinação da taxa de evapotranspiração. Assim, o objetivo do presente trabalho foi determinar os índices de volumes de vazios existentes nos materiais utilizados no enchimento de uma BET e determinar o volume útil de um sistema em operação.

## 2 MATERIAIS E MÉTODO

A determinação do índice de vazios ( $I_v$ ), ou seja, o volume ocupado pela água, foi realizada para os seguintes materiais que são comuns no preenchimento de BET (Figura 1): tijolo cerâmico com 6 furos, pneu de aro 15, brita n. 1 e areia grossa. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análises de Águas (LANA), da Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Brasil.

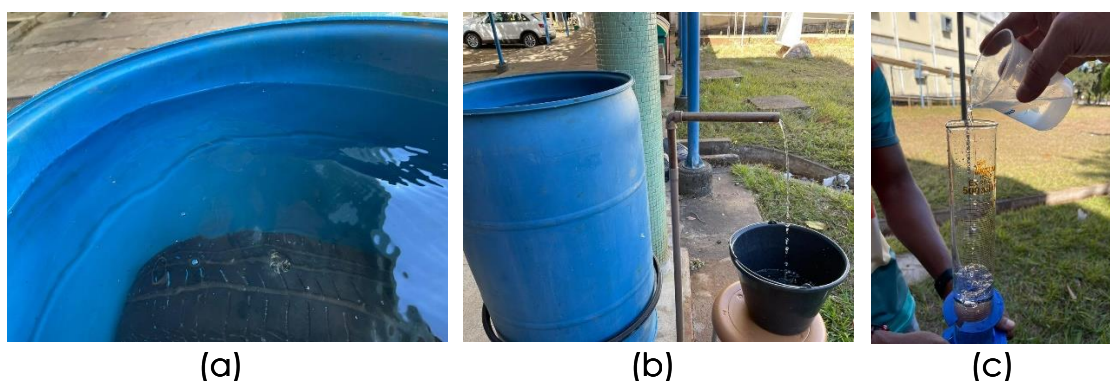
**Figura 1 – Esquema da seção transversal e composição do leito da BET utilizada no estudo**



## 2.1 Determinação do volume ocupado pelos pneus aro 15

Para a determinação do volume ocupado, foram utilizados dois pneus de aro 15, inseridos um de cada vez no interior de um recipiente, na qual foi medido o volume deslocado por meio de uma proveta graduada de 500 ml (Figura 2). Seguidamente, foi estimada a média do volume deslocado.

**Figura 2 – Determinação do volume ocupado pelos pneus, submerso no recipiente (a), volume de água deslocado (b) e medido (c).**



Fonte: Autores.

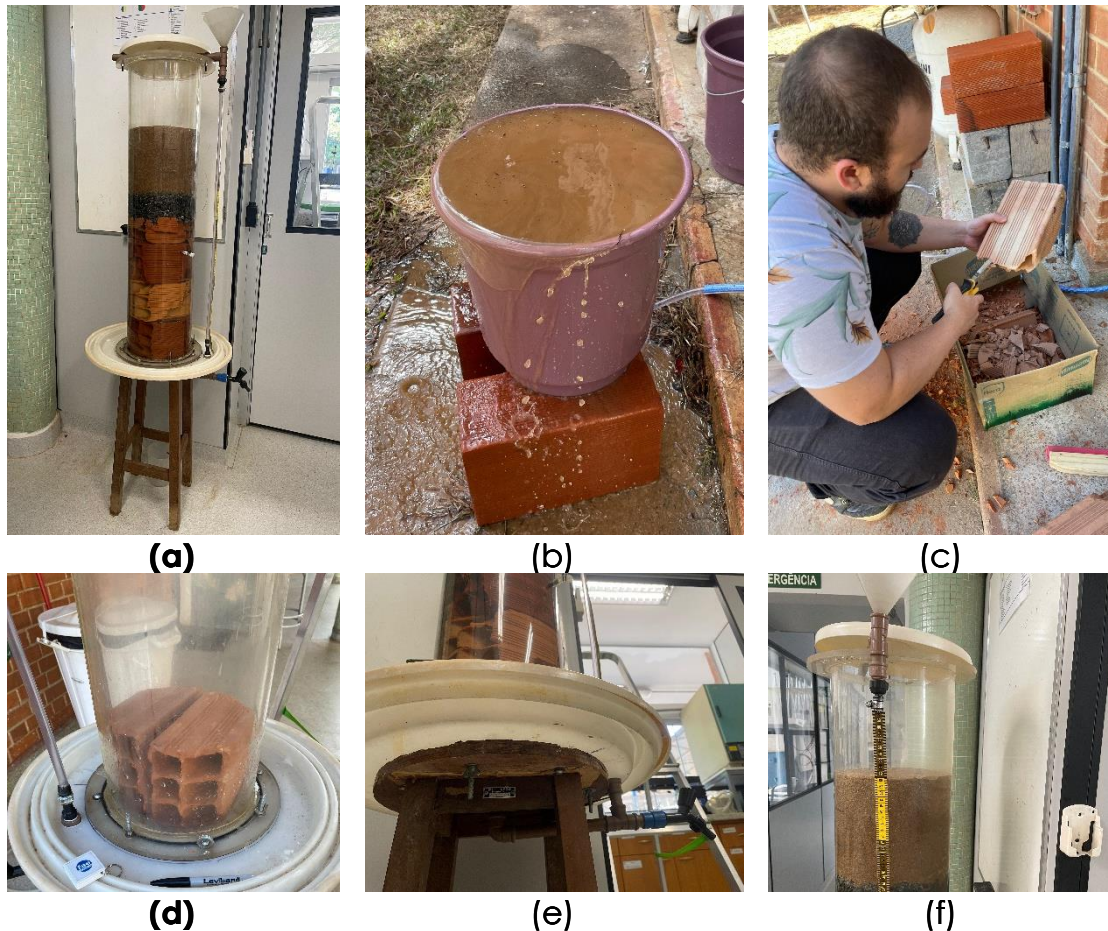
## 2.2 Determinação do volume ocupado pelo tijolo, brita e areia

Para a determinação do volume ocupado pelo tijolo cerâmico de 6 furos, brita n. 1 e areia grossa, utilizou-se uma coluna em acrílico (altura útil = 1,0 m; diâmetro = 0,23 m), preenchida com o referido material nas seguintes proporções: tijolo = 0,50 m, brita n. 1 = 0,10 m e areia grossa = 0,20 m. Para a introdução de água utilizou-se uma mangueira de nível externa à coluna (Figura 3a).

A areia e a brita foram lavadas previamente (Figura 3b) e os tijolos foram moldados conforme o espaço a ser ocupado dentro da coluna (Figura 3c e Figura 3d). A mangueira de nível (diâmetro = 7 mm), foi instalada desde a base até a superfície da coluna, contando com uma torneira para retirada da água (Figura 3e). Ao lado da mangueira foi instalada uma fita métrica para a medição do nível (Figura 3f).

Inicialmente, a coluna foi alimentada com água, inserida na mangueira de nível, com auxílio de um funil. Permaneceu em repouso por 24 h e o volume foi preenchido com água até o nível de 0,80 m. Os ensaios foram realizados, retirando e inserindo volumes conhecidos de água em intervalos de 30 minutos até o nível constante entre duas leituras. Os valores foram anotados e utilizados para a determinação do volume ocupado pelos materiais.

**Figura 3 – Coluna em acrílico (a) utilizada para determinação do volume ocupado pelos tijolos, brita n. 1 e areia grossa, contando com lavagem prévia da areia grossa (b), moldagem dos tijolos (c) e (d), e instalação de mangueira de nível (e) e fita métrica (f).**



### 2.3 Determinação do volume ocupado pela água no interior da coluna

A determinação do volume ocupado pela água no interior da coluna, representando o  $I_v$ , foi realizada utilizando a Equação 1.

$$I_v = \frac{V_a}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} (h_2 - h_1)}$$

Equação 1

Onde:  $I_v$  = Índice de vazios;  $V_a$  = volume de água adicionado ou retirado (L);  $D$  = diâmetro da coluna ( $D = 0,23$  m);  $h_1$  = corresponde ao nível de água antes da adição ou retirada do volume a ser analisado, e  $h_2$  = refere-se à altura deslocada após ser adicionado ou retirado diferentes

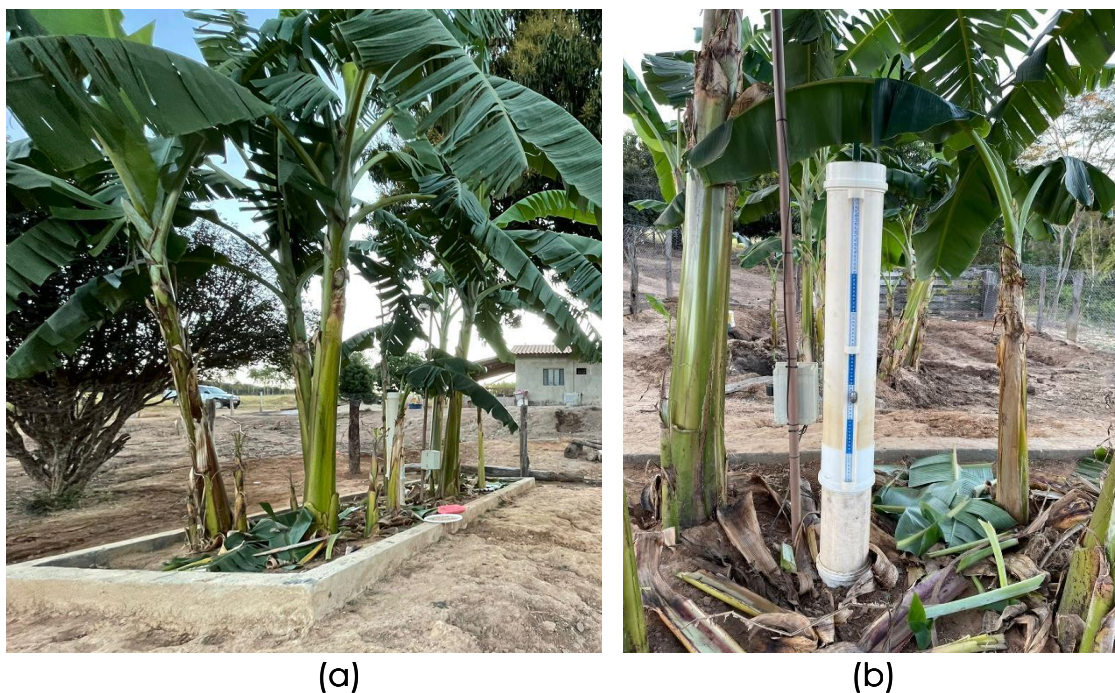


volumes de água. Obs.: o volume ocupado por água na mangueira do nível foi desprezado.

## 2.4 Aplicação numa BET

Utilizou-se os índices de vazios obtidos para determinar o volume de esgoto existente no interior de uma BET (Figura 4a) durante 30 dias, em operação desde dezembro de 2023, a qual recebe exclusivamente esgoto fecal de uma residência com sete habitantes, localizada na Comunidade Quilombola dos Almeidas, em Silvânia – Goiás (Brasil). O município de Silvânia está inserido no Bioma Cerrado (savana típica), com temperatura média de 20 – 22 °C (Alvares *et al.* 2013) e precipitação média de 1.529 mm (COSTA *et al.* 2012).

**Figura 4 – Bacia de Evapotranspiração (a), com detalhamento do nível (b), utilizado para determinar o volume de esgoto**



O clima é classificado com Aw de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), sendo tropical úmido com sazonalidade de abril a setembro (estação seca) e outubro a março (estação chuvosa) (BERGAMINI *et al.* 2017).

Almeidas é um tipo de comunidade rural remanescente de quilombos e certificada pela Fundação Cultural Palmares (FCP 2019), e, segundo Brasil (2003), caracteriza-se como grupos étnico-raciais que possuem trajetória histórica própria, dotados de relações específicas, com presunção de ancestralidade negra associada à resistência à opressão histórica sofrida.

A BET construída em Almeidas apresenta as seguintes dimensões (Figura 4a): largura = 1,50 m; comprimento = 5,0 m; Altura útil = 1,10 m. O seu interior (material de enchimento) foi composto por uma camada de 0,50 m de tijolo cerâmico com pneu ao centro, sobreposta pelas camadas de brita (0,1 m), areia (0,2 m) e solo (0,3 m) e plantio de bananeiras (*Musa spp.*). O volume de água no interior da BET foi monitorado por um nível, composto por boia, roldana e peso (Figura 4b).

A determinação do volume total de esgoto na BET foi realizada pela soma do volume de esgoto ocupado em cada camada. O volume em cada camada foi determinado multiplicando-se a área da BET pelo nível de esgoto na camada e seu respectivo índice de vazios.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Volume ocupado pelos pneus

Ao inserir o primeiro pneu dentro do recipiente contendo água, o volume deslocado de água foi de 4,85 L, e o segundo de 5,15 L, resultando em uma média de 5,0 L. Assim, em uma BET, aproximadamente 25 pneus,  $0,125 \text{ m}^3$  ( $25 \times 5,0 \text{ L}$ ), ocupam um espaço com as dimensões de  $0,50 \times 0,50 \times 5,0$ , totalizando um volume de  $1,25 \text{ m}^3$ . O volume ocupado pelo pneu será, então, de 10%, resultando em um volume de 90% que poderá ser ocupado pela água. Assim, o índice de vazios do pneu ( $IV_P$ ) é 0,90.

#### 3.2 Determinação do volume ocupado pelo tijolo, brita e areia

O ensaio em coluna foi realizado para a brita n.1, areia grossa e tijolo de 6 furos, sendo uma vez com a água subindo e outra com a água descendo. Os resultados estão apresentados na Tabela 1. O índice de vazios na brita n.1 ( $IV_B$ ) e na areia grossa ( $IV_A$ ), foram respectivamente 0,548 e 0,033 (Tabela 1).

Os índices de vazios encontrados para as diferentes camadas de agregados: graúdo, brita (NBR 16916, 2021a); miúdo, areia (NBR 16917, 2021b), apresentando valores de 0,46 a 0,63 ( $IV_B$ ) e de 0,01 a 0,17 ( $IV_A$ ), implicam uma maior e menor capacidade de armazenamento de efluente na BET, respectivamente. Neste caso, considerando os valores médios, a brita ( $IV_{B \text{ Médio}} = 0,548$ ) tem 94% a mais de capacidade volumétrica em comparação com a camada de areia ( $IV_{A \text{ Médio}} = 0,033$ ). Segundo Carasek *et al.* (2016), a forma dos grãos de areia é um parâmetro significativo no resultado do volume de vazios. A areia (mistura de fina e grossa), como solo arenoso, apresenta índice de vazios de 0,20 (mínimo) a 0,95 (máximo) (FERNANDES 2016), sendo uma faixa de valores superiores ao maior valor encontrado para a areia usada na BET no presente estudo ( $IV_{A \text{ Máx.}} = 0,17$ ).

**Tabela 1 – Índice de vazios obtido para cada camada de material no ensaio em coluna**

Material	Nível (cm)	Altura (h) (cm)	Volume adicionado (L)	Volume retirado (L)	Volume total = Área x h (L)	índice de vazios (IV)
Brita n. 1	51,05	2,40	0,5		0,99714	0,50
	53,45	1,85	0,5		0,76863	0,65
	55,30	1,85	0,5		0,78940	0,63
	57,20	6,15	1,5		2,55518	<b>0,59</b>
	50,00	2,49		0,5	1,03453	0,48
	52,45			0,5	0,81018	0,62
	54,40			0,5	1,08024	0,46
	57,00			1,5	2,90833	<b>0,52</b>
<b>IV<sub>B</sub> Médio</b>						<b>0,548</b>
Areia grossa	57,00	5,40	0,1		2,24357	0,04
	62,40	4,40	0,1		1,82809	0,05
	66,80	12,20	0,1		5,06880	0,02
	79,00	22,00	0,3		9,14046	0,03
	57,00	1,45		0,1	0,60244	0,17
	58,45	2,35		0,1	0,97637	0,10
	60,80	18,20		0,1	7,56166	0,01
	79,00	22,00		0,3	9,14046	0,03
<b>IV<sub>A</sub> Médio</b>						<b>0,033</b>
Tijolo	10,9			3,0		0,75
	20,5			3,0		0,76
	30,0			3,5		0,85
	39,9			9,5		0,788
<b>IV<sub>T</sub> Médio</b>						<b>0,788</b>

### 3.3 Determinação do volume ocupado pelo tijolo e pneu na BET

A camada com altura de 0,50 m composto por tijolo e pneu, apresenta a proporção de 2x1, visto que temos duas bases de 0,50 m para o tijolo e uma base de 0,50 m para o pneu (Figura 1). Assim, o índice de vazios (IV<sub>TP</sub>) nesta camada é:  $IV_{TP} = (2 \times 0,788 + 1 \times 0,90) \div 3 = 0,826$ .

### 3.4 Determinação do volume de esgoto no interior da BET

Uma BET construída conforme a apresentada na Figura 1 e constituída pelo mesmo material, terá um índice de vazios de 0,673 ( $\Sigma(iv \times h) \div \Sigma h_{total}$ ) (Tabela 2), implicando em uma capacidade volumétrica de 3.532 L.

**Tabela 2 – Índice de vazios e volume de esgoto ocupado em uma BET**

Camada	Índice de vazios ( $I_v$ )	Altura da camada - h (m)	$I_v \times h$	Área da BET ( $m^2$ )	Volume da BET ( $m^3$ )	Volume de vazios ( $m^3$ )
Tijolo + pneu	0,826	0,5	0,413	7,5	3,75	3,098
Brita n. 1	0,548	0,1	0,054	7,5	0,75	0,411
Areia grossa	0,033	0,1(*)	0,003	7,5	0,75	0,025
Total	0,673	0,700	0,4711	7,5	5,25	3,533

**Nota:** considerou-se altura útil da areia grossa até a base do extravasor = (\*).

O volume de esgoto ocupado no interior da BET, representa um *per capita* de 504,7 L/hab. ( $3.533 \div 7$ ), cujo valor é próximo ao encontrado por Paulo *et al.* (2019) de 616,5 L/hab., referente a uma BET de 4  $m^2$  ( $2 \times 2 \times 1 m^3$ ) e volume útil de 1.233 L, projetada para dois habitantes. No entanto, esses valores são superiores aos 42 L/hab., estimados por Coelho, Reinhardt e Araújo (2018), para um sistema de 3  $m^2$  ( $3 \times 2 \times 1 m^3$ ), e volume útil de 210 L, objetivando atender uma família com cinco pessoas. Coelho e colaboradores utilizaram como referência o consumo *per capita* de água local de 40 L/hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>, e coeficiente de retorno de 0,8 para a geração de esgoto fecal.

A capacidade volumétrica da BET, pode resultar em valores maiores ou menores de evapotranspiração, em comparação aos volumes de vazios de outros autores, 1.233 L (Paulo *et al.* 2019) e 210 L (COELHO, REINHARDT, ARAÚJO 2018).

Os diferentes valores de volume útil das BET apresentadas na literatura, pode ser devido ao tipo de construção e escolha dos materiais para composição das camadas do sistema, influenciado pelo índice de vazios e, conseqüentemente, na capacidade total de armazenamento de efluente.

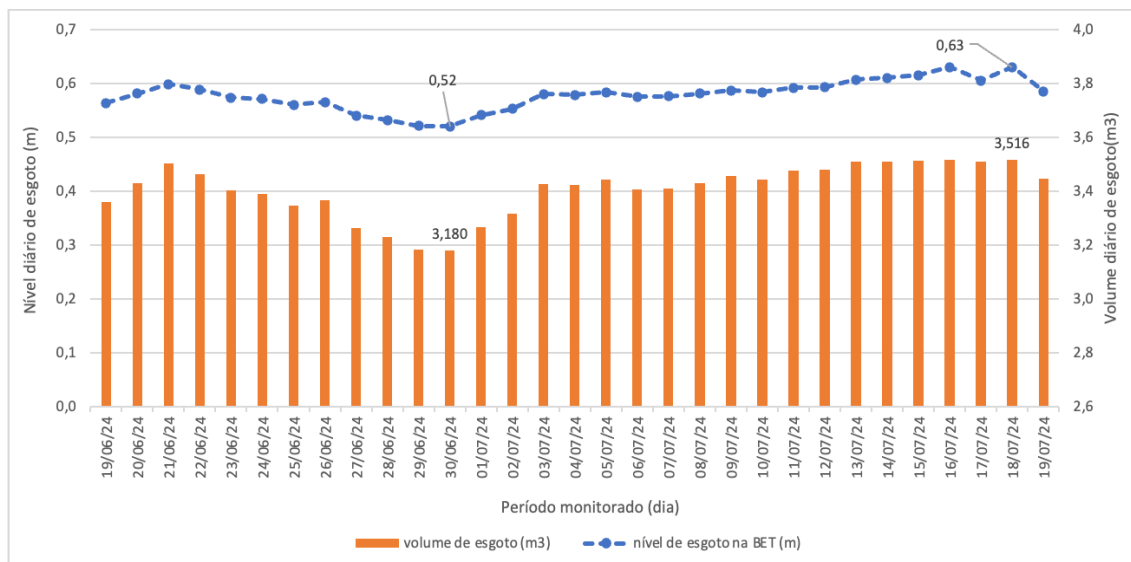
A BET analisada por Paulo *et al.* (2019) representaria volume útil de 48,5% do volume útil da BET deste estudo, se ambos os sistemas apresentassem as mesmas composições em termos de materiais de enchimento. No entanto, os autores utilizaram azulejos em vez de tijolos furados na camada lateral da câmara anaeróbica. A camada de azulejo apresenta menos espaços vazios em comparação ao tijolo de 6 furos utilizado na BET deste estudo.

### 3.5 Aplicação prática – estudo de caso

O nível e volume de esgoto no interior variou ao longo dos 30 dias de monitoramento, tendo, na maioria do tempo, ficado entre 0,52 m e 0,60 m, ou seja, ocupado toda a primeira camada (tijolo + pneu), e variado na camada de brita. Para os valores superiores a 0,60 m, o esgoto passou a ocupar também a areia grossa. Assim, utilizando os índices de vazios

determinados neste estudo, o volume ocupado pelo esgoto, no período analisado, variou de 3.180 a 3.516 m<sup>3</sup> (Figura 4).

**Figura 4 – Variação do nível e volume de esgoto no interior da BET**



A BET de Almeidas tem capacidade volumétrica de 3.533 L, determinado em função do índice de vazios total ( $I_v = 0,673$ ), sendo que apenas 50% da altura da camada de areia tem capacidade de armazenamento, devido a base do extravasor estar localizada a 70 cm da sua laje de fundo. Assim, quando a BET atingiu o seu maior nível de esgoto no período de estudo (0,63 m), ocupando 99,5% do seu volume útil, se a composição do leito ocupado por tijolo tivesse sido de entulho ou material similar, com menor índice de vazios, poderia ter havido extravasamento do sistema.

Assim, o conhecimento do índice de vazios é um indicador importante da capacidade volumétrica do sistema, sendo fundamental para a estimativa do balanço hídrico. No estudo de caso em questão, considerando o monitoramento da entrada de esgoto e variação do nível, parte da água é absorvida pelo sistema, através de evaporação do solo e/ou transpirados pelas plantas, ou mesmo ter retido na própria vegetação e no solo.

#### 4 CONCLUSÕES

O trabalho permitiu concluir que a determinação do índice de vazios em diferentes camadas de materiais utilizados (tijolo + pneu, brita, areia) na BET, leva a capacidades volumétricas distintas, principalmente quando ocorre encharcamento da camada.

A escolha do material de enchimento e a determinação dos espaços vazios é de fundamental importância para a obtenção de uma boa taxa

de evapotranspiração. A utilização de índices de vazios mais próximo do real reduz o sub ou superdimensionamento.

A utilização de tijolo na base da BET, sobre a laje, permite maior capacidade de volume de esgoto em comparação com outros materiais, como azulejos, reportados em estudos similares, por causa da diferença no volume de vazios de cada material.

Os índices de vazios determinados e aplicados no estudo de caso no presente estudo, apresentaram valores próximos às estimativas de índice de vazios e volume ocupado, demonstrados na literatura.

## 5 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se: i) monitoramento em períodos mais longos dos sistemas em diferentes sazonalidades. O período de seca ou de chuva da região pode influir na variação da evapotranspiração e do volume da BET; ii) caracterizar diferentes materiais de enchimento para uma BET utilizados pela literatura, e obtenção de índice de vazios.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Andersson, K. *et al.* **Sanitation, Wastewater Management and Sustainability: from Waste Disposal to Resource Recovery**. 2ª Edição. Nairobi and Stockholm: United Nations Environment Programme and Stockholm Environment Institute. 2020. Disponível em: <https://www.sei.org/publications/sanitation-wastewater-management-and-sustainability/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

BERGAMINI, B. A.R. *et al.* Occurrence and characterization of insect galls in the Floresta Nacional de Silvânia, Brazil. **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 57, n. 32, 2017. <http://dx.doi.org/10.11606/0031-1049.2017.57.32>

BRASIL. **Decreto nº 4.887, de 20 de novembro de 2003**. Regulamenta o procedimento para identificação, reconhecimento, delimitação, demarcação e titulação das terras ocupadas por remanescentes das comunidades dos quilombos de que trata o art. 68 do Ato das Disposições

Constitucionais Transitórias. Brasil, Brasília, 2003. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2003/d4887.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2003/d4887.htm)>. Acesso em: 28 ago. 2024.

CARASEK, H. *et al.* Sand parameters influencing the consistency and buld density of renderings mortars. **Revista Matéria**, v. 21, n. 3, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0068>

COELHO, C. F., REINHARDT, H.; ARAÚJO, J. C. Fossa verde como componente de saneamento rural para a região semiárida do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018170077>

COSTA, H. C. *et al.* Espacialização e Sazonalidade da Precipitação Pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, 2012. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v5i1.232785>

Cross, K. *et al.* **Nature-Based Solutions for Wastewater Treatment**. IWA Publishing: London, UK, 2021. <https://doi.org/10.2166/9781789062267>

FERNANDES, M. de M. **Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais**. Editora Oficina de Textos, 2016. 442p.

FCP. Fundação Cultural Palmares. **Comunidades Remanescentes de Quilombos (CRQ's)**. 2019. Disponível em: <<http://www.palmares.gov.br/comunidades-remanescentes-de-quilomboscrqs>>. Acesso em: 28 ago. 2024.

FIGUEIREDO I. C. *et al.* Bacia de Evapotranspiração (BET): uma forma segura e ecológica de tratar o esgoto de vaso sanitário. **Revista DAE**, v. 67, n. 20, 2019. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.059>

PAULO, P.L. *et al.* Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. **Ecological Engineering**, v. 50, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.022>

\_\_\_\_\_. *et al.* Evapotranspiration tank for the treatment, disposal and resource recovery of blackwater. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.025>

Reis, M.C.G. *et al.* Evapotranspiration beds as a zero-discharge nature-based solution for wastewater disposal: A review. **Ecology Engineering**, v. 189, 2023a. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106896>

\_\_\_\_\_. *et al.* A preliminary experimental study simulating evapotranspiration process in TEvap tanks cultivated with different forages. **Environmental Technology**, v. 45, n. 16, 2023b. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2209830>

MACHADO, G. X. M. P. *et al.* **Guia: Caminhos e cuidados com as águas - faça você mesmo seu sistema de saneamento ecológico.** Rio de Janeiro, RJ: Fiocruz, 2019. 52p. [E-book]. Disponível em: <<https://www.otss.org.br/livros>>. Acesso em: 2 set. 2024.

Miwornunyuie, N. *et al.* Investigating the research and development status and trends of constructed wetlands: A bibliometric and patent analysis. **Journal of Water Process Engineering**, v. 63, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105430>

UNICEF. United Nations Children's Fund. **Universal Access to Water, Sanitation and Hygiene: 2021 priorities.** 2021. Disponível em: <https://www.unicef.org/media/97591/file/Universal%20Access%20to%20Water,%20Sanitation%20and%20Hygiene.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.





## **ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM CIMENTO DE UMA ESTRADA DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO**

PESSOA, JOSÉ MARCOS (1); MINHOTO, MANUEL JOAQUIM (2); PAULA, ANTÓNIO MIGUEL (3)

(1) INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA, EMAIL: a39520@alunos.ipb.pt

(2) INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA, EMAIL: minhoto@ipb.pt

(3) INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA, EMAIL: mpaula@ipb.pt

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: josemarcostp@hotmail.com

### **RESUMO**

A análise estrutural é vital para compreender o comportamento do solo e essencial tanto no dimensionamento das camadas de pavimentos quanto na escolha dos melhores processos de reabilitação para solos específicos, além de prever e prevenir patologias. A determinação da capacidade estrutural dessas camadas pode ser realizada por meio de ensaios *in situ*, que oferecem resultados rápidos e seguros, ou laboratoriais, que, embora possam introduzir pequenas alterações no solo, são fundamentais para uma análise detalhada. O estudo focou em uma estrada de baixo volume de tráfego (EBVT) não pavimentada numa região de montanha no norte de Portugal. Esta via, com 3016 metros de extensão e uma altitude média de 1233 metros, é crucial para o acesso ao abastecimento de água do município de Bragança. Desde 2015, com o aumento do tráfego de veículos pesados, a estrada sofreu desgaste significativo, levando a administração rodoviária a realizar intervenções frequentes para sua manutenção. Este trabalho analisa a qualidade da reabilitação feita na via, focando no índice de suporte Califórnia dinâmico (CBRd) e propõe uma intervenção que possa trazer resultados positivos para ser aplicada na via, através de ensaios *in situ* e laboratoriais com a estabilização do solo com cimento em diferentes proporções.

**Palavras-chave:** CBRd, Estabilização, Cimento, EBVT.

### **ABSTRACT**

*Structural analysis is vital to understanding soil behavior and is essential both for sizing pavement layers and choosing the best rehabilitation processes for specific soils, as well as for predicting and preventing pathologies. The determination of the structural capacity of these layers can be performed through in situ tests, which offer fast and reliable results, or laboratory tests, which, although they may introduce small changes in*

the soil, are essential for a detailed analysis. The study focused on an unpaved low-volume traffic road (LTV) in a mountainous region in northern Portugal. This road, which is 3,016 meters long and has an average altitude of 1,233 meters, is crucial for access to the water supply of the municipality of Bragança. Since 2015, with the increase in heavy vehicle traffic, the road has suffered significant wear, leading the road administration to carry out frequent interventions for its maintenance. This work analyzes the quality of the rehabilitation carried out on the road, focusing on the dynamic California support index (CBRd) and proposes an intervention that can bring positive results to be applied on the road, through *in situ* and laboratory tests with soil stabilization with cement in different proportions.

**Keywords:** CBRd, Stabilization, Cement, LVR.

## 1 INTRODUÇÃO

A análise estrutural, é essencial para entender o comportamento do solo tanto no dimensionamento das camadas de um pavimento quanto na determinação dos melhores processos de otimização de um tipo específico de solo. Além disso, é crucial para antecipar possíveis patologias que possam surgir, permitindo, assim, sua prevenção (MARQUES, 2015).

A determinação da capacidade estrutural das camadas de um pavimento, é realizada por meio de ensaios *in situ* ou laboratoriais (MARQUES, 2015). A avaliação *in situ* geralmente proporciona resultados rápidos e seguros, facilitando a continuidade dos trabalhos em campo. Por outro lado, a avaliação em laboratório, realizada com equipamentos que não podem ser transportados ao local de origem do solo, considera que, embora seja difícil reproduzir exatamente as condições originais, é possível que ocorram pequenas alterações no solo desde a sua coleta até o momento do ensaio.

Neste trabalho foi estudado uma estrada de baixo volume de tráfego (EBVT) não pavimentada que conecta duas barragens em uma região de montanha no Norte de Portugal. Estendendo-se por 3016 metros a uma altitude média de 1233 metros, como mostra a Figura 01. A importância dessa via se deve ao fato de que as barragens são fundamentais para a distribuição de água na região, o que torna a manutenção dessa estrada crucial para a segurança e comodidade de circulação local.



**Figura 1 - Estrada de Baixo Volume de Tráfego (EBVT) estuda**

**Fonte:** GOOGLE EARTH PRO (2024)

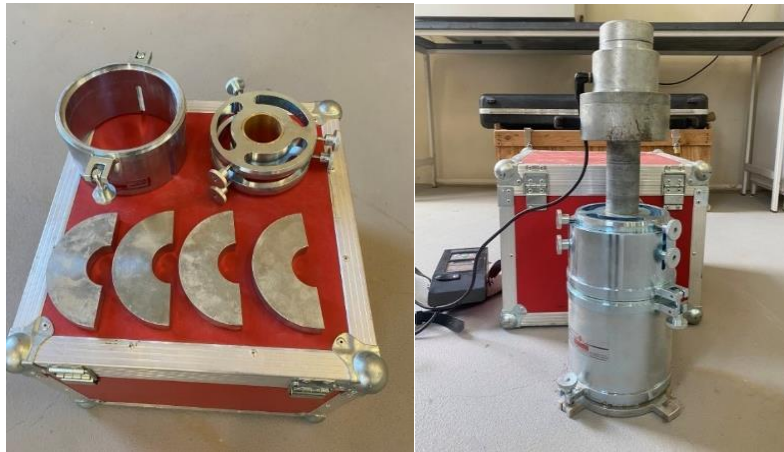
Desde a conclusão da construção do sistema hídrico em 2015, o aumento do tráfego de veículos pesados, para o qual a via originalmente não estava projetada para suportar, causou significativo desgaste na estrada. Em resposta, a administração rodoviária tem realizado intervenções frequentes para garantir a sua manutenção. Este trabalho tem como objetivo analisar em termos de Índice de Suporte Califórnia dinâmico (CBRd) a qualidade da reabilitação feita na via através de ensaios in situ e laboratoriais e propor uma intervenção a ser realizada que traga resultados positivos e possa ser aplicado na zona estudada.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CBRd - Índice de Suporte Califórnia dinâmico**

Assim como o ensaio CBR convencional, o CBR dinâmico mede os esforços necessários para que um pistão circular penetre uma amostra de solo a uma profundidade que varia de 2,54 a 5,08 mm, comparando esses esforços com os padrões estabelecidos pela norma (RINCÓN-MORANTES; ALVAREZ; REYES-ORTIZ, 2022). No CBR dinâmico, o impacto que gera o esforço resulta da queda livre do pistão, causando um deslocamento no solo, que é detetado pelos acelerômetros presentes na placa em contato com o solo.

Esse ensaio também pode ser realizado em laboratório, onde o equipamento é adaptado para simular as condições de campo. Tanto no campo quanto no laboratório, o equipamento utilizado para aplicar o impacto que penetra a amostra consiste em um dispositivo de carga com 15 kg, dos quais 10 kg correspondem à massa móvel que gera o impacto e, conseqüentemente, a deformação no solo. Os 5 kg restantes, que em campo correspondem à placa de carga e ao pistão, são substituídos no laboratório pelos: pistão, guia do pistão, extensor do molde e 4 pesos, que juntos simulam a placa de 300 mm característica do CBR dinâmico, como ilustrado na Figura 02.



**Figura 2 - Material específico para realização do ensaio CBRd em laboratório**

Fonte: Autor (2024)

## **2.2 Estabilização química de solos**

A estabilização de solos visa melhorar as propriedades mecânicas do solo e aumentar a durabilidade dessas características. Com isso, o solo se torna mais resistente e capaz de responder melhor às solicitações a que for submetido. (CRUZ, 2004)

Nem todo tipo de solo pode ser estabilizado pelos métodos existentes (CRUZ, 2004). Os métodos de melhoramento de solo são classificados de acordo como é executado, sendo a estabilização química o melhoramento o qual as características dos solos são modificadas através da adição de aditivos químicos, como cimento ou cal. Assim, torna-se possível utilizar solos locais na construção de pavimentos rodoviários, mesmo quando a sua baixa qualidade os excluía devido à incapacidade de atender às especificações necessárias das camadas de base e sub-base. Ao estabilizar o solo com ligantes hidráulicos, reduz-se o índice de plasticidade, aumenta a rigidez a médio e longo prazo, sendo assim as principais vantagens deste tipo de estabilização (DIAS, 2012).

O cimento e a cal são os principais agentes estabilizadores empregados, além de ser mais adequados para uma ampla variedade de solos, apresentar maior durabilidade e disponibilidade, e ser menos prejudiciais às camadas inferiores do solo.

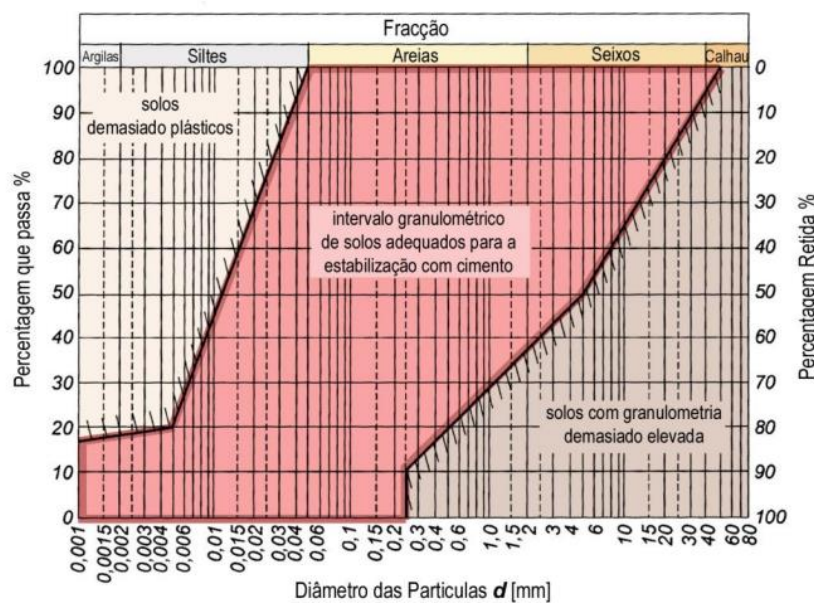
### **2.2.1 Estabilização de solos com cimento**

Nas misturas de solo com cimento, a depender da quantidade de cimento adicionada ao solo, a ação estabilizadora do cimento pode ocorrer por meio de dois mecanismos distintos. Um desses mecanismos é observado em teores de cimento mais baixos, que envolve uma modificação na proporção de finos do solo que reduz a sua plasticidade, podendo ou não ser acompanhada por um aumento na resistência mecânica. Nesses casos, o cimento forma núcleos independentes na massa de solo. O outro mecanismo resulta no aumento da resistência

mecânica devido à ação aglutinante do aditivo que une as partículas do solo. Este efeito é observado quando são utilizados teores de cimento mais elevados, nos quais o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo. (DIAS, 2012)

Assim, em misturas de solo com cimento em baixa quantidade (%cimento < 5%) acontece a estabilização devido a alteração da fração argilosa do solo, ao diminuir sua plasticidade. Já em misturas com maior quantidade de cimento (%cimento > 5%) a estabilização se dá devido a ação aglutinante do aditivo ao aumentar a resistência mecânica do solo. Vale ressaltar que para ambos os efeitos são necessário que haja uma boa mistura entre os materiais utilizados, tempo de cura, hidratação e a compactação necessário do material.

Os solos que melhor reagem com o cimento para sua estabilização, dependem da sua composição granulométrica, podendo ser classificados como Argila Arenosa ou Areia com Cascalho. Desta forma, os solos que apresentam curva granulométrica entre as curvas destacadas na Figura 3, são os solos ideais para seu melhoramento com cimento.



**Figura 3 - Curva Granulométrica de solos adequados para a estabilização com cimento**

Fonte: GORSKI (2010)

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CBRd in situ

As avaliações mecânicas foram realizadas em duas campanhas, a primeira no dia 20 de novembro de 2023 e a segunda campanha dia 05 de fevereiro de 2024. Entre as duas campanhas de avaliação houve uma intervenção corrente da via usando os processos habituais. Durante o mês que antecedeu a primeira campanha (de 20/10/2023 a 20/11/2023),

ainda no outono, choveu um acumulado de 192,3 milímetros, todavia, na semana que antecede a avaliação não houve um volume de chuva significativo. Durante o mês antes da segunda campanha (de 05/01/2024 a 05/02/2024), no inverno, choveu um acumulado de 87,7 milímetros, porém, na semana que antecede a segunda avaliação não houve chuva.

A avaliação mecânica foi realizada em 30 pontos georreferenciados espaçados entre si aproximadamente 100m, distância que podia variar dependendo da qualidade da via. Assim, o espaçamento dado entre os pontos podia variar para melhor representar a real situação da estrada.

Tanto no campo quanto no laboratório, o equipamento gera um impacto que penetra a amostra, conseqüentemente, a deformação no solo. Após o impacto, o receptor do equipamento mostra a penetração sofrida pela amostra. A pressão necessária para penetrar a amostra em relação a brita graduada padrão normativa é calculada por meio da expressão 1, conforme indicado no manual do fornecedor do equipamento. (ZORN, 2016)

$$CBRd(\%) = \frac{87,3}{s^{0,59}} * 100 \quad (1)$$

onde,            CBRd(%)        = Relação do pistão com os valores padrões;  
                       s                        = Profundidade penetrada pelo pistão;

### 3.2 Método das Diferenças Acumuladas

Devido os diversos tipos de materiais, granulometria, compactação e teor de humidade que podem variar ao longo de uma via não pavimentada, é necessário definir pontos que representem secções ao longo da estrada. Devido isso, foi utilizado o método presente no Apêndice J do Guia para Projetos de Estruturas de Pavimento, Método das Diferenças Acumuladas da AASHTO (1993), para identificar as secções semelhantes e os pontos característico.

Para determinação dos pontos característicos é necessário obter a área de contribuição de cada ponto. A área de contribuição de cada ponto é calculada pela média do parâmetro analisado, no caso o CBRd, entre o ponto em estudo e seu anterior, como mostra na equação 2.

$$A_n = \left( \frac{CBRd_{n-1} + CBRd_n}{2} \right) * \Delta x_n \quad (2)$$

onde,            An            = Área de contribuição do ponto n;  
                       CBRdn = CBRd no ponto n;  
                       Δxn        = Distância no ponto n ao ponto inicial (n=1)

Para desenvolvimento do método é necessário calcular o parâmetro Zx de cada ponto. Este parâmetro é determinado pela subtração da área de contribuição acumulada até o ponto estudado pela razão entre a área acumulada total e o comprimento total da estrada, multiplicado

pela distância acumulada do ponto analisado, como mostra a Equação 3.

$$Z_{x,n} = \overline{A_n} - \left( \frac{A_{n,total}}{L} * \Delta x_n \right) \quad (3)$$

onde,  $Z_{x,n}$  = Parâmetro  $Z_x$  do ponto  $n$ ;  
 $\overline{A_n}$  = Área de contribuição acumulada do ponto  $n$ ;  
 $L$  = Comprimento total da via.

Com o parâmetro  $Z_x$  definido para cada ponto é plotado um gráfico da distância acumulada de cada ponto no eixo das abscissas pelo parâmetro  $Z_x$  no eixo das ordenadas. Conforme orientações na AASHTO (1993), não são considerados o ponto inicial (ponto 1) nem o ponto final (ponto 30). Para cada mudança de declividade do gráfico está definida uma secção homogênea.

Para determinação do ponto característico de cada secção, foi estabelecido como critério que 85% da secção apresente resultado igual ou superior a este valor. Assim, somente 15% daquela secção estaria em condições inferiores ao do ponto característico. Por meio das análises das distribuições de gauss, é possível obter o ponto característico a partir da equação 4.

$$CBRd_k = \overline{CBRd} - 1,04 * \sigma_r \quad (4)$$

onde,  $CBRd_k$  = Valor característico do CBRd;  
 $\overline{CBRd}$  = Média dos valores existentes na secção;  
 $\sigma_r$  = Desvio Padrão dos valores existentes na secção;  
1,04 = Valor determinado nas tabelas de Gauss que abrange 85,08%

O valor Característico da sessão será aquele que mais se aproxima do determinado pela expressão 10. Como nem sempre há valores coincidentes ao valor característico dentre os valores existentes na secção, é preciso considerar o erro médio quadrático para identificar o que mais se aproxima do valor característico. O Erro médio quadrático (EMQ) é calculado conforme indica a Equação 5.

$$EMQ[\%] = \sqrt{\frac{(r_n - r_k)^2}{r_k}} \quad (5)$$

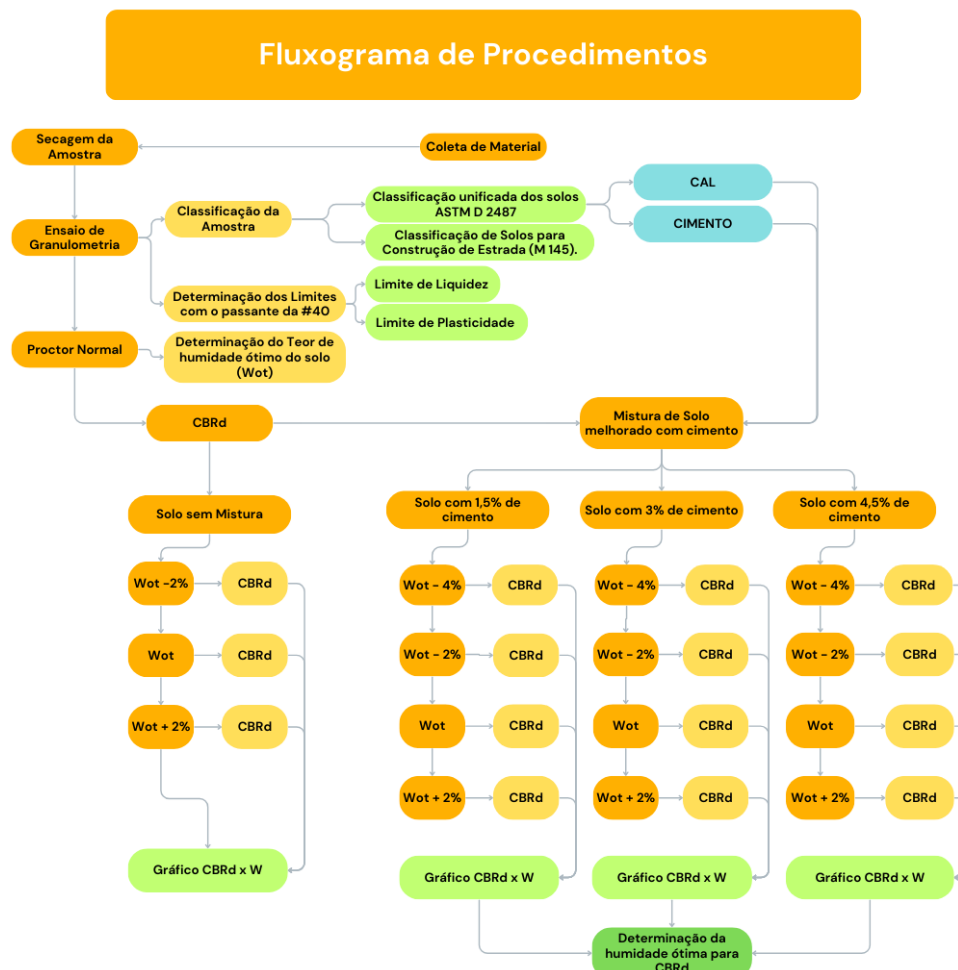
onde,  $r_n$  = Valor da variável 'r' no ponto  $n$ ;  
 $r_k$  = Valor característico da variável 'r';

### 3.3 Plano Laboratorial

Após os pontos característicos definidos, os ensaios laboratoriais foram realizados somente para o ponto mais crítico da segunda campanha. A coleta do material foi feita dia 19 de Março de 2024. Como em todos os ensaios foi utilizado o solo seco em estufa, não foi levado em

consideração a quantidade de chuva que antecedeu a coleta nem a humidade no instante da coleta.

Os ensaios laboratoriais seguiram o plano de trabalho exposto no organograma da Figura 4 e foram realizados no Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança.



**Figura 4 – Plano de Trabalho Laboratorial**  
 Fonte: Autor (2024)

Conforme o fluxograma, após a coleta do material, será realizada uma sequência de ensaios. O material será classificado conforme sua granulometria segundo a Classificação Unificada do solo (ASTM D 2487) e a Classificação para construção de estrada (M 145). Após classificado será determinado os limites de liquidez e de plasticidade com o material passante no peneiro N° 40. Com o material devidamente classificado será determinado o teor em água ótimo, através do ensaio Proctor Normal, para que esse teor em água seja referência para os demais ensaios. Desta forma, com o teor em água determinado será realizado o ensaio CBRd em laboratório com diferentes percentagens de cimento e água, sempre a variar a partir do teor em água ótimo.



#### 4 RESULTADO E DISCUSSÕES

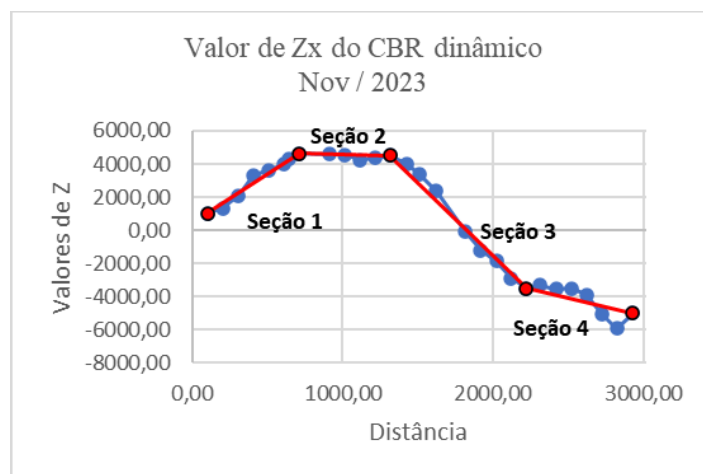
O resultado das duas campanhas de medição de CBRd in situ realizadas em novembro de 2023 e fevereiro de 2024 estão expostos no Quadro 01.

**Quadro 1 - Resultado do ensaio CBRd realizado in situ**

CBR								
Ponto	Camp. 01	Camp. 02	Ponto	Camp. 01	Camp. 02	Ponto	Camp. 01	Camp. 02
1	53%	93%	11	36%	35%	21	23%	33%
2	45%	35%	12	36%	28%	22	43%	31%
3	40%	34%	13	45%	38%	23	39%	26%
4	53%	39%	14	36%	28%	24	35%	35%
5	49%	40%	15	33%	39%	25	44%	36%
6	36%	Nulo	16	31%	Nulo	26	27%	25%
7	49%	42%	17	29%	38%	27	28%	27%
8	51%	56%	18	24%	34%	28	33%	44%
9	37%	40%	19	32%	27%	29	62%	40%
10	41%	27%	20	34%	43%	30	Nulo	24%

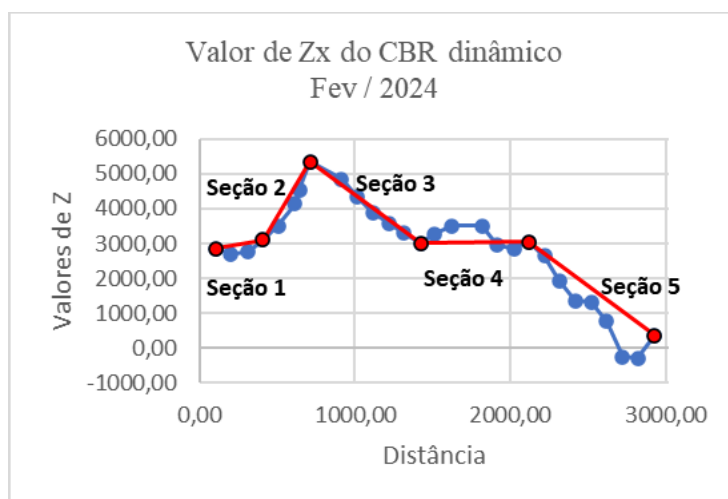
Dentre resultados obtidos nas campanhas, o CBRd do ponto 30 da campanha 01 e os pontos 06 e 16 da campanha 02 foram anulados devido seus valores exorbitantes (CBRd>100%), causados provavelmente por alguma rocha muito próxima da superfície da via e que não foi observado durante a realização do ensaio.

Foi calculado o valor de Zx de todos os pontos da última campanha, a fim de observar semelhança entre os pontos analisadas, identificar as secções homogêneas da via, conjunto de pontos com comportamento semelhantes, para cada campanha e determinar seus pontos característicos, ponto que representa a secção uma vez que 85% dela apresentar resultado igual ou superior a seu valor. A Figura 5 e 6 mostram as secções homogêneas das duas últimas campanhas realizadas.



**Figura 5 - Secções Homogêneas da campanha de avaliação de CBRd em novembro de 2023**

Fonte: Autor (2024)



**Figura 6 - Secções Homogêneas da campanha de avaliação de CBRd em fevereiro de 2024**

Fonte: Autor (2024)

Para cada secção homogênea foi estimado estatisticamente um valor característico para a secção e assim, determinado o ponto característico. Na Quadro 2 está exposto os pontos característicos de cada secção homogênea.

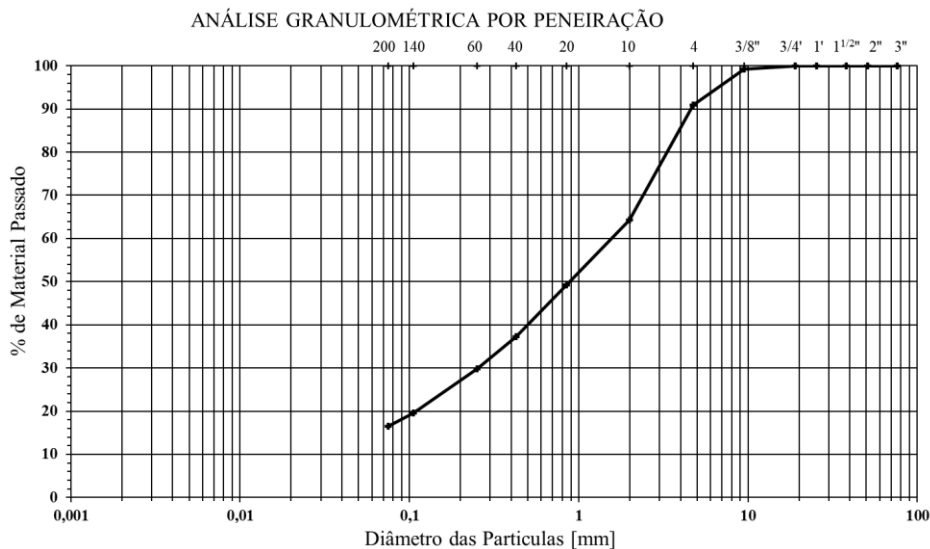
**Quadro 2 - Pontos característicos**

Pontos Característicos Nov. 2023		Pontos Característicos Fev. 2024	
Ponto	CBR (%)	Ponto	CBR (%)
9 – Secção 01 (2 a 9)	37	3 – Secção 01 (2 a 5)	34
11, 12 e 14 – Secção 02 (9 a 14)	36	5 – Secção 02 (5 a 9)	40
18 – Secção 03 (14 a 22)	24	12 e 14 – Secção 03 (9 a 15)	28
26 – Secção 04 (22 a 29)	27	19 – Secção 04 (15 a 21)	27
-	-	22 – Secção 05 (21 a 29)	31

Quando é analisado as secções homogêneas com seus respectivos valores de CBRd característico, é possível perceber que o início da via, entre os pontos 01 e 14 aproximadamente, temos sempre valores mais altos de CBRd. Entre os pontos 14 e 21 aproximadamente estão os valores mais baixos de CBRd.

Assim, como o Ponto 19 é o ponto característico com menor valor de CBRd na segunda campanha, será este o ponto selecionado para realização dos ensaios laboratoriais a fim classificá-lo e obter melhores resultados de CBRd através da estabilização química com cimento.

Com o solo coletado no ponto 19, foi realizado o ensaio de granulometria. A Figura 7 mostra a curva granulométrica obtida de acordo com o ensaio realizado.

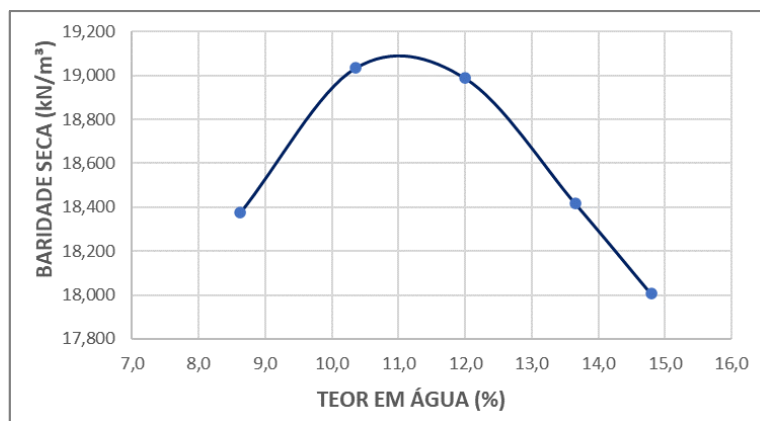


**Figura 7 - Curva granulométrica do ponto 19**  
 Fonte: Autor (2024)

Após a análise da curva granulométrica, o solo foi classificado segundo o sistema unificado de classificação de solos (ASTM D 2487-85) como uma Areia bem graduada com cascalho (SW).

Com o solo coletado não foi possível determinar os Limites de Atterberg (LL e LP). Desta forma o solo do Ponto 19, ao utilizar a classificação de solos para construção de estrada (M 145), pode ser classificado como A-2-4. Areia e areia siltosa ou argilosa, com comportamento excelente a bom para ser aplicado com subleito.

Com o material devidamente classificado foi determinado o teor em água ótimo, através do ensaio Proctor Normal, como pode ser visto na Figura 8.



**Figura 8 - Curva de compactação para o solo do ponto 19**  
 Fonte: Autor (2024)

Ao analisar a curva de compactação, o ponto 19 tem um teor água ótimo para compactação de 11% de água, com uma massa específica aparente seca de 19,1kN/m³. Assim, este se torna o valor de referência

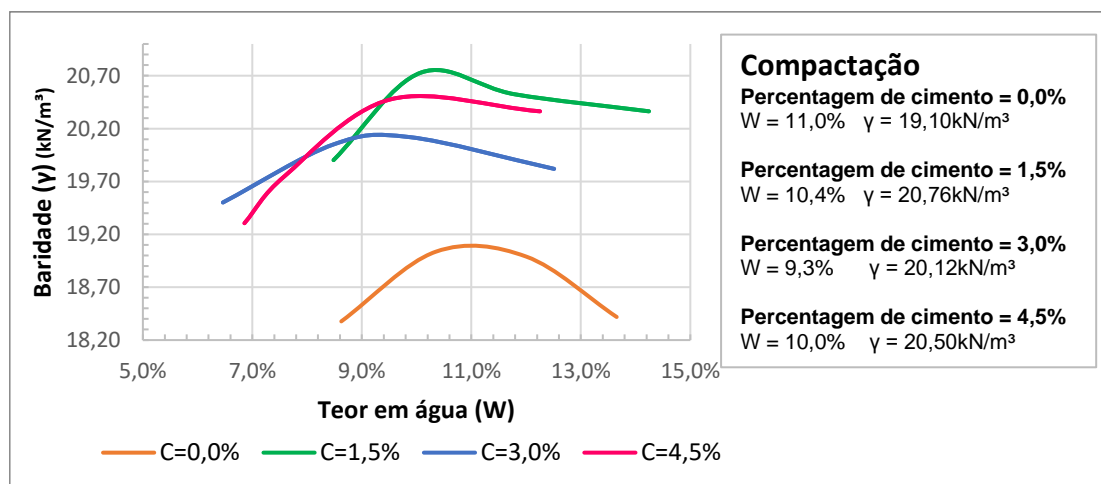
para os ensaios CBRd realizados com adição de cimento na tentativa da sua estabilização química.

O CBRd havido sido analisado somente em campo, desta forma foi realizado o ensaio em laboratório com o solo colhido no ponto 19, a fim de buscar valores de referência para as análises feitas com diferentes proporções de cimento no solo. Ao reduzir o teor em água o valor de CBRd tende a aumentar. Na Quadro 3 são expressos os valores de CBRd para diferentes teores em água e proporções de cimento. Já na Figura 9 são expostas as curvas de compactação e na Figura 10 a curva de CBRd para diferentes proporções de cimento.

**Quadro 3 - CBRd para diferentes teores em água e proporções de cimento**

Teor em água	CBR para cada % Cimento			
W estimado [%]	0,00%	1,50%	3,00%	4,50%
7%	-	-	74%	42%
9%	58%	70%	47%	44%
<b>11%</b>	<b>47%</b>	<b>47%</b>	<b>39%</b>	<b>50%</b>
13%	29%	40%	25%	27%
15%	-	31%	-	-

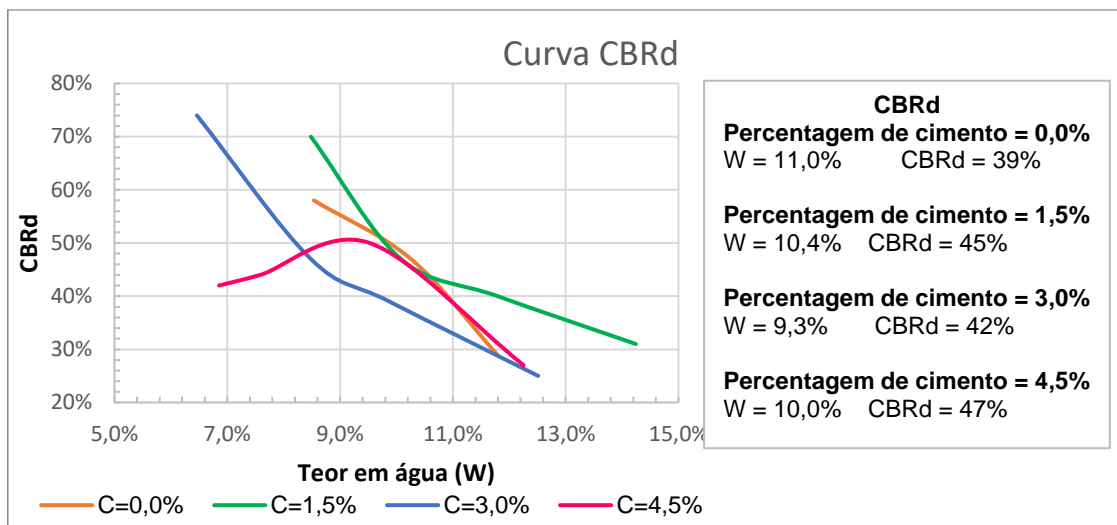
Conforme mostrado na Figura 9, a adição de cimento aumentou a massa específica aparente seca da amostra, independentemente da percentagem de cimento utilizada, resultando em uma melhor compactação do solo. No entanto, o aumento na quantidade de cimento não levou a um crescimento proporcional da massa específica aparente seca. A curva verde na Figura 9, que representa a amostra com 1,5% de cimento, apresentou a melhor compactação, atingindo 20,76 kN/m<sup>3</sup>. Embora a mistura com 3% de cimento tenha sido a menos eficiente para a compactação, ainda foi 5,34% superior à densidade da mistura sem cimento, o que é uma variação significativa, considerando as baixas proporções de cimento utilizadas.



**Figura 9 - Curva de compactação para diferentes teores de cimento**

Fonte: Autor (2024)

A partir da Figura 10, observa-se que o solo com 4,5% de cimento alcançou o maior valor de CBRd no ponto de teor de água ótimo da curva de compactação. No entanto, para teores de água inferiores a 9%, o valor de CBRd diminui nesse solo com 4,5% de cimento. Embora normalmente se espere que o CBRd aumente com a redução do teor de água, o comportamento desse solo de baixa plasticidade utilizado, que se situa entre um solo melhorado com cimento ( $C < 5\%$ ) e um solo-cimento ( $C > 5\%$ ), influencia os valores de CBRd. Portanto, a proporção de 1,5% de cimento foi a que apresentou o melhor resultado na estabilização do solo com um CBRd de 45% no ponto de teor em água ótimo que já é maior que o CBRd médio de todas as outras campanhas já realizadas na via.



**Figura 10 - Curva de CBRd para diferentes teores de Cimento**

Fonte: Autor (2024)

## 5 CONCLUSÃO

Ao observar os resultados de CBRd entre as campanhas de intervenções realizadas, expostos no Quadro 01, nove pontos obtiveram valores de CBRd superior na campanha de 2024. Dos 27 pontos estudados, 1 obteve o mesmo valor nas duas campanhas e 17 pontos obtiveram valor inferiores de CBRd após a intervenção. Desta forma em termos de CBRd a intervenção realizada pela administração da via não pode ser considerada benéfica, visto que houve piora da resistência na maioria dos pontos.

Na tentativa de obter uma melhor proposta de intervenção a ser realizado na via, foi adicionado cimento em diferentes proporções e realizados teste em laboratório com essas amostras. A adição de cimento em baixa proporção ( $< 5\%$ ), como foi realizado nas amostras de solo do ponto 19, faz com que o solo reduza sua plasticidade. Esse fato pode ser constatado com a redução do teor em água ótimo e a melhoria do grau de compactação ao adicionar cimento. O teor em água ótimo para a amostra sem cimento era de 11%, essa percentagem variou decrescentemente em 2% ao adicionar cimento, sendo 10,4% o teor em

água ótimo para a proporção de 1,5% de cimento e chegando ao seu valor mínimo de 9,3% de água para a melhor compactação quando adicionado 3% de cimento. Todavia, a proporção de cimento que obteve melhor curva de compactação foi a mistura de solo com 1,5% de cimento.

Quando analisado a capacidade de suporte das amostras, através do ensaio CBRd, todos os solos adicionados de cimento obtiveram melhor valor de CBRd que o solo sem cimento, cada um com seu respetivo valor de teor em água ótimo. O solo que obteve melhor resposta com o seu teor em água ótimo foi o solo adicionado de 4,5% de cimento. Porém por se tratar de um solo em uma faixa de transição entre solo-cimento e solo melhorado com cimento sofreu decréscimo dos seus valores de CBRd quando utilizou teores em água inferiores ao ótimo. Devido a isso, o solo que obteve melhor valor e comportamento estável de CBRd em seu teor em água ótimo foi o solo com 1,5% de cimento obtendo um valor de CBRd de 45%.

Assim, uma vez que o solo adicionado 1,5% de cimento foi a amostra que obteve melhores resultados, tanto na curva de compactação quanto na curva de CBRd, esta percentagem se torna a ideal a ser aplicada com o objetivo de melhorar o desempenho e conservação das vias presentes na zona. Todavia, para tipos de solo diferentes do estudado no ponto 19, é necessário refazer o estudo para o tipo de solo específico do local a ser aplicado.

## REFERÊNCIAS

AASHTO. **Guide for Design of Pavemente Structures. Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Construction Demolition Waste** Washington, D.C., 1993.

CRUZ, Maria de L. S. **Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento**. 2004. UNIVERSIDADE DO MINHO, [S. l.], 2004.

DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. 2012. Universidade Nova de Lisboa, [S. l.], 2012.

GORSKI, Cristina Maria Fernandes Martins. **Estabilização de Solos Argilosos com Ligante Hidráulico LIPIDUR DS**. 2010. Universidade da Beira do Interior, [S. l.], 2010.

MARQUES, Diogo Miguel Abrantes Carvalho. **Controlo de Qualidade de Estradas de Baixo Volume de Tráfego tação**. 2015. Universidade Nova de Lisboa, [S. l.], 2015.

RINCÓN-MORANTES, Jhon Fredy; ALVAREZ, Alex E.; REYES-ORTIZ, Oscar J. Estimación de la rigidez de materiales granulares marginales no ligados mediante ensayo CBR dinámico. **Ingeniería y Desarrollo**, [S. l.], v. 40, n. 01, p. 92–113, 2022. DOI: 10.14482/inde.40.01.621.992.

ZORN. **Supplementary User Manual for the Dynamic Field CBR**. , 2016.



## REVIEW ON ROAD PAVEMENT DISTRESS DETECTION WITH YOLO

**OLIVEIRA, MARIA. UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR:**

[maria.carolina.oliveira@ubi.pt](mailto:maria.carolina.oliveira@ubi.pt)

**SANTOS, BERTHA. UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR, GEOBIOTEC-UBI**

**RESEARCH UNIT: [bsantos@ubi.pt](mailto:bsantos@ubi.pt)**

### RESUMO

A deterioração da superfície dos pavimentos é influenciada por diversos fatores como a intensidade do tráfego, as condições climáticas e a má execução em obra. Ao longo do tempo, diversos tipos de degradações surgem à superfície dos pavimentos, podendo afetar drasticamente o conforto de condução e a segurança dos utentes da via, causando também danos estruturais no pavimento. Atualmente verifica-se um grande crescimento da incorporação de técnicas de deep learning em sistemas de gestão de pavimentos, nomeadamente no auxílio à detecção automática de degradações. De entre as técnicas disponíveis para a detecção automática de objetos, destaca-se o YOLO (You Only Look Once). O presente estudo tem como objetivo analisar um conjunto de artigos científicos de acesso livre, disponíveis na base de dados Scopus, sobre a utilização do algoritmo YOLO para a detecção automática de degradações superficiais em pavimentos rodoviários, afim de identificar as principais tendências, vantagens e desvantagens. A incorporação efetiva desta técnica nos sistemas de gestão de pavimentos, permitirá reduzir o tempo de avaliação do estado dos pavimentos e a implementação de estratégias de conservação preventivas, evitando assim danos estruturais prematuros e prolongando a vida útil do pavimento.

**Palavras-chave:** Degradações superficiais de pavimentos rodoviários, Deep Learning, YOLO, Detecção automática.

### ABSTRACT

*The deterioration of pavement surfaces is influenced by various factors such as traffic intensity, weather conditions, and poor construction execution. Over time, pavements can develop various types of distress that can dramatically affect the driving comfort and safety of road users and cause structural damage to the pavement. There is currently a significant increase in the use of deep learning techniques in pavement management systems, particularly to assist with the automatic detection of distress. Among the techniques available for automatic object detection, YOLO (You Only Look Once) stands out. This study aims to analyse a set of open access scientific articles available in the Scopus*

*database on the use of the YOLO algorithm for the automatic detection of surface damage in road pavements. The aim is to identify the main trends, advantages, and disadvantages. The effective incorporation of this technique into pavement management systems will reduce the time taken to assess the condition of the pavement and implement preventive conservation strategies, thereby avoiding premature structural damage and extending the life of the pavement.*

**Keywords:** Road pavement surface distress, Deep learning, YOLO, Automatic detection.

## **1 INTRODUCTION**

### **1.1 FRAMEWORK AND OBJECTIVES**

The importance of high-quality road infrastructure has been increasingly recognised, especially with the expansion of communication and transport networks. In this context, the condition of road pavement is crucial for the proper and safe functioning of roads.

Over time, pavements suffer from wear and tear, which can have a significant impact on user comfort and safety, as well as compromising the structural integrity and aesthetics of the road. This pavement deterioration of road surfaces is influenced by several factors, such as the traffic intensity, adverse weather conditions and the quality of project execution. Keeping the pavement in good condition is then a wise economic decision. Regular maintenance of the infrastructure can prevent major interventions and allow minor repairs to be made resulting in better management, minimising inconvenience to users and reducing costs for those responsible for maintenance.

The rapid development of artificial intelligence has driven the application of deep learning techniques to the detection of pavement damage from pavement surface images, resulting in a significant increase in the use of artificial intelligence for pavement management. Compared to manual inspection, which is the most common practice, artificial intelligence overcomes some of the disadvantages of this method, namely the physical presence of qualified inspectors on site and the time required to collect pavement data.

The aim of this research is to carry out a literature review of some articles that have developed and studied automated pavement distress detection systems to locate and quantify pavement damage using YOLO (You Only Look Once) algorithm.

In 2016, Joseph Redmon and his collaborators first presented the YOLO algorithm at the CVPR conference (Conference on Computer Vision and Pattern Recognition) [17]. This algorithm introduced an approach that allows objects to be detected in real time with high accuracy and efficiency and has been widely used in situations that require rapid processing, such as the detection of pavement defects.



Since its introduction, several versions of YOLO have been developed, reflecting the continuous advances in data management and processing.

To carry out this type of work, it is first necessary to collect imagery of the actual condition of the pavement. This stage is usually carried out using cameras mounted on a land or air vehicle that travels the desired route and captures images of the pavement surface damage, although it can also be carried out using images from Google Street View.

The images can then be annotated and fed into YOLO to automatically identify the type and level of distress present in the pavement surface. This enables faster intervention measures to improve the condition of the pavement, avoiding major structural damage that would be more difficult and costly to repair.

The paper is divided into four sections: Section 1 discusses the importance of pavement maintenance management, highlighting the importance of inspection and the use of the YOLO algorithm to identify pavement surface condition. Section 2 presents the selection process of open access scientific publications for review and the analysis of the main aspects discussed in these documents. The analysis of research trends is presented in section 3. Finally, section 4 presents the conclusions of the study and future directions for research in this area.

## **2 DOCUMENT SELECTION PROCESS**

This study aims to analyse open access scientific publications on the use of artificial intelligence, namely the YOLO algorithm, in the pavement inspection process of transport infrastructures. The scientific database chosen to search and collect the raw data used in the analysis is Scopus, an Elsevier database created in 2004 that contains abstracts, articles and citations with specialised curation. The data were collected between March and July 2024.

The publications were selected based on several criteria, the most important being open access, i.e. publications that are freely available on the internet, and the search terms 'YOLO, pavement distress, pavement inspection, deep learning and automatic detection', considering the title, abstract and keyword content of the article. The inclusion of open access articles in the review ensures that the published content can be seen by as many people as possible.

Other criteria include the selection of studies in English, in final stage, subject area 'Engineering' and article or conference paper document type. The selection process aimed to ensure the quality, relevance and effectiveness of the documents selected, reflecting a firm commitment to high standards of scientific excellence.

Table 1 presents all the stages in the process of selecting the articles used in this literature review.

Table 1 – Document selection process

Process phase	Selection criteria.
1	Search in the Scopus database using the expression "YOLO AND (pavement distress OR pavement inspection) AND (deep learning OR automatic detection)"
2	Selection of documents with open access, in final stage, English language, subject area 'Engineering' and article or conference paper document type
3	Confirmation of the presence of the keywords 'YOLO and pavement distress'
4	Documents where the YOLO algorithm has actually been used to detect road pavement distress

In phase 1, data was collected through an advanced search using a set of terms relevant to the use of the YOLO algorithm for road pavement distress detection. The following terms and logical operators were selected as essential for the documentary search: "YOLO AND (pavement distress OR pavement inspection) AND (deep learning OR automatic detection)".

Then, in phase 2, the results were filtered to include only open access publications, ensuring that all selected articles were freely available to anyone interested. In addition, the search was restricted to documents written in English, in a final stage of publication and to articles and conference papers.

Next, in phase 3, the presence of the terms 'YOLO' and 'pavement distress' in the documents was checked.

Finally, in phase 4, the articles were refined to include only those that described research on use of the YOLO algorithm to detect pavement distress, including those that used hybrid models (use of YOLO along with other algorithms).

As a result of the selection process, 16 documents were considered (Table 2).

### 3 ANALYSIS OF RESEARCH TRENDS

This section aims to identify the main research trends related to the use of the YOLO algorithm in pavement distress detection, based on the selection of documents obtained.

Table 2 presents the basic information contained in the documents selected for this study.

The studies are sorted by year, from the oldest to the most recent, and the authors, journal or conference, country, subject area and keywords are also presented. Most of the studies cited are recent, highlighting the new

and rapid advancement of artificial intelligence techniques and their growing application in pavement management. The field is expanding, with continued growth and innovation expected.

The chosen subject area was engineering, but there are many others, such as computer engineering, mathematics, physics and materials science, which appear simultaneously in the journal and proceeding information.

Most of the documents cited in this research were published in high-impact international scientific journals, while only two of the papers analysed were presented in conference proceedings.

As the research focused on the application of the YOLO algorithm, the keyword YOLO appears in 8 of the 16 documents analysed. The word 'deep learning' or similar also appears in 8 documents, related to the detection of distress (appears 7 times) in asphalt pavements, with particular emphasis on cracking (appears 4 times) and potholes (appears 2 times).

There is also significant participation from Asian countries, whose dominance can be attributed to government policies that encourage technological development and prioritise investment in artificial intelligence. This scenario reflects the commitment of Asian countries to lead innovation in this field. In addition, Europe and the Americas, especially North America, have shown significant growth in research and development of technologies related to artificial intelligence, consolidating themselves as important regions for research and application of these innovations.

Table 3 provides relevant information on the characteristics of the studies analysed in each document.

In table 3, the column 'Country' shows the geographical distribution of scientific publications, with China standing out as the main contributor with 5 of the 16 documents selected, followed by the United States with 3. This predominance can be attributed to government policies that encourage research and prioritise investment in this area.

The 'Pavement type' column, as previously indicated in the keywords analysis, shows that the pavement type studied is mostly asphalt, with only one case study developed on a concrete pavement.

Concerning the road environment, most of the studies were carried out in urban areas. Only one study was carried out in rural areas, reflecting the greater attention paid to urban roads, which suffer more wear and tear due to intensive use and less developed pavement management systems.

With regard to the version of the YOLO algorithm used, the most recent publications use the latest versions of the algorithm, reflecting technological developments that improve pavement distress detection. Most of the documents analysed also compare the results obtained using different versions of the algorithm, highlighting the superiority of the latest versions.

Table 2 - Basic information related to the documents selected. (Part 1/3)

Year	Title	Authors (Quote)	Journal/Proceedings	Subject area	Keywords	Doc N.º
2019	Asphalt pavement pothole detection using deep learning method based on YOLO neural network	Ukhwah, E.; Yuniarno, E.; Suprpto, Y. (UKHWAH et al., 2019)	International seminar on intelligent technology and its application (ISITIA)	Engineering	Pothole detection, YOLO, Computer vision, Detection, Distress detection	1
2020	Deep machine learning approach to develop a new asphalt pavement condition index.	Majidifard, H.; Adu-Gyamf, Y.; Buttlar, W. (MAJIDIFARD et al.,2020)	Construction and Building materials. ScienceDirect	Engineering	Pavement monitoring, Pavement distresses detection, Deep learning, Google API, Machine learning, Pavement condition prediction, YOLO, Image processing	2
2020	Pavement image datasets: A new benchmark dataset to classify and densify pavement distresses	Majidifard, H.; Adu-Gyamf, Y.; Buttlar, W. (MAJIDIFARD et al.,2020)	TRR Journal of the transportation research board	Engineering	-	3
2020	Pavement distresses detection and classification based on YOLO network	Du, Y.; Pan, N.; Xu, Z.; Deng, F.; Shen, Y.; Kang, H. (DU et al., 2020)	International journal of pavement engineering	Engineering	Pavement distress, Object detection, Image classification, YOLO network	4
2022	Detection of pothole for repair works of asphalt flexible pavement optimization using YOLO	Halim, M.; Ibrahim, A.; Osman, M.; Kader, M.; Termizi, M.; Abu, A. (HALIM et al., 2022)	AIP conference proceedings	Engineering	-	5
2022	Computers Vision Based pothole detection under challenging conditions	Bucko, B.; Lieskovska, E.; Zábovska, K.; Zábovsky, M. (BUCKO et al., 2022)	Sensors	Engineering	Pothole detection, Pavement distress, YOLO v3	6

Table 2 - Basic information related to the documents selected. (Part 2/3)

<b>Year</b>	<b>Title</b>	<b>Authors (Quote)</b>	<b>Journal/Proceedings</b>	<b>Subject area</b>	<b>Keywords</b>	<b>Doc N.º</b>
2022	Pothole and patch detection on asphalt pavement using deep convolutional neural network	Espínola, A.; Freitas, G.; Júnior, E. (ESPÍNOLA et al., 2022)	CILAMCE-PANACM-2021	Engineering	Pavement defect, Convolutional Neural Network, YOLO	7
2023	Automated distress detection, classification and measurement for asphalt urban pavements using YOLO	Conti, P.; Lird, A.; Cid, H. (CONTI et al., 2023)	Engineering proceeding	Engineering	Asphalt pavement, Urban pavements, Distress detection, Deep learning, Convolutional Neural Network	8
2023	Automated pavement crack detection with deep learning methods: What are the main factors and how to improve the performance?	Gong, H.; Tesic, J.; Tao, J.; Luo, X.; Wang, F. (GONG et al., 2023)	TRR Journal of the transportation research board	Engineering	Data and data science, Deep learning, Pavement condition evaluation, Cracking, Detection	9
2023	Road deterioration detection: A machine learning based system for automated paved pavement crack identifications and analysis	Ganeshan, D.; Sharif, M.; Apeageyi, A. (GANESHAN et al., 2023)	International conference on innovation and intelligence for information, computing and technologies (3ICT)	Engineering	Object detection, YOLO, Data, Pavement distress identification, Automated	10
2023	A deep learning network model for road pavement damage detection from urban street view imagery	Ren, M.; Zhang, X.; Chen, X.; Zhou, B.; Feng, Z. (REN et al., 2023)	Internacional journal of Applied Earth observation and geoinformation	Engineering	Pavement damage, YOLO v5, Street-view images, Deep learning	11

Table 2 - Basic information related to the documents selected. (part 3/3)

<b>Year</b>	<b>Title</b>	<b>Authors (Quote)</b>	<b>Journal/Proceedings</b>	<b>Subject area</b>	<b>Keywords</b>	<b>Doc N.º</b>
2024	Crack YOLO: Rural pavement distress detection model with complex scenarios	Sun, Y.; Song, W.; Zhang, J.; Teng, Q. (SUN et al., 2024)	Electronics	Engineering	Crack detection, Deep learning, Rural roads, Hybrid attention mechanism	12
2024	Automatic detection of urban pavement distress and dropped objects with a compressive dataset collected via smartphone	Xu, L.; Fu, K.; Ma, T.; Tang, F.; Fan; J. (XU et al., 2024)	Buildings	Engineering	Pavement distress, Dropped objects, Semantic segmentation	13
2024	Automated pavement cracks detection and classification using deep learning	Naffa, S.; Ashour, K.; Mohamed, R.; Essam, H., Emad, D.; Elhenawy, M., Ashqar, H., Hassan, A.; Alhadidi, T. (NAFFA et al., 2024)	International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI)	Engineering	Deep learning, Management, Signs, Detection, Pavement crack detection	14
2024	Real time pavement crack detection based on artificial intelligence	Ya'acob, N.; Zuraimi, M.; Rahman, A.; Yusof, A.; Ali, D. (YA'ACOB et al., 2024)	Journal of advanced research in applied sciences and engineering technology	Engineering	Crack, Pavement, Road, Damages, Machine Learning	15
2024	Research and optimization of YOLO based method for automatic pavement detect detection	Yao, H.; Fan, Y.; Wei, X.; Liu, Y.; Cao, D.; You, Z. (YAO et al., 2024)	Electronic research archive (AIMS)	Engineering	Pavement engineering, Pavement distress, Object detection, Optimization strategy, YOLO algorithm	16

Table 3 - Document characterization according to the application of YOLO in pavement distress detection. (Part 1/3)

Doc N.	Country	Pavement type	Enviroment	Yolo version	Type of pavement distress	Source or method used to capture images	N. of images	Positioning	Image size (Pixel)
1	Indonesia	Asphalt	Urban road	YOLO-V3	Photole	Pavement view camera	448	Unspecified	1280x960, 1624x1234, 2048x1536 and 512x384
2	United States	Asphalt	Urban road	YOLO-V2	Reflective crack, transverse crack, block crack, longitudinal crack, alligator crack, sealed reflective crack, lane longitudinal crack and pothole	Google Street View	7237	GPS coordinates of the Google Street View images	Unspecified
3	United States	Asphalt	Urban road	YOLO-V2	Reticular crack, transversal crack, block crack, longitudinal crack, sealed transversal crack, lane longitudinal crack, alligator cracks and potholes	Google Street View	7237	GPS coordinates of the Google Street View images	Unspecified
4	China	Asphalt	Urban road	YOLO-V3	Transversal crack, longitudinal crack alligator crack, pothole, patches and manholes	Unspecified	45788	Unspecified	1920x1080
5	Malaysia	Asphalt	Urban road	YOLO-V4	Photole	Iphone 7 camera	130	Unspecified	416x416
6	Slovakia	Asphalt	Urban road	YOLO-V3	Photole	Unspecified	2099	Unspecified	1920x1080
7	Brazil	Asphalt	Urban road	YOLOV4, YOLOV5 and YOLOV7	Pothole and patches	Garmin VIRB ultra 30 action camera	360	GPS coordinates of the Google Street View images	224x224, 320x320 and 416x416.

Table 3 - Document characterization according to the application of YOLO in pavement distress detection. (Part 2/3)

Doc N.	Country	Pavement type	Environment	Yolo version	Type of pavement distress	Source or method used to capture images	N. of images	Positioning	Image size (Pixel)
8	Chile	Asphalt	Urban road	YOLOV5 and YOLOV7	Transversal crack, longitudinal crack, fatigue, potholes and patches.	GoPro hero 8 camera	50000	Unspecified	400x400
9	United States	Asphalt	Urban road	YOLOV5	Lane longitudinal crack, longitudinal crack, transversal crack, alligator cracks and pothole	Unspecified	5789	GPS coordinates of the Google Street View images	64x64
10	England	Asphalt	Urban road	YOLOV5 and YOLOV8	Longitudinal crack, patch, transversal crack, manholes and alligator crack.	Unspecified	201	Unspecified	Unspecified
11	China	Asphalt	Urban road	YOLOV5	Longitudinal crack, transversal crack, pothole, patches, alligator crack and manholes.	Google Street View	156304	GPS coordinates of the Google Street View images	1024x1024
12	China	Asphalt	Rural road	YOLOV5 and YOLOV7	Transversal crack, longitudinal crack and reticular crack.	Unspecified	9801	Unspecified	1200x800
13	China	Asphalt	Urban road	YOLOV5, YOLOV7 and YOLO-V8	Longitudinal crack, transversal crack, pothole, alligator crack and oblique crack.	Smartphone	2000	Unspecified	512x512
14	Egypt	Asphalt	Urban road	YOLO-V5 and YOLO-V8.	Longitudinal crack, transversal crack, alligator cracking, pothole, damage crosswalk, damage point and manhole cover.	Smartphone and Google Street View	74420	GPS coordinates of the Google Street View images	600x600, 600x420 and 600x300



Table 3 - Document characterization according to the application of YOLO in pavement distress detection. (Part 3/3)

<b>Doc N.</b>	<b>Country</b>	<b>Pavement type</b>	<b>Enviroment</b>	<b>Yolo version</b>	<b>Type of pavement distress</b>	<b>Source or method used to capture images</b>	<b>N. of images</b>	<b>Positioning</b>	<b>Image size (Pixel)</b>
15	Malaysia	Asphalt	Urban road	YOLO-V5	Transversal crack, longitudinal crack and potholes.	Smartphone Android	9053	GPS coordinates of the Google Street View images	Unspecified
16	China	Concret	Urban road	YOLO-V4, YOLO-V5 and YOLO-V7	Transversal crack, longitudinal crack, alligator crack and pothole.	Unspecified	7710	Unspecified	Unspecified

The type of pavement distress addressed in each study are another very relevant topic. All the articles mention the study of cracks or potholes detection, with the most common damages analysed being longitudinal cracks, transverse cracks, crocodile cracks and potholes. Some studies also refer to the study of patches detection.

The number of images that are used for training the algorithm is also very important, but it varies very much from one study to another (between 130 and 156304 images). As the number of annotated images increases, so does the quality of YOLO's results, i.e. the rate of correct identification of distress increases.

Additional information, such as how these images were obtained, image size, positioning and source or type of camera used to capture images, is also detailed in Table 3.

The studies that provide information on the source of the images refer to the use of images from Google Street View (4 studies) or captured by cameras (3 studies) or smartphones (4 studies), showing a trend towards the use of simplified image capture systems or available data.

Only 7 studies reported on the use of positioning systems, and all of these referred to GPS.

Finally, regarding image size, here too there is a significant variation in the dimensions considered, most likely associated with the equipment used to capture them. However, formats with dimensions of around 400x400 pixels predominate.

## **4 CONCLUSIONS**

The ever-increasing demand for transport has had a significant impact on the integrity of road infrastructure pavements. This phenomenon leads to a progressive deterioration of the pavement surface, reducing the quality of driving conditions and the comfort and safety of road users. This leads to the challenge of improving the management of pavement surface condition in order to ensure immediate and faster repairs to avoid major disruptions.

This paper helps to address this challenge by providing an analysis of recent technological advances in the field, with particular emphasis on the application of the YOLO algorithm to the automatic detection of road pavement surface damage.

After analysing the main aspects of the 16 selected documents, it is concluded that the use of artificial intelligence to assess the condition of road pavements has promising prospects. Factors such as cost-benefit, time savings, quality of the data obtained and advances in technological development compared to existing systems are key elements in the decision to invest in this type of approaches. Furthermore, the results indicate that all the positive points are converging towards the full automation of the pavement condition assessment process in the near future.

In summary, the reviewed studies suggest that YOLO-based pavement condition monitoring systems can improve data treatment, reduce processing time and improve data accuracy. For future work, the main next steps identified in the reviewed articles include:

- Expanding the available datasets by adding additional images of different pavement types and road conditions, covering urban and rural areas, and capturing images in different seasons to cover a wider range of weather variations.
- Improve the resolution of the images to ensure greater accuracy in the results obtained.
- Evaluate other advanced machine learning algorithms for pavement damage detection and integrate software and algorithms through custom programming to optimise the speed and effectiveness of detection processes.
- Define orientation requirements and key information such as the number of images, positioning, pixels and cameras for data collection to aid future research.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the GeoBioTec Research Unit, through the strategic projects UIDB/04035/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04035/2020>) and UIDP/04035/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/04035/2020>), funded by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP/MCTES through national funds (PIDDAC).

## REFERENCES

- [1] MAJIDIFARD, H.; ADU-GYAMF, Y.; BUTTLAR, W. Deep machine learning approach to develop a new asphalt pavement condition index. United States, 2020. Construction and Building materials. ScienceDirect.
- [2] HALIM, M.; IBRAHIM, A.; OSMAN, M.; KADER, M.; TERMIZI, M.; ABU, A. Detection of pothole for repair works of asphalt flexible pavement optimization using YOLO. Malaysia, 2022. AIP conference proceedings.
- [3] YA´ACOB, N.; ZURAIMI, M.; RAHMAN, A.; YUSOF, A.; ALI, D. Real time pavement crack detection based on artificial intelligence. Malaysia, 2024. Journal of advanced research in applied sciences and engineering technology.
- [4] UKHWAH, E.; YUNIARNO, E.; SUPRAPTO, Y. Asphalt pavement pothole detection using deep learning method based on YOLO neural network. Indonesia, 2019. International seminar on intelligent technology and its application (ISITIA).
- [5] SUN, Y.; SONG, W.; ZHANG, J.; TENG, Q. Crack YOLO: Rural pavement distress detection model with complex scenarios. China, 2024. Electronics.
- [6] CONTI, P.; LIRD, A.; CID, H. Automated distress detection, classification and measurement for asphalt urban pavements using YOLO. Chile, 2023. Engineering proceeding.

- [7] GONG, H.; TESIC, J.; TAO, J.; LUO, X.; WANG, F. Automated pavement crack detection with deep learning methods: What are the main factors and how to improve the performance? United States, 2023. TRR Journal of the transportation research board.
- [8] MAJIDIFARD, H.; ADU-GYAMF, Y.; BUTTLAR, W. Pavement image datasets: A new benchmark dataset to classify and densify pavement distresses. United States, 2020. TRR Journal of the transportation research board
- [9] DU, Y.; PAN, N.; XU, Z.; DENG, F.; SHEN, Y.; KANG, H. Pavement distresses detection and classification based on YOLO network. China, 2020. International journal of pavement engineering.
- [10] GANESHAN, D.; SHARIF, M.; APEAGYEI, A. Road deterioration detection: A machine learning based system for automated paved pavement crack identifications and analysis. England, 2023. International conference on innovation and intelligence for information, computing and technologies (3ICT).
- [11] BUCKO, B.; LIESKOVSKA, E.; ZÁBOVSKA, K.; ZÁBOVSKY, M. Computers Vision Based pothole detection under challenging conditions. Slovakia, 2020. Sensors.
- [12] REN, M.; ZHANG, X.; CHEN, X.; ZHOU, B.; FENG, Z. A deep learning network model for road pavement damage detection from urban street view imagery. China, 2023. Internacional journal of Applied Earth observation and geoinformation.
- [13] XU, L.; FU, K.; MA, T.; TANG, F.; FAN, J. Automatic detection of urban pavement distress and dropped objects with a compressive dataset collected via smartphone. China, 2024. Buildings.
- [14] NAFFA, S.; ASHOUR, K.; MOHAMED, R.; ESSAM, H., EMAD, D.; ELHENAWY, M., ASHQAR, H., HASSAN, A.; ALHADIDI, T. Automated pavement cracks detection and classification using deep learning. In: International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI). Egypt, 2024.
- [15] YAO, H.; FAN, Y.; WEI, X.; LIU, Y.; CAO, D.; YOU, Z. Research and optimization of YOLO based method for automatic pavement detect detection. China, 2024. Electronic research archive AIMS.
- [16] ESPÍNOLA, A.; FREITAS, G.; JÚNIOR, E. Pothole and patch detection on asphalt pavement using deep convolutional neural network. CILAMCE-PANACM-2021. Brazil, 2022.
- [17] REDMON, J.; DIVVALA, S.; GIRSHICK, R.; FARHADI, A. You Only Look Once: Unified, real-time object detection. In: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. United States, 2016.



## ANÁLISE DE REDES APLICADA AO APOIO DA POPULAÇÃO IDOSA COM RECURSO SIG

BRANCO, LUÍS (1); SANTOS, BERTHA (2)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [luis.branco@ubi.pt](mailto:luis.branco@ubi.pt)

(2) Universidade da Beira Interior, Unidade de Investigação

GEOBIOTEC-UBI E-mail: [bsantos@ubi.pt](mailto:bsantos@ubi.pt)

### RESUMO

A tendência de envelhecimento da população pode ser uma problemática agravada com o isolamento geográfico dessas pessoas, trazendo consequências relacionadas com a interação social e com o acesso aos bens e serviços presentes nos centros urbanos. Acresce que o aumento da proporção de idosos em zonas rurais remotas pode contribuir para aumentar a sua vulnerabilidade, na medida em que existe menos suporte social disponível. Assim, esta questão não pode ser ignorada e cabe a todos nós - cidadãos, instituições e governo - contribuir para mitigar os problemas que advêm deste fenómeno demográfico. Neste trabalho utilizaram-se procedimentos no âmbito dos Sistemas de Informação Geográfica aplicados aos transportes, para analisar a rede viária, visando a identificação de soluções que assegurem o transporte confortável de pessoas idosas das zonas rurais para as sedes de concelho ou a distribuição bens essenciais a essas populações. Concretamente foram estudadas duas possibilidades: 1) transporte de bens e medicamentos; 2) transporte de pessoas e medicamentos. Para o efeito, os métodos foram adaptados considerando o uso de um veículo elétrico, sendo a sua autonomia considerada como um dos fatores para a eficiência das rotas, cuja periodicidade de visita a cada local se definiu como semanal. O fluxo de trabalho proposto implica previamente uma verificação das características demográficas gerais da zona de estudo, assim como uma avaliação do enquadramento da rede viária com os lugares a visitar. Embora o processo geral não seja desenhado para uma localização específica, a área de estudo foi o Concelho de Seia, Portugal. Os resultados sugerem que é viável a implementação de ambas as soluções estudadas, dando-se preferência à segunda.

**Palavras-chave:** Isolamento da população idosa, zonas rurais remotas, Sistemas de Informação Geográfica, Análise de Rede Viária

## ABSTRACT

The aging population trend can be a problem aggravated by the geographic isolation of these individuals, bringing consequences related to social interaction and access to goods and services in urban centres. Furthermore, the increase in the proportion of elderly people in remote rural areas may contribute to increasing their vulnerability, as there is less social support available. Thus, this issue cannot be ignored, and it falls to all of us—citizens, institutions and government—to help mitigate the problems arising from this demographic phenomenon. In this work, procedures within the scope of Geographic Information Systems applied to transport were used to analyse the road network, aiming to identify solutions that ensure the comfortable transportation of elderly people from rural areas to municipal seats or to deliver essential goods to these populations. Specifically, two main possibilities were studied: 1) transportation of goods and medicines; 2) transportation of people and medicines. For this purpose, methods were adapted considering the use of an electric vehicle, with its autonomy considered as one of the factors for route efficiency. The frequency of visits to each location was defined as weekly. The proposed workflow initially involves a verification of the general demographic characteristics of the study area, as well as an assessment of the road network's fit with the places to be visited. Although the general process is not designed for a specific location, the study area was the Municipality of Seia, Portugal. The results suggest that the implementation of both solutions studied is viable, with preference being given to the second.

**Keywords:** Isolation of the elderly population, remote rural areas, Geographic Information Systems, Road Network Analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento

O envelhecimento da população apresenta uma tendência crescente na União Europeia (UE). Isto significa que estamos perante uma questão demográfica que faz aumentar a proporção de idosos no total da população, com projeções a apontarem para 30% em 2030, representando um aumento de 20 pontos percentuais relativamente ao ano de 1960 [1,2]. Esta dinâmica tem uma incidência mais significativa em zonas rurais remotas, com consequências relacionadas com o isolamento ou dificuldade de acesso a bens e serviços essenciais, destacando-se zonas onde os serviços de transporte público são limitados [1]. A desertificação no interior de Portugal é um fenómeno, em relação ao qual parece não haver consenso sobre se é um aspeto benéfico [3,4] ou prejudicial [5,6] para as zonas “afetadas”. Embora nem sempre percebida [7], a desertificação rural é uma realidade, e ocorre, entre outros motivos, pela falta de oportunidades profissionais que os jovens têm nas áreas rurais, o que se traduz no envelhecimento da população que reside nestes locais.

A localização de muitas zonas rurais é um impedimento à criação de uma rede de transportes públicos que sirva convenientemente as populações, uma vez que o custo pode superar o lucro, pois nem sempre os transportes públicos são encarados como um serviço essencial. Em idades avançadas a carta de condução tende a não ser renovada e acresce que a distribuição por sexo entre condutores idosos é desequilibrada, verificando-se um número de encartados homens consideravelmente superior ao de mulheres, diferença que aumenta com a idade. [8]. A dificuldade da mobilidade agrava-se porque a esperança média de vida é cerca de 5 anos inferior nos homens [9]. Portanto, existe um grupo de pessoas cujos padrões de vida dignos estão em risco e que podem necessitar de apoio. Nesse sentido, com este trabalho pretende-se desenvolver uma solução de apoio a essas populações através da Análise de Redes (AR)(viárias), no âmbito dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que pode constituir um instrumento de apoio à ação das autarquias no âmbito descrito.

A componente da AR em SIG configura-se num processo para determinar as melhores rotas entre diferentes pontos, através da aplicação de algoritmos informáticos. Essas rotas são calculadas num conjunto de linhas e interseções, que representam uma rede e conseqüentemente os percursos possíveis de uma localização para outra, sempre com o objetivo de tornar os percursos o mais eficientes possível, atendendo aos fatores de custo definidos. É uma funcionalidade importante dos SIG e por isso têm sido feitos grandes investimentos no seu desenvolvimento [10]. Esta importância decorre da necessidade que pessoas, empresas ou outras organizações têm em identificar percursos eficientes [10], o que se traduz em poupança de recursos, sem comprometer os propósitos das viagens.

Este trabalho visa a determinação das melhores rotas, para um sistema de transporte de pessoas e de distribuição de medicamentos e bens essenciais às populações idosas. Para atingir este objetivo foi feita uma AR com o fim de criar soluções de transporte semanal de medicamentos e bens para estas localidades e de pessoas para a sede do concelho, incluindo o regresso. O processo implica a realização de estudos a nível de enquadramento, com o objetivo de se conhecerem alguns dados pertinentes à análise e à distribuição dessas populações. Para população idosa, entende-se que sejam pessoas com pelo menos 75 anos. A área de estudo é o Concelho de Seia (Portugal), contudo, os mesmos procedimentos podem ser aplicados a outros concelhos. Os veículos pensados para este estudo são elétricos, devido à sua contribuição para os objetivos de redução de poluentes e neutralidade carbónica, por serem confortáveis a nível sonoro e pela sua crescente aceitação e tendência de proliferação [11,12]. Acresce que existem incentivos europeus que promovem a renovação para frotas elétricas [13].

O artigo é composto por 5 secções. A secção 1 contém informações introdutória, que se constituem como motivação para esta investigação, e alguns conceitos teóricos. Na secção 2 é apresentada a metodologia

usada. Na secção 3 explicam-se os processos e parâmetros utilizados. Na secção 4 são apresentados os resultados e a análise dos mesmos. A discussão de resultados e conclusão encontram-se na secção 5.

## **1.1 Análise de Redes**

Neste contexto, uma rede é um conjunto de arcos interconectados através da qual pode haver circulação, e.g., de veículos. Os arcos constituem a ligação entre nós (vértices), sendo que uma ligação tem um nó inicial e um nó final. Em geral considera-se o sentido da digitalização da linha (arco) como sentido de circulação na rede. Esta circulação pode ser direcionada ou não direcionada [14], em que na primeira as linhas direcionam um vértice para outro e na segunda não há distinção entre o sentido da linha associada aos pares de vértices. Uma rede que representa estradas pode ter elementos direcionados (circulação unidirecional) ou não direcionados (circulação nos dois sentidos). Cada elemento da rede pode ter diferentes características que determinam o seu funcionamento (e.g., velocidades e tempos). Portanto, os elementos da rede, conectividade e determinados atributos ou funções podem ser parametrizados para calcular percursos entre pontos.

O problema fundamental é o de encontrar o percurso mais curto, ou mais rápido, constituindo um dos algoritmos com mais importância na análise de redes [14, 15]. Podem ser conduzidas análises mais complexas, nomeadamente [14,15]: 1) o Equipamento Mais Próximo procura identificar, entre várias opções, qual o mais próximo de um determinado local, assim como a rota otimizada até ele; 2) a Área de Serviço identifica, a partir de um ou vários locais, qual a abrangência em termos de distância percorrida na rede ou tempo de percurso a partir desses locais ou para esses locais; 3) a Localização-Alocação determina qual a melhor localização, entre várias opções, considerando certos pontos de procura; 4) a Matriz de Custo Origem Destino calcula em relação a cada origem os custos para cada destino; 5) e o Problema de Distribuição de Veículos por Rotas, que procura, dada uma frota com  $x$  veículos, responder à questão: quais as rotas mais eficientes a atribuir a cada veículo, garantindo a cobertura desejada?

A AR no âmbito da circulação de veículos pode ser especificada como um SIG aplicado aos transportes (SIG-T), cuja relevância tem vindo a ser destacada e até considerada como uma “das mais importantes aplicações dos SIG” [16]. Vários autores em [16] reconhecem as vantagens da investigação interdisciplinar neste âmbito. Daqui pode concluir-se que algumas técnicas aplicadas em SIG têm de ser desenvolvidas de forma a poderem ser parametrizadas de acordo com os conhecimentos dos especialistas de cada área. Na área dos transportes, existem parâmetros relacionados com a velocidade, autonomia, impacto da declividade, evitar certas zonas (e.g., crime), priorizar determinados percursos, etc. Assim, julga-se importante que a realização de uma solução mantenha em aberto a possibilidade de se ajustarem parâmetros posteriormente. Um dos que tem impacto



significativo é a velocidade. Alguns estudos de aplicação de AR, dependendo do tipo de via, utilizaram velocidades entre 30km/h e 70 km/h, para transporte privado e 20 km/h para o transporte público, em meio urbano [17]. Outro estudo considera valores entre 30km/h e 50km/h para meio urbano e 120 km/h para autoestradas [18].

## 1.2 Declividade e veículos elétricos

Na definição da solução, há a preocupação com a autonomia do veículo elétrico, porque é importante que se perceba se tem condições de percorrer a rota de um dia sem necessidade de recarga. Esta é a principal desvantagem deste tipo de veículos [19]. Vários fatores podem ter influência na autonomia do veículo, incluindo a temperatura, peso, condutor, distância percorrida e declividade, entre outros [20, 21, 22]. Existe particular interesse na declividade, porque é um parâmetro que não depende de fatores ambientais, pontuais ou de comportamento. Onde existem declives acentuados e variações de relevo, esta variável pode ter uma maior importância. Assim, considerou-se necessária a aplicação de uma função à rede que calcule a perda de autonomia, atendendo a fatores de ponderação em função da declividade. Apesar de ser claro que tem uma grande influência, não existem estudos que explicitem uma função geral que relacione a declividade com a autonomia. Yang *et.al.* analisam em [23] esta problemática, na qual consideraram testes com 11 veículos em aceleração, travagem e velocidade constante. Alguns dos resultados podem ajudar a estimar os fatores de perda de autonomia em função do declive. Desse estudo, foram obtidos os valores presentes na Tabela 1. Verifica-se um aumento aproximado de 28% de 1 para 2 graus de declive, 22% de 2 para 3 graus e 56% de 1 para 3 graus. Portanto, existe um aumento de consumo com a consequente perda de autonomia.

**Tabela 1- Consumo em função da declividade [23]**

Declive	Subida			descida		
	1°	2°	3°	1°	2°	3°
Consumo elétrico (10 <sup>6</sup> J)	5.4988	7.0385	8.5913	2.4726	1.8938	1.3576

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Soluções de transporte propostas

Duas abordagens a fim de reduzir as consequências do isolamento da população idosa são consideradas: 1) Pretende-se fazer chegar às populações bens essenciais e medicamentos com uma periodicidade semanal. 2) Pretende-se uma solução híbrida, através da qual sejam entregues medicamentos, mas também transportadas pessoas das suas localidades para a sede do concelho e no sentido inverso.

Na primeira solução, o objetivo é criar uma rota na qual haja uma paragem diária numa farmácia, para recolha de medicamento, e num

supermercado, para recolha de bens, para depois serem distribuídos pelos lugares. Os produtos seriam previamente encomendados pelos utentes, através das Juntas de Freguesia (JF), presencialmente, por telefone ou outro meio a designar. Para otimizar os percursos, terá de ser definido um ponto de entrega, que pode ser a (JF) ou outro. Seria necessário um trabalho de preparação por parte da autarquia para definir corretamente os pontos de entrega, assim como alternativas para quem não tem possibilidade de se deslocar a esses pontos. Para o modelo funcionar, os utentes teriam de estar previamente registados, pagando uma taxa simbólica, dependente da condição económica.

A segunda abordagem também contempla medicamentos, mas com uma vertente de transporte de pessoas das suas localidades para a sede do Concelho, de manhã, com regresso à tarde. Quem não quisesse ou não pudesse viajar, continuaria a ter a possibilidade de receber os medicamentos. O serviço funcionaria semanalmente, periodicidade que se julga suficiente atendendo aos objetivos do serviço a prestar. Seria um serviço de transporte, com condições especiais e, com o mesmo veículo, entregar-se-iam os medicamentos e efetuar-se-ia o transporte de pessoas. As paragens coincidiriam com o ponto de entrega de medicamentos, por uma questão de otimização ou então, dependendo das localidades, seriam consideradas duas paragens, uma para os utentes e outra para utentes e medicamentos. Nesta solução retirou-se a entrega de bens porque seria menos viável logisticamente e porque as pessoas teriam oportunidade de fazer as compras. Prevê-se o desembarque dos passageiros num ponto da cidade que coincida com uma paragem de transportes urbanos, garantindo assim o mínimo de deslocações pedonais.

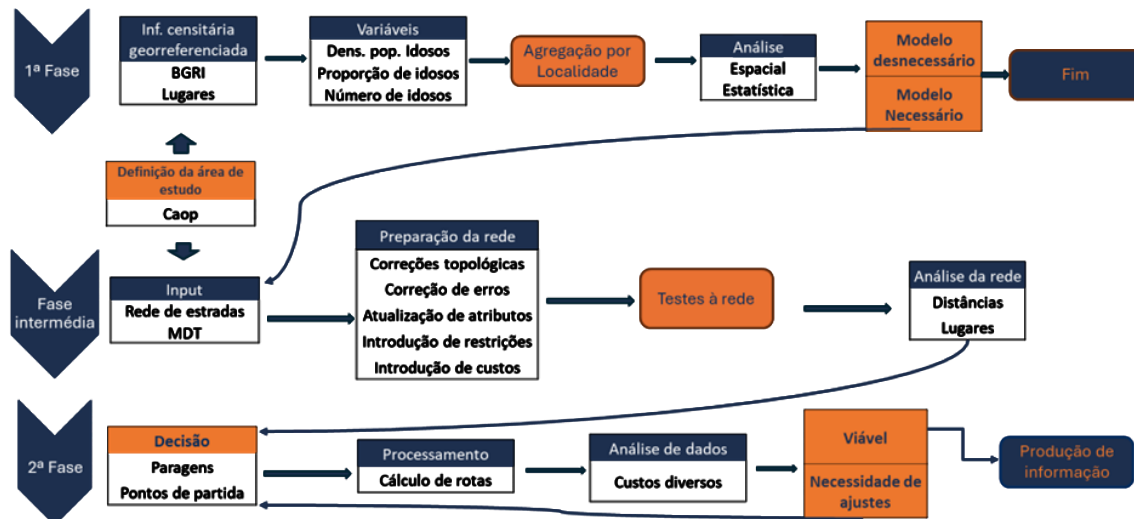
Ambas as abordagens dependeriam de protocolos entre câmaras municipais, farmácias e supermercados. A gestão das transações financeiras ficaria a cargo da autarquia; eventualmente poderia ser aplicável um desconto, que reverteria para a autarquia com o objetivo de minimizar os custos do serviço. O desenho final e especificidades teriam de ser estudados com algum pormenor, para incluir aspetos relacionados com procedimentos administrativos e logística.

## **2.2 Abordagem metodológica**

Numa primeira fase considera-se importante uma análise demográfica da região, para se perceber o grau de necessidade do projeto e algumas características que permitirão calibrar o sistema. Será a fase em que se analisa a densidade populacional de idosos, entre outros dados estatísticos, e a sua distribuição pela região. Numa fase intermédia faz-se a análise global da rede viária, na qual se identificam fragilidades ou dificuldades que contribuirão para a definição do desenho do projeto. Nesta fase prepara-se a rede com todas as correções, condicionantes e critérios. De seguida procede-se à análise global das distâncias e tempos de percurso, utilizando os métodos de análise de redes disponíveis no *software*. Na segunda fase, decide-se qual ou quais os melhores métodos

para determinação de rotas e aplicam-se os mesmos, para de seguida se produzirem os resultados, fazendo-se eventuais correções se necessário. A Figura 1 apresenta o fluxo de trabalho global descrito.

**Figura 1 Fluxo de trabalho global**



### 3 CASO DE ESTUDO

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo é o Concelho de Seia, que pertence ao Distrito da Guarda, Portugal. De acordo com os censos de 2021, o distrito tem 143019 habitantes dos quais 21755 em Seia, com uma densidade populacional de 49.9 hab/km<sup>2</sup>. É um território com características variadas, composto por montanhas, vales, planaltos e várzeas, rios e ribeiros. Tem uma área total de 43569.83 ha, mas apenas 2924.47 ha são lugares estatísticos (aglomerado populacional com 10 ou mais alojamentos destinados à habitação, com designação própria). Estes lugares fazem parte dos dados deste trabalho e foram obtidos na página web do Instituto Nacional de Estatística [24], referentes aos censos de 2021. Os dados dos censos 2021 [24] permitiram determinar a informação que se apresenta em resumo na Tabela 2.

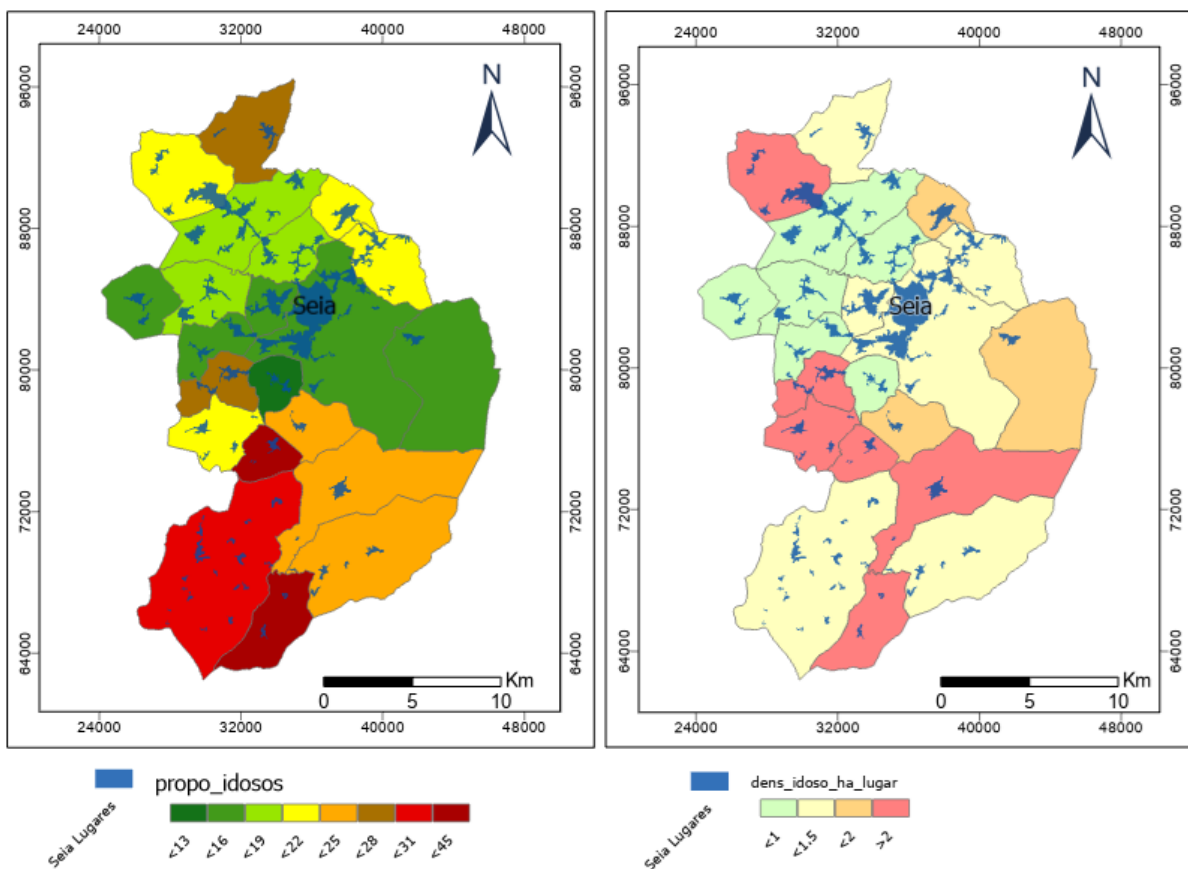
**Tabela 2 - Estatísticas sumárias- Concelho Seia**

Área total (ha)	43568.83
Área lugares estatísticos (ha)	2924.47
Totais indivíduos	21755
Idosos	3832
Propor. Idosos %	17.61
Idosos Homens	1530
Idosos Mulheres	2302
Propor. Mulheres idosas %	60.07

Foram calculadas as densidades populacionais de idosos em função das áreas dos lugares estatísticos. Esta abordagem serve para excluir do

cálculo as vastas zonas não habitadas deste território. A informação tratada permite fazer algumas observações espaciais, como identificar quais as freguesias que contêm lugares com densidade de idosos mais elevadas ou a distribuição da proporção de idosos, relativamente ao total de habitantes. Sobre este último aspeto, verifica-se maior incidência em zonas afastadas da sede do concelho, Seia, conforme ilustrado na Figura 2 à esquerda. A densidade populacional de idosos, por hectare de “área habitável” em cada freguesia, é apresentada na mesma Figura, à direita.

**Figura 2 - Proporção de idosos (%) (à esquerda) e densidade populacional de idosos (à direita)**



Os resultados permitem constatar que a implementação da abordagem proposta tem utilidade no concelho de Seia. Pelo apurado, através dos Censos 2021, o concelho tem 3832 idosos, dos quais cerca de 2022 habitam em Seia ou em localidades próximas servidas pelo VaiVem. Assim, há 1810 pessoas que potencialmente beneficiarão mais com as soluções deste estudo.

### 3.2 Preparação da rede

Foi utilizada a rede viária de Seia proveniente do *openstreet maps*, obtida através do *Geofabrik* [25], cuja operabilidade para este âmbito carece do seguinte tratamento específico: 1) por defeito, o sentido dos arcos foi definido pelo sentido da digitalização destes; 2) os arcos contêm um

campo que indica se a circulação é efetuada apenas num sentido ("F") ou nos dois sentidos ("B"); 3) as rotundas e seus acessos foram tratados de modo a garantir o correto funcionamento dos sentidos. Os dados alfanuméricos da rede incluem o campo 'fclass' para designar a categoria da via, no entanto, houve a necessidade de corrigir a classificação de alguns arcos. O campo 'maxspeed' foi usado para definir a velocidade média para cada arco, conforme se apresenta no código da Figura 3, através do qual se pode perceber as classificações da rede e respectivas velocidades.

**Figura 3 - Código para definição de velocidades**

```

set_max_speed(!fclass!)
def set_max_speed(fclass):
    if fclass in ('primary', 'primary_link'):
        return 60
    elif fclass in ('secondary', 'secondary_link'):
        return 40
    elif fclass in ('tertiary', 'tertiary_link'):
        return 25
    elif fclass in ('living_street', 'residential', 'service', 'unclassified'):
        return 20
    else:
        return 0
set_max_speed(fclass)

```

As velocidades atribuídas foram inicialmente definidas com base nos estudos [17,16]. Acrescenta-se que foi feita uma viagem num transporte público de Seia, designado por "VAleVEM", que opera apenas dentro da zona urbana principal e serve 45 paragens, que serviu para calibrar as velocidades utilizadas na análise e verificar tempos de paragem médios. O referido serviço de transporte também envolve um ligeiro de passageiros com dimensões semelhantes ao que se idealiza neste trabalho. Foram registadas as velocidades de 150 pontos (excluindo zero km/h). A velocidade média observada foi de 27km/h. Posteriormente, com base no conhecimento da área de estudo, foram feitas algumas correções pontuais. Para se estimar a perda de autonomia agravada devido à declividade foi utilizado o Modelo Digital do Terreno (MDT) com 30 m/px de resolução espacial e a partir deste calculados os declives de cada arco da rede. Para determinação do declive  $d$  (%) entre o vértice inicial ( $start_h$ ) e o final ( $end_h$ ) de cada arco de comprimento  $ShapeLeng$ , foi aplicada a expressão (1). Assim, se o sentido da digitalização for uma subida, o declive será positivo, sendo negativo no sentido inverso.

$$d = \frac{end_h - start_h}{ShapeLeng} \times 100 \quad (1)$$

### 3.3 Lotação do veículo e procura do serviço

O veículo idealizado para o serviço proposto é um ligeiro de passageiros com até 22 lugares – dá-se como exemplo a Iveco eDaily Minibus, com uma autonomia de até 200 km e a possibilidade de configurações especiais, incluindo adaptações para pessoas com deficiência motora. Para se encontrar o número potencial de pessoas em cada rota foi feita uma estimativa baseada no número de rotas, nos dados demográficos e

nos dados da população com carta de condução. Tendo em conta o número total de idosos (1179613) e o número de idosos encartados (370747) [8], em Portugal, conclui-se que aproximadamente 31% têm carta de condução. Acresce que muitos são casais, sendo que pelo menos um possui carta de condução, aumentando a taxa de pessoas com veículo e autonomia própria para cerca de 50%. Admitindo uma taxa de adesão de 15% e 7 rotas (duas rotas dividem-se):  $(1800 \times 0.5 \times 0.15) / 7 = 19.28$  pessoas. Ainda assim, as rotas terão de ter alguma margem para admitir a possibilidade de se regressar a algumas freguesias caso a lotação seja esgotada.

### 3.4 Restrições e Custos

Os arcos definidos como 'F' têm sentido único de circulação coincidente com o sentido da digitalização, pelo que, nesses, foi definido como "proibida" a circulação no sentido contrário. A segunda restrição está relacionada com a declividade, tendo-se estabelecido que o algoritmo "evita" (*avoid high*) declives superiores a 10%, quando viável. Foram consideradas duas funções, simétricas, atendendo ao sentido da digitalização, para que seja aplicada apenas no sentido ascendente (subidas). Os custos gerais considerados foram a distância (km), calculada automaticamente, e o tempo de percurso (minutos), determinado em função da velocidade considerada para cada arco. Considerou-se importante analisar a perda de autonomia (Km), em cada percurso, incorporando na mesma o parâmetro declividade, cujos fatores são os apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Fatores de custo para a Autonomia em função da distância**

Declive (%)	Fator de Custo
≤ 2	1
≤ 5	1.2
≤ 10	1.5
> 10	2

De acordo com o estudo [23], os consumos podem aumentar entre 20% e 30% por cada grau de declividade. Como não foi aplicada nenhuma função que "reduza" a perda de autonomia nas descidas, entendeu-se não aplicar tal variação nos declives menos acentuados, uma vez que existem algumas fragilidades que podem influenciar este parâmetro. Por outro lado, para declividades superiores, considerou-se necessária uma penalização mais forte, como se pôde ver na Tabela 3.

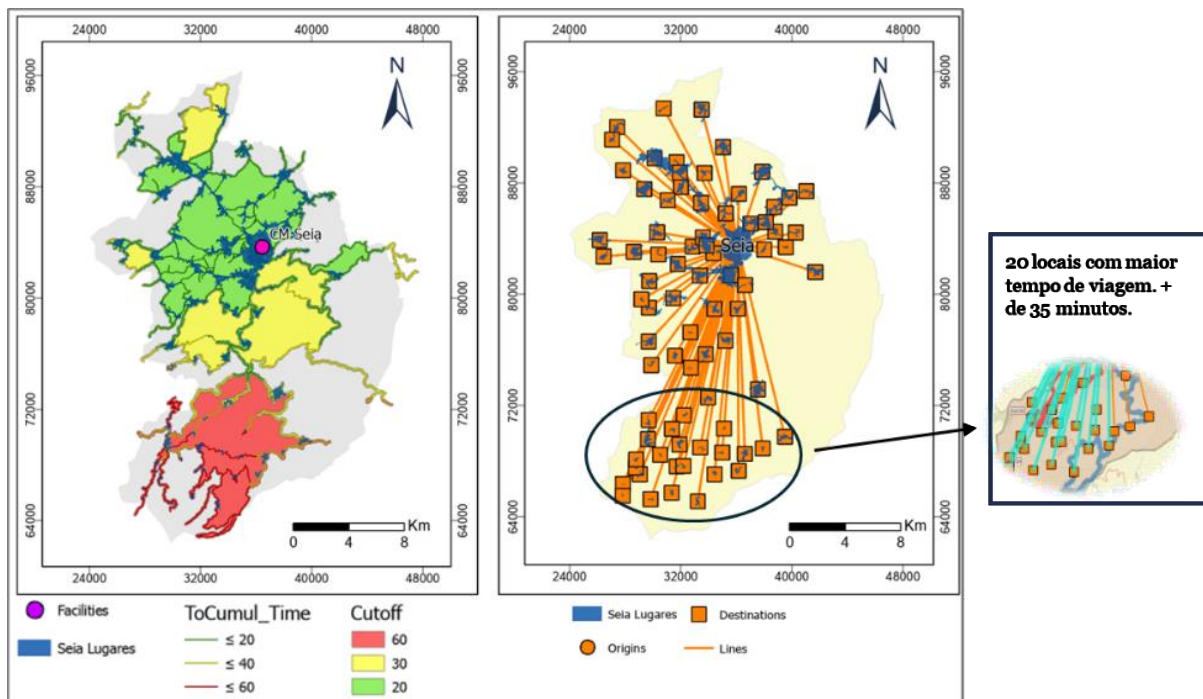
## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Análise geral da rede

A Figura 13 à esquerda mostra uma análise do tipo "Área de Serviço", com "cortes" de 20, 30 e 60 minutos a partir da área urbana de Seia. Os polígonos das áreas de serviço mantiveram-se para se perceber que

existem várias áreas que não são servidas por estradas, daí alguns terem cor diferente da estrada que os atravessa, e ao mesmo tempo para se perceber a “divisão” do concelho (a azul estão representados os polígonos dos lugares). Percebe-se que a parte mais a sul é a mais distante, em termos de tempo de percurso, enquanto a parte mais a norte encontra-se maioritariamente a menos de 20 minutos de Seia. A agravar, as zonas mais distantes de Seia não se encontram próximas de outros concelhos, portanto, são pequenos aglomerados bastante isolados. Isto reforça que a segunda solução analisada neste trabalho deve dar preferência a um veículo confortável e razoavelmente rápido. Foi ainda realizada uma análise Matriz de Custo Origem Destino, usando-se como origem Seia (7.7077188°W 40.4197989°N) e destinos os centroides dos polígonos dos lugares. O lugar mais distante é Teixeira de Cima, a 45 km, e o que tem maior tempo de percurso é Gondufo, a 54 minutos de Seia e a uma distância de 35km. Em média, os lugares ficam a uma distância de 16.6 km com tempo de percurso de 21 minutos e 15 segundos. O resultado desta análise encontra-se na Figura 4 à direita.

**Figura 4 - Análise Área de Serviço (à esquerda) e Matriz de Custo Origem destino (à direita)**



## 4.2 Determinação das rotas

### 4.2.1. Primeira Solução: Distribuição de bens e medicamentos

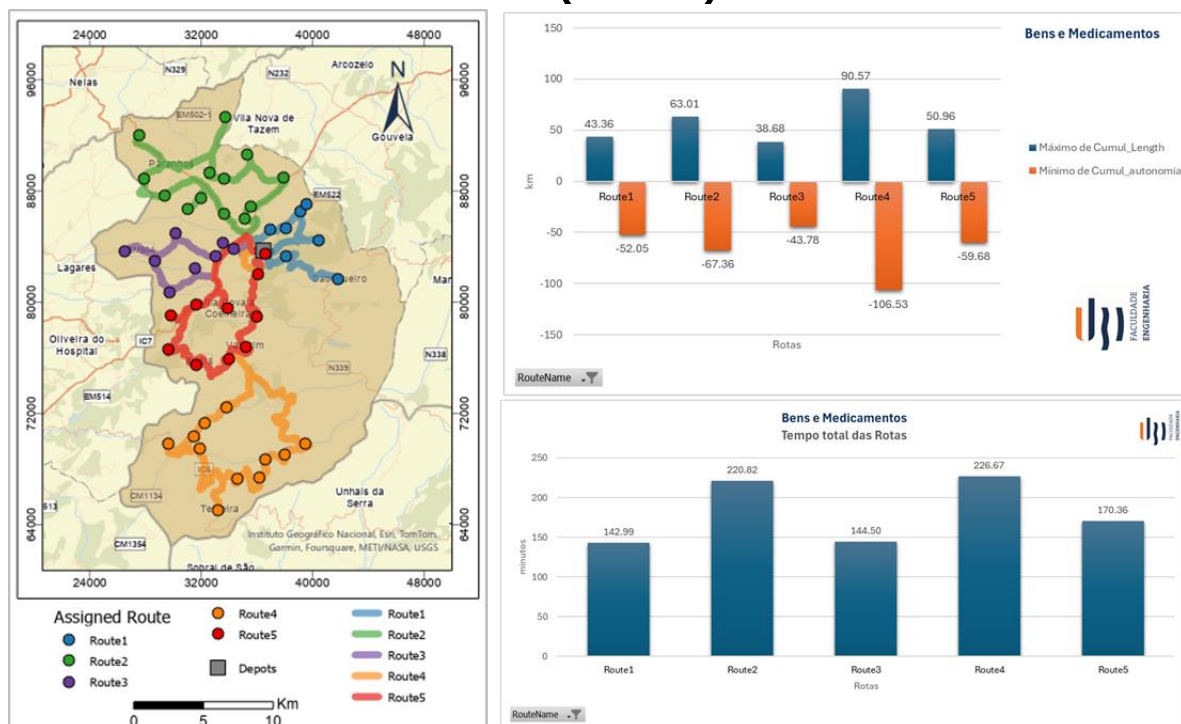
A rota desta solução segue o fluxograma que se apresenta na Figura 5

**Figura 5 - Fluxo da Rota Bens e Medicamentos**



Definiram-se 5 rotas, uma para cada dia, sendo fixas e diárias as paragens na farmácia e supermercado. Escolheram-se pontos de distribuição em cada localidade, próximos da JF, ou outros considerados adequados. Foi definido um tempo de paragem de 5 min na farmácia, 10 min no supermercado e entre 8 e 10 min nos pontos de distribuição. Para cálculo da rede, aplicou-se o método do *Vehicle Routing Problem (VRP)*, ajustando-se o modelo para simular 5 veículos (um par cada dia). Foi garantido que a primeira paragem do dia fosse a farmácia e a segunda o supermercado, através de limites impostos por janelas temporais, 10 min e 25 minutos, respetivamente, a partir das 8h00. O resultado é apresentado na Figura 6, à esquerda. Com o VRP não foi possível calcular a perda de autonomia, pelo que as 5 rotas determinadas foram posteriormente calculadas individualmente. Os gráficos da mesma Figura apresentam os valores resumidos obtidos para cada rota. A perda de autonomia máxima ocorre na rota 4 e é de 106.53 km. Esta rota tem uma extensão de 90.57 km, verificando-se um agravamento de 15.96 km devido aos efeitos da declividade. Também é a rota com maior duração (226.67 min.), com uma chegada prevista de regresso à CM às 11h46.

**Figura 6 - Rota Bens e Medicamentos (à esquerda) e gráfico resumo das rotas (à direita)**



### 4.3 Segunda Solução: Transporte de pessoas e distribuição de medicamentos

Além da lotação, é necessário considerar um tempo de percurso razoável e a viagem de retorno. Procurou-se dividir as rotas aproximadamente com a mesma configuração da solução anterior, através da criação de 5 conjuntos de pontos (*features*), um para cada dia, conforme a sequência diária apresentada na Figura 7.

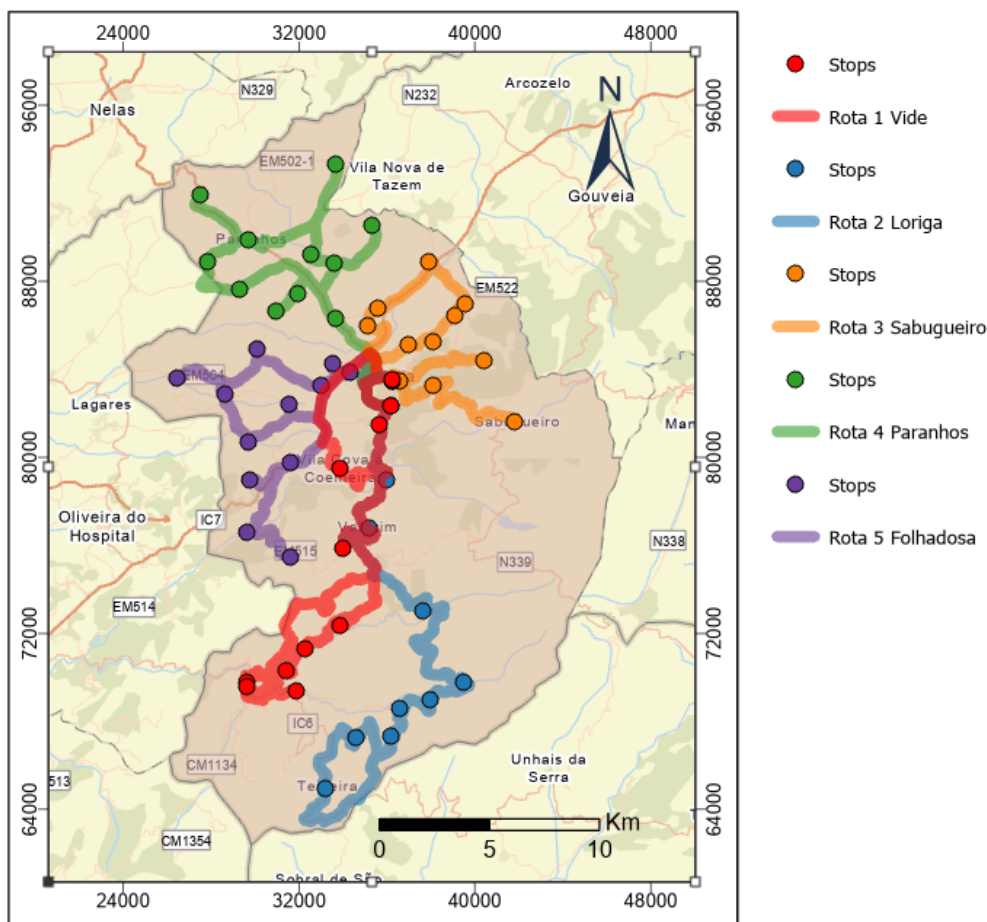


**Figura 7 - Sequência do Percurso Diário - segunda solução**



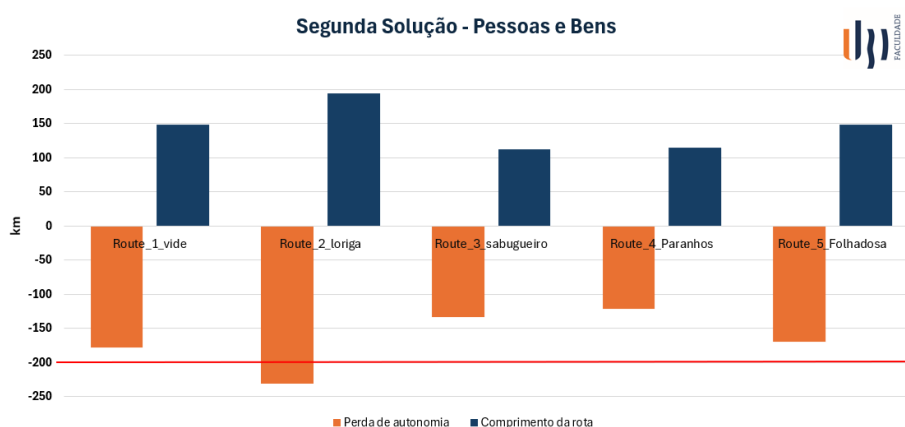
Cada rota inicia às 7h00 e o retorno é às 16h. Considerou-se o tempo de paragem na farmácia de 5 min, nas JF de 5 min e nas restantes paragens de 2 min. O resultado pode ser visualizado na Figura 8. Devido à extensão das rotas 3 e 5, houve a necessidade de as dividir, isto é, numa parte da rota há um regresso intermédio à estação rodoviária, ainda da parte da manhã, e outro na parte da tarde, para garantir o serviço nas localidades previstas.

**Figura 8 - Transporte de pessoas e distribuição de medicamentos**



Também houve a necessidade de corrigir a sequência de algumas paragens de modo a ajustar o tempo de percurso e para garantir alguma margem em caso de sobrelotação. A rota 2 é um exemplo, pois foi ajustada de modo que o passageiro da localidade mais distante seja o primeiro a entrar. O gráfico na Figura 9 é um resumo da distância e perda de autonomia de cada rota. A linha vermelha assinala o limite da autonomia (200 km), portanto, existe necessidade de recarga intermédia na rota 2, o que pode ser efetuado após o desembarque do último passageiro na parte da manhã.

**Figura 9 - Distância e autonomia Rotas Pessoas e Bens**



A Tabela 4 apresenta um extrato dos dados obtidos diretamente do software, filtrada para a rota 5, apenas com uma formatação de cores. Esta rota foi escolhida como exemplo porque é uma das que foi dividida. Façamos uma breve análise do percurso: 1) o veículo sai da estação às 07h30; 2) recolhe os medicamentos; 3) o primeiro passageiro embarca às 07h46; 4) os passageiros da primeira viagem desembarcam às 09h02; 5) o primeiro passageiro da segunda viagem embarca às 9h17; 6) os passageiros da segunda viagem desembarcam às 10h18. À tarde, os primeiros passageiros embarcam às 16h30 e os segundos às 17h35. O último chega à sua localidade às 18h15, totalizando 35 minutos de viagem de regresso. Pode verificar-se que a perda de autonomia é de cerca de 170 km, deixando ainda uma margem de cerca de 30km caso não seja possível recarregar o veículo durante o dia.

**Tabela 4 – Dados da Rota 5 (Transporte de Pessoas e Bens)**

Name	Route	ArriveTime	DepartTime	Cumul_Time	Cumul_autonomia	Cumul_Length
Estacao	Route_5_Folhadosa	07:30	07:30	0.00	0.00	0.00
Farmacia	Route_5_Folhadosa	07:35	07:40	10.15	-4.68	3.62
Santiago	Route_5_Folhadosa	07:46	07:48	18.30	-10.58	8.98
Santiago JF	Route_5_Folhadosa	07:48	07:53	23.31	-10.59	8.99
Folgosa Salvador	Route_5_Folhadosa	07:55	07:57	27.77	-11.89	10.24
folgosa madalena	Route_5_Folhadosa	08:00	08:02	32.95	-13.98	12.06
Sameice	Route_5_Folhadosa	08:08	08:09	39.45	-17.88	15.87
Travancinha	Route_5_Folhadosa	08:16	08:18	48.50	-23.01	20.90
Travancinha JF	Route_5_Folhadosa	08:18	08:23	53.50	-23.01	20.91
Santa Eulalia	Route_5_Folhadosa	08:28	08:30	60.47	-26.74	24.11
Santa Eulalia JF	Route_5_Folhadosa	08:30	08:35	65.55	-26.77	24.14
varzea	Route_5_Folhadosa	08:42	08:44	74.05	-30.47	27.16
Carragozela	Route_5_Folhadosa	08:51	08:53	83.05	-34.15	30.20
Estacao_Seia5A	Route_5_Folhadosa	09:02	09:04	94.96	-42.97	37.93
Folhadosa	Route_5_Folhadosa	09:17	09:19	109.95	-55.99	49.70
Sandomil	Route_5_Folhadosa	09:30	09:32	122.61	-62.69	55.99
Corgas	Route_5_Folhadosa	09:40	09:45	135.24	-68.01	59.64
Torrozele	Route_5_Folhadosa	10:01	10:03	153.51	-78.07	68.16
Torrozele JF	Route_5_Folhadosa	10:03	10:08	158.52	-78.08	68.17
Estacao_Seia5B	Route_5_Folhadosa	10:18	16:30	540.00	-88.41	77.58
Santiago	Route_5_Folhadosa	16:34	16:36	546.37	-92.43	81.10
Folgosa Salvador	Route_5_Folhadosa	16:38	16:40	550.85	-93.74	82.36
folgosa madalena	Route_5_Folhadosa	16:44	16:46	556.02	-95.83	84.18
Sameice	Route_5_Folhadosa	16:51	16:51	561.52	-99.73	87.99
Travancinha	Route_5_Folhadosa	16:58	17:00	570.57	-104.86	93.02
Santa Eulalia	Route_5_Folhadosa	17:05	17:07	577.54	-108.59	96.23
varzea	Route_5_Folhadosa	17:14	17:16	586.13	-112.32	99.28
Carragozela	Route_5_Folhadosa	17:23	17:25	595.12	-116.00	102.32
Estacao_Seia5C	Route_5_Folhadosa	17:35	17:37	607.06	-124.84	110.06
Torrozele	Route_5_Folhadosa	17:47	17:49	619.36	-135.44	119.35
Folhadosa	Route_5_Folhadosa	17:53	17:55	625.38	-138.14	122.05
Sandomil	Route_5_Folhadosa	18:06	18:08	638.05	-144.85	128.34
Corgas	Route_5_Folhadosa	18:15	18:20	650.67	-150.17	131.99
Estacao_Seia5D	Route_5_Folhadosa	18:44	18:44	674.70	-169.39	148.91

## **5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES**

Pela análise demográfica realizada na fase inicial, identificaram-se fragilidades sociais relacionadas com o envelhecimento da população e isolamento dos idosos na área estudada, em quantidade significativa, confirmando-se o interesse de aplicação do projeto ao concelho de Seia. A fase intermédia promoveu um conhecimento mais detalhado da rede de estradas do concelho, permitindo perceber que alguns dos lugares teriam de ser excluídos das rotas, por serem demasiado remotos e não terem população suficiente que justificasse os “desvios” necessários.

A última fase revelou que o projeto é exequível. No entanto, alguns pormenores carecem de estudo adicional, para traduzirem melhor o número de utentes do serviço. A análise da “Área de Serviço” e da “Matriz Origem Destino” (fase intermédia) comprova que as rotas semanais não suportariam uma visita semanal a todos os lugares, pelo menos para a segunda solução, atendendo aos critérios definidos, principalmente na zona mais a sul do concelho. Isto confirma-se pela análise aos horários gerados. Para contornar esta questão seria necessário outro veículo ou uma solução combinada, abdicando-se da rota de Pessoas e Bens num dos dias e aplicando-se, nesse dia, apenas a solução de Bens e Medicamentos. A Rota dos Bens e Medicamentos é mais fácil de implementar em comparação com a de Pessoas e Medicamentos. Esta última pode operar no limite do tempo aceitável para uma viagem confortável, relativamente a alguns lugares mais remotos, contudo seria a mais desejável.

A questão da declividade pode trazer alguns desafios. O método usado para cálculo da perda de autonomia aparentemente funciona bem, contudo seria desejável uma melhor resolução espacial do MDT. Ainda assim, considera-se ter sido uma melhor aproximação comparando com a possibilidade de não ter sido incluída a declividade.

Os métodos de análise de rede foram eficazes e permitiram exportar um conjunto de dados completo em formato de tabela, facilitando a leitura de horários e custos. Esses dados não precisam de muito tratamento, além da formatação, antes de serem disponibilizados aos interessados.

Conclui-se que o modelo tem potencial para ser implementado em diferentes regiões, desde que se salvaguardem e corrijam as oportunidades de melhoria identificadas.

### **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi apoiado pela Unidade de Investigação GeoBioTec, através dos projetos estratégicos UIDB/04035/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04035/2020>) e UIDP/04035/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/04035/2020>), financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC).

## REFERÊNCIAS

- [1] AUGÈRE-GRANIER, M.-L., McELDOWNEY, J. Older people in the European Union's rural áreas. European Parliamentary Research Service, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2861/114962>. Acesso em abril de 2024.
- [2] EUROSTAT. Ageing Europe - Looking At The Lives Of Older People In The EU. Publications Office of the European Union, 2020. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/11478057/KS-02-20-655-EN-N.pdf>. Acesso em: abril 2024.
- [3] PALMA, N. A desertificação do interior não é um problema. Eco Sapo, 2014. Disponível em: <https://eco.sapo.pt/opiniao/a-desertificacao-do-interior-nao-e-um-problema/>. Acesso em: abril de 2024.
- [4] TAMEN, M. A favor da desertificação do interior. Observador, 2016. Disponível em: <https://observador.pt/opiniao/favor-da-desertificacao-do-interior/>. Acesso em: abril 2024.
- [5] TOUREIRO, A. Estudo da desertificação no Alentejo: causas, consequências e estratégias atenuadoras Universidade de Évora. 2006. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/15854>. Acesso em: abril 2024.
- [6] CORREIA, A. Um dos maiores problemas que afeta o interior do país é a desertificação. A Voz de Trás-os-Montes, 2024. Disponível em: <https://www.avozdetrasosmontes.pt/um-dos-maiores-problemas-que-afeta-o-interior-do-pais-e-a-desertificacao/>. Acesso em: abril 2024.
- [7] ROXO, M., CASIMIRO, P. Desertificação em Portugal – Perceção Pública. Universidade Nova de Lisboa. Disponível em: [https://research.unl.pt/ws/portalfiles/portal/34143243/Artigo\\_revista\\_APROFGEO.pdf](https://research.unl.pt/ws/portalfiles/portal/34143243/Artigo_revista_APROFGEO.pdf). Acesso em: abril 2024.
- [8] IMT. Anuário Estatístico de Mobilidade e Transportes 2021. Instituto da Mobilidade e dos Transportes, 2021. Disponível em: <https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Noticias/Paginas/AnuarioEstatisticoMobilidadeTransportes2021.aspx>. Acesso em: abril de 2024
- [9] INE. Destaques Estatísticos de Mobilidade. Instituto Nacional de Estatística, 2020. Disponível em: [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_destaques&DESTAQUES\\_dest\\_boui=613423139&DESTAQUESmodo=2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUES_dest_boui=613423139&DESTAQUESmodo=2). Acesso em: abril de 2024
- [10] John R. Jensen, Ryan R. Jensen INTRODUCTORY GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS. 2013. Pearson Education, Inc. United States of America.
- [11] EEA. Electric vehicles. European Environment Agency, 2024. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/electric-vehicles>. Acesso em: abril de 2024
- [12] STATISTA. Life Cycle Emissions Savings of Electric Cars. 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/chart/25412/life-cycle-emissions-savings-of-electric-cars/>. Acesso em: abril de 2024.

- [13] PORTUGAL. Portaria n.º 109/2024/1, de 18 de março. Diário da República.
- [14] Yang, C., Yu, M., Huang, Q., Li, Z., Sun, M., Liu, K., Jiang, Y., & Xia, J.). Introduction to GIS Programming and Fundamentals with Python and ArcGIS®. 2017. CRC Press, Taylor & Francis Group
- [15] Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2011). An Introduction to Geographical Information Systems<sup>12</sup> (4th ed.). Pearson Education Limited.
- [16] SHAW, S.-L. Geographic information systems for transportation: from a static past to a dynamic future. *Annals of GIS*, v. 16, n. 3, p. 129-140, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19475683.2010.513155>. Acesso em: abril de 2024.
- [17] TOMÉ, A.; SANTOS, B.; CARVALHEIRA, C. GIS-Based Transport Accessibility Analysis to Community Facilities in Mid-Sized Cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 471, p. 062034. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/6/062034>. Acesso em: abril de 2024
- [18] SILVA, D. Sistemas de Informação Geográfica para Transportes. 2020. Universidade Nova de Lisboa. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/8444/1/TSIG0012.pdf>. Acesso em: abril 2024
- [19] ACP. Vantagens e Desvantagens dos Eléctricos. Automóvel Club de Portugal. Disponível em: <https://www.acp.pt/eletricos/comprar-carro-eletrico/vantagens-e-desvantagens-dos-eletricos>. Acesso em: abril de 2024
- [20] SOY INQUIETO. What is the Ideal Electrical Autonomy for a Full Working Day? 2020. Disponível em: <https://www.soyinquiето.com/en/blog/what-is-the-ideal-electrical-autonomy-for-a-full-working-day/>. Acesso em: abril de 2024.
- [21] Lee, H., Kim, K., Kim, N., & Cha, S. W. Energy efficient speed planning of electric vehicles for car-following scenario using model-based reinforcement learning<sup>1</sup>. *Applied Energy*, 313, 118460. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118460>. Acesso em: abril de 2024
- [22] Zhang, J., Fan, Q., Wang, M., Zhang, B., & Chen, Y. Robust Speed Tracking Control for Future Electric Vehicles under Network-Induced Delay and Road Slope Variation. *Sensors*, 22(5), 1787. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22051787>. Acesso em: abril de 2024
- [23] Yang, S.C., Li, M., Lin, Y., & Tang, T.Q. Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 402, 41-48. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.01.062>. Acesso em: abril de 2024
- [24] INE. Mapas 2021. Instituto Nacional de Estatística, 2021. Disponível em: <https://mapas.ine.pt/download/index2021Seccoes.phtml>. Acesso em: abril 2024
- [25] GEOFABRIK. Mapas e dados geográficos. Disponível em: <https://www.geofabrik.de/>. Acesso em: abril de 2024



**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING



## DESAFIOS DA AVALIAÇÃO ONLINE NO ENSINO SUPERIOR

<sup>1,2</sup> PINHEIRO, MANUEL; <sup>1,2</sup> FAZENDEIRO, PAULO

<sup>1</sup> Departamento de Informática, UBI, Portugal

<sup>2</sup> Instituto de Telecomunicações, UBI, Portugal

<sup>1</sup> [manuel.pinheiro@ubi.pt](mailto:manuel.pinheiro@ubi.pt)

<sup>2</sup> [pandre@di.ubi.pt](mailto:pandre@di.ubi.pt)

### RESUMO

Nos últimos anos, o avanço da tecnologia e a disseminação da internet têm impulsionado transformações significativas no campo do ensino superior. O modelo de ensino online, também conhecido como e-learning, tem se desta-cado como uma alternativa viável e acessível para estudantes de todo o mundo, possibilitando o acesso a cursos e programas de instituições de ensino superior sem a necessidade de estarem fisicamente presentes em salas de aula convenci-onais. Essa mudança paradigmática tem impactado não apenas a forma como o ensino superior é oferecido, mas também as estratégias de avaliação utilizadas nesse contexto. A avaliação desempenha um papel crucial na educação, pois é por meio dela que se mensura o progresso dos estudantes, identifica-se suas lacunas de conhecimento e se verifica o alcance dos objetivos de aprendizagem. No entanto, a transição para o ensino superior online traz consigo desafios específicos no que diz respeito à avaliação dos estudantes. Este artigo tem como objetivo fornecer uma visão geral abrangente da avaliação no ensino superior online, explorando suas características, desafios e melhores práticas. O estudo analisa as diferentes abordagens de avaliação utilizadas, os instrumentos e métodos empregados, bem como as questões éticas e a validade dos resultados obtidos. No final, são apresentadas recomendações para o aprimoramento das práticas de avaliação no ensino superior online.

**Palavras-chave:** Ensino à Distância, Ensino Superior Online, Avaliação, Tecnologia Educacional, Desafios.

### ABSTRACT

*In recent years, advances in technology and the spread of the internet have driven significant transformations in the field of higher education. The online teaching model, also known as e-learning, has emerged as a viable and accessible alternative for students all over the world, enabling them to access courses and programs at higher education institutions without the need to be physically present in conventional classrooms. This paradigmatic shift has impacted not only the way higher education is*

*offered, but also the assessment strategies used in this context. Assessment plays a crucial role in education, as it is through assessment that students' progress is measured, their knowledge gaps identified, and the achievement of learning objectives verified. However, the transition to online higher education brings with it specific challenges regarding student assessment. This article aims to provide a comprehensive overview of assessment in online higher education, exploring its characteristics, challenges and best practices. It looks at the different assessment approaches used, the instruments and methods employed, as well as ethical issues and the validity of the results obtained. At the end, recommendations are presented for improving assessment practices in online higher education.*

**Keywords:** *Distance Learning, Online Higher Education, Assessment, Educational Technology, Challenges.*

## **1 INTRODUÇÃO**

A incorporação da Internet nos processos educativos, especialmente no Ensino Superior, tem impulsionado uma profunda reflexão e uma necessária reestruturação dos paradigmas educacionais tradicionais [1]. As Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) têm evoluído de forma acelerada, exigindo das Instituições de Ensino Superior uma abordagem cautelosa e proativa. Esta evolução rápida cria um cenário repleto de novas oportunidades, mas também de desafios para o campo educativo, tornando fundamental que as instituições se adaptem e aproveitem eficazmente as inovações tecnológicas emergentes.

A pandemia de COVID-19, por sua vez, teve um impacto significativo no setor educacional, incluindo o ensino superior. As universidades foram forçadas a adaptar-se rapidamente, implementando o ensino online e enfrentando desafios inerentes à utilização das tecnologias educacionais [2].

Segundo os autores em [3], a transição súbita das atividades presenciais para o ensino online, motivada pela pandemia, trouxe dificuldades consideráveis, mas também abriu oportunidades para explorar soluções inovadoras, favorecendo uma maior integração do ensino online no futuro.

Conforme apontado em [2], a preparação das universidades para oferecer um ensino online de qualidade, ajustado às necessidades dos estudantes, constitui um desafio real. Este compromisso exige investimentos significativos em recursos humanos especializados, infraestrutura tecnológica adequada e sistemas eficientes de gestão e avaliação da aprendizagem.

A avaliação online tornou-se um elemento essencial no ensino superior à distância. Assim, torna-se crucial adotar uma abordagem estratégica que assegure que a transição para o ambiente virtual se faça com



excelência acadêmica, sustentabilidade operacional e sucesso na formação dos estudantes.

Este artigo explora a avaliação no ensino superior online, discutindo as suas características, desafios e melhores práticas. Através da análise de diferentes abordagens, instrumentos e métodos de avaliação, bem como de questões éticas e de validade dos resultados, pretende-se contribuir para o aperfeiçoamento das estratégias de avaliação neste contexto virtual de aprendizagem.

## **2 ARQUITETURA DOS SISTEMAS DE AVALIAÇÃO ONLINE**

A arquitetura de um sistema de avaliação online costuma incluir múltiplos componentes e camadas, concebidos para oferecer funcionalidades abrangentes. Normalmente, estes sistemas integram uma interface web para a interação com os utilizadores, um mecanismo de avaliação para o processamento das submissões e um repositório de dados para o armazenamento de perguntas, resultados e informações dos utilizadores [4 e 5].

A arquitetura pode ser baseada em serviços web e barramento de serviços corporativos (ESB) para integrar diferentes subsistemas e permitir escalabilidade [6].

Componentes comuns incluem ferramentas de autoria para criar questões, motores de avaliação para interpretar e exibir conteúdo, e repositórios para armazenar itens de teste [4].

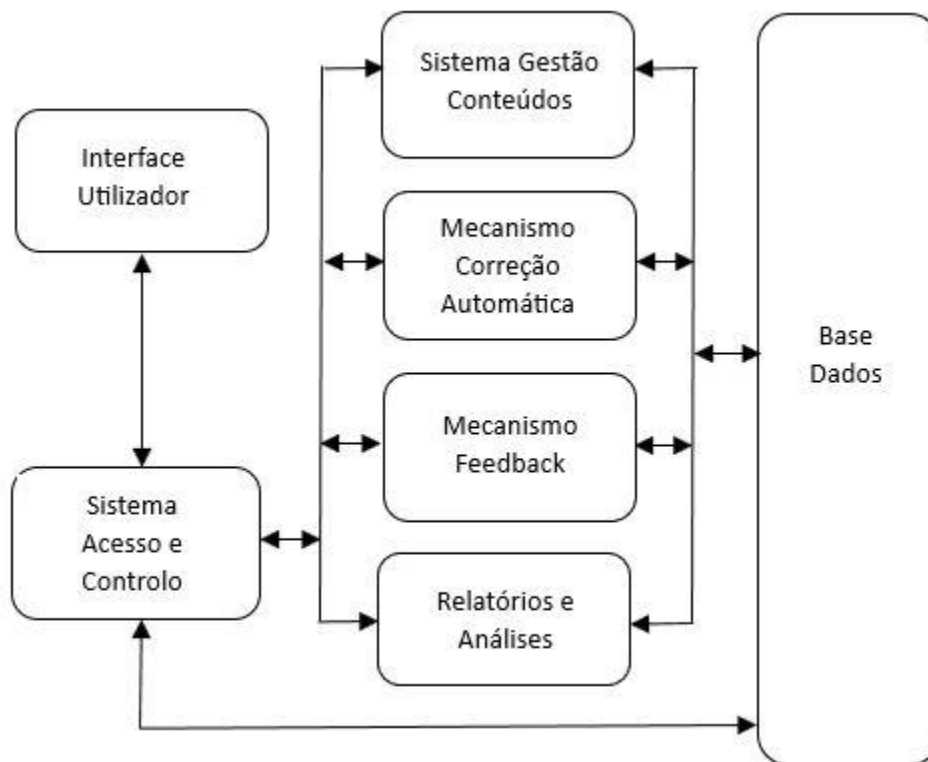
Alguns sistemas incorporam recursos avançados como avaliação dinâmica em tempo real e suporte à decisão [7].

A implementação pode envolver desafios como gerenciamento de mudanças organizacionais, alocação de recursos e desenvolvimento de competências da equipe [8].

Em resumo, a arquitetura de sistemas de avaliação *online* é complexa e multifacetada, integrando componentes para criação, entrega, processamento e análise de avaliações. O design deve considerar requisitos como interoperabilidade, escalabilidade e segurança, além de incorporar tecnologias emergentes para melhorar a experiência e os resultados da avaliação.

Com base nos estudos realizados pelos autores anteriormente referidos, foi desenvolvido o esquema da arquitetura básica de um sistema de avaliação online, conforme representado na Figura 1.

**Figura 1** - Arquitetura básica de um sistema de avaliação online



**Fonte:** Elaboração própria

A arquitetura do sistema de avaliação online apresentada é composta pelos seguintes elementos:

- **Interface do utilizador:** É a parte do sistema com a qual os estudantes interagem. Pode ser um site, uma plataforma *LMS* (*Learning Management System*) ou uma aplicação móvel. A interface do utilizador permite que os estudantes tenham acesso às avaliações, visualizem as instruções, respondam às perguntas e submetam suas respostas.
- **Sistema de acesso e controlo:** É responsável por apresentar as avaliações aos estudantes de acordo com as configurações estabelecidas. Pode incluir recursos como temporizadores, controlo de acesso, sistema de perguntas aleatórias, exibição de uma pergunta por vez, entre outros.
- **Sistema de gestão de conteúdo:** É responsável pelo armazenamento e organização das perguntas e materiais de avaliação. Pode incluir recursos para criação, edição e revisão de perguntas, bem como a criação de bancos de questões para uso futuro.
- **Mecanismo de correção automática:** Em muitos sistemas de avaliação online, existe um mecanismo de correção automática para avaliar as respostas dos estudantes e fornecer resultados imediatos. Isso pode ser feito com base em respostas pré-determinadas, como

escolha múltipla, ou com base em lógica programada para avaliar respostas abertas.

- Mecanismo de *feedback*: É importante fornecer *feedback* aos estudantes sobre suas respostas e desempenho na avaliação. Isso pode ser feito automaticamente pelo sistema, fornecendo explicações ou soluções para as perguntas, ou pelos professores, por meio de comentários personalizados.
- Relatórios e análises: O sistema de avaliação online geralmente fornece relatórios e análises sobre os resultados das avaliações. Isso permite que os professores identifiquem tendências, avaliem o desempenho dos estudantes e tomem decisões informadas para melhorar o processo de avaliação e a aprendizagem dos estudantes.
- Base de dados: É onde todas as informações relacionadas com as avaliações são armazenadas. Isso inclui perguntas, respostas dos estudantes, resultados, notas e histórico de avaliações. A base de dados permite o armazenamento seguro e organizado de dados relevantes ao sistema de avaliação online.

### **3 CARACTERIZAÇÃO DA AVALIAÇÃO ONLINE NO ENSINO SUPERIOR**

A avaliação do desempenho dos estudantes no ensino superior online traz consigo desafios e oportunidades únicas. No que se segue apresentam-se algumas das características-chave desse novo paradigma, cf. [9-13]:

- Abordagem centrada no aluno: A avaliação no ensino superior online busca promover a aprendizagem ativa e significativa, envolvendo os alunos como protagonistas de seu próprio processo de avaliação. Isso pode envolver a participação em atividades autônomas, projetos, estudos de caso, discussões em fóruns, entre outros.
- Flexibilidade e Acessibilidade: Por meio do uso de plataformas de aprendizagem online, os alunos desfrutam de maior flexibilidade ao realizar avaliações, eliminando as limitações de tempo e espaço geralmente associadas ao ensino presencial. Isso proporciona oportunidades para que estudantes que trabalham, têm responsabilidades familiares ou estão em fusos horários diferentes possam ter acesso à educação e serem avaliados de forma mais conveniente.
- Diversidade de Formatos de Avaliação: Uma característica marcante da avaliação no ensino superior online é a variedade de formatos avaliativos disponíveis. Além dos tradicionais testes escritos, os alunos podem ser avaliados por meio de projetos individuais ou em grupo, apresentações, discussões online, portfólios digitais, simulações, entre outros. Essa diversidade de formatos permite uma avaliação mais abrangente e alinhada às necessidades de aprendizagem específicas de cada unidade

curricular. Cada método possui vantagens e desvantagens, e a escolha adequada depende da natureza do conteúdo a ser avaliado e dos resultados esperados.

- **Avaliação formativa:** A avaliação no ensino superior online está cada vez mais voltada para a avaliação formativa, ou seja, avaliação contínua ao longo do processo de aprendizagem, fornecendo feedback regular e orientações para os alunos. Isso permite que eles façam ajustes e melhorias em seu desempenho.
- **Utilização de Tecnologias Digitais:** Um aspecto central do paradigma atual da avaliação no ensino superior online é a utilização de tecnologias digitais para a realização e gestão das avaliações. Plataformas de aprendizagem online, sistemas de gestão de aprendizagem e outras ferramentas tecnológicas são utilizadas para criar e administrar avaliações, fornecer feedback aos alunos, acompanhar seu progresso e armazenar resultados. Essas tecnologias permitem maior eficiência na avaliação, automatização de processos, acesso rápido aos resultados e possibilidade de análise de dados para melhorar as práticas de ensino e aprendizagem.

Com base nos estudos realizados por [9-13], foram identificadas várias tecnologias digitais que podem ser empregadas na avaliação do ensino superior online, conforme evidenciado pelos estudos de diferentes autores. Dentre as opções disponíveis, merecem destaque as seguintes tecnológicas:

- **Plataformas de aprendizagem virtual:** Plataformas como *Moodle*, *Google Classroom*, *Blackboard Learn*, *Canvas*, *Schoology* e *Sakai* são sistemas de gestão de aprendizagem (do inglês *Learning Management Systems - LMS*) amplamente utilizadas no ensino superior online para gerir o processo de avaliação. Elas oferecem recursos para criar questionários, testes, atribuições e fornecer *feedback* aos alunos.
- **Ferramentas de *feedback* e comunicação:** Em alguns casos, as avaliações *online* podem ser realizadas em tempo real por meio de videoconferência. Plataformas populares como *Zoom*, *Microsoft Teams*, *Google Meet* e *Slack* podem ser utilizadas para conduzir avaliações orais, entrevistas ou discussões em grupo.
- **Ferramentas de avaliação formativa:** Essas ferramentas permitem a criação de questionários interativos, atividades de autoavaliação e avaliação por pares. Exemplos incluem o *Kahoot*, *Socrative* e *Peergrade*.
- **Sistemas de gestão de avaliação:** São ferramentas específicas para gerir o processo de avaliação, incluindo a criação de bancos de perguntas, a administração de testes, a atribuição de notas e a geração de relatórios. Exemplos incluem o *ExamSoft*, *Respondus* e *Questionmark*.

- Ferramentas de questionário online: Existem várias ferramentas disponíveis para criar e administrar questionários online, como o *Google Forms*, *SurveyMonkey* e *Typeform*. Essas ferramentas permitem criar perguntas de múltipla escolha, perguntas abertas e outros tipos de perguntas para avaliação.
- Sistemas de resposta de clique (*clickers*): Os sistemas de resposta de clique permitem que os alunos respondam a perguntas durante a aula ou em avaliações online usando dispositivos eletrônicos, como smartphones, tablets ou controles remotos. Essas respostas são então coletadas e registradas pelo sistema. Exemplos de sistemas de resposta de clique incluem o *TurningPoint*, *iClicker* e *Poll Everywhere*.
- Ferramentas de vídeo e áudio: Em algumas avaliações, pode ser necessário que os alunos gravem vídeos ou áudios como parte da tarefa. Nesses casos, ferramentas de gravação e compartilhamento de vídeo, como o *Kaltura* ou o *Panopto*, podem ser usadas para os alunos enviarem suas respostas em formato de vídeo ou áudio.
- Ferramentas de submissão e avaliação de trabalhos: Plataformas como *Turnitin*, *SafeAssign*, *Urkund* e *Grammarly* são amplamente usadas para a submissão de trabalhos e a detecção de plágio. Essas ferramentas verificam a originalidade do trabalho dos alunos comparando-o com uma base de dados de conteúdo existente.
- Ferramentas de controlo online: Para garantir a integridade acadêmica durante os exames online, são usadas ferramentas de controlo que monitoram a atividade dos alunos. Essas ferramentas podem incluir a gravação de vídeo, a detecção de movimentos suspeitos e o monitoramento remoto em tempo real. Exemplos de ferramentas de controlo online são o *ProctorU*, *Examity* e *Proctorio*.

É importante observar que as tecnologias digitais utilizadas na avaliação *online* estão em constante evolução, e novas soluções podem surgir ao longo do tempo. O uso dessas tecnologias pode variar de acordo com as políticas e diretrizes de cada instituição educacional ou organização responsável pela avaliação.

#### **4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES DA AVALIAÇÃO NO ENSINO SUPERIOR ONLINE**

A avaliação online no ensino superior apresenta diversos desafios e oportunidades, conforme evidenciado pelos estudos analisados. A transição para o ensino remoto emergencial durante a pandemia de COVID-19 acelerou a adoção de práticas de avaliação online, trazendo à tona questões importantes sobre sua eficácia e implementação [14 e 15].

Os principais desafios identificados incluem: exclusão digital dos alunos, impactos na saúde dos professores, dificuldades no processo de ensino-aprendizagem, novas demandas pedagógicas e precarização do trabalho docente [14]. Questões de segurança, validade e justiça

também foram apontadas como preocupações na implementação de exames online [16]. Além disso, o conhecimento limitado das plataformas de ensino online, treinamento profissional inadequado e preocupações com desonestidade acadêmica foram relatados como desafios enfrentados pelos educadores [17].

Por outro lado, os estudos também destacam benefícios potenciais da avaliação online, como maior confiabilidade na atribuição de notas e eficiência em termos de tempo, esforço e custos [16]. A experiência com o ensino remoto emergencial também foi vista como uma oportunidade de aprendizado e desenvolvimento profissional para os educadores [17]. Para superar os desafios identificados, são necessárias medidas urgentes e efetivas, especialmente por parte do poder público, visando a equalização social, o acesso às tecnologias digitais e o investimento em capacitação profissional [14].

## **5 TENDÊNCIAS E PERSPETIVAS FUTURAS**

No presente artigo, foi explorada uma visão geral da avaliação no ensino superior online, discutindo os elementos-chave e os desafios enfrentados nesse contexto educacional. Nesta seção, serão abordadas as tendências emergentes e as perspectivas futuras que moldarão a avaliação no ensino superior. A seguinte discussão está baseada nas referências [18-27]:

- **Utilização de Inteligência Artificial e Análise de Dados:** Uma tendência promissora para o futuro da avaliação no ensino superior online é a incorporação de tecnologias como inteligência artificial (IA) e análise de dados. A IA pode ser utilizada para fornecer feedback personalizado e adaptativo aos alunos, identificar padrões de aprendizagem e sugerir estratégias de melhoria. Além disso, a análise de dados pode auxiliar na identificação de tendências e padrões de desempenho dos alunos, possibilitando ajustes nas abordagens de ensino e avaliação.
- **Avaliação Baseada em Competências:** Uma perspectiva futura é a crescente adoção da avaliação baseada em competências no ensino superior online. Nesse modelo, o foco se desloca dos conteúdos teóricos para as habilidades e competências que os alunos devem desenvolver. A avaliação é projetada para medir a aplicação prática dessas competências em cenários reais, incentivando a aprendizagem autêntica e relevante.
- **Avaliação Contínua e Formativa:** Uma tendência emergente é a mudança de uma abordagem pontual e sumativa de avaliação para uma abordagem contínua e formativa. A avaliação contínua envolve a monitorização regular do desempenho dos alunos ao longo do curso, fornecendo feedback imediato para apoiar a sua progressão e identificar áreas de melhoria. Essa abordagem permite ajustes e intervenções oportunas, promovendo uma aprendizagem mais efetiva e personalizada.

- **Personalização da Avaliação:** No futuro, espera-se uma maior personalização da avaliação no ensino superior online. Isso envolve a adaptação das estratégias e formatos de avaliação de acordo com as necessidades e características individuais dos alunos. Através do uso de tecnologias avançadas, os sistemas de avaliação podem se tornar mais flexíveis, adaptáveis e personalizados, levando em consideração o ritmo de aprendizagem, as preferências e os estilos individuais de cada estudante.
- **Avaliação Autêntica e Baseada em Projetos:** Outra tendência futura é o aumento da utilização de avaliação autêntica e baseada em projetos no ensino superior online. Essa abordagem envolve a realização de tarefas e projetos significativos, que simulem situações reais de trabalho e exijam a aplicação prática do conhecimento e habilidades adquiridos. A avaliação é baseada no desempenho dos alunos nessas tarefas, permitindo uma avaliação mais contextualizada e alinhada às demandas do mundo profissional.

Em suma, as tendências e perspectivas futuras da avaliação no ensino superior online apontam para um cenário cada vez mais adaptado às necessidades dos alunos e ao contexto digital. A incorporação de tecnologias avançadas, a ênfase nas competências, a avaliação contínua e formativa, a personalização e a autenticidade da avaliação são elementos que moldarão a forma como os alunos são avaliados e como a aprendizagem é aprimorada nesse ambiente online. Essas tendências oferecem oportunidades significativas para melhorar a eficácia, a relevância e a qualidade da avaliação no ensino superior online, contribuindo assim para uma educação mais eficaz e alinhada com as necessidades do século XXI.

## **6 CONSIDERAÇÕES ÉTICAS E LEGAIS**

A ética e a legislação são elementos fundamentais para garantir a integridade, a validade e a justiça na avaliação no ensino superior online. É essencial que os professores e as instituições estejam cientes dessas considerações e cumpram as regulamentações aplicáveis. Nesta seção, serão abordadas essas temáticas, com base nas perspectivas e conhecimentos de diversos autores [27-31].

### **6.1 Considerações éticas**

No contexto do ensino superior *online*, a avaliação deve ser realizada considerando-se princípios éticos sólidos. Algumas considerações éticas importantes incluem:

- **Confidencialidade:** Os dados pessoais dos estudantes devem ser protegidos e tratados com confidencialidade. Os resultados individuais da avaliação devem ser mantidos em sigilo, garantindo a privacidade dos estudantes.
- **Equidade:** Todos os estudantes devem ter igualdade de oportunidades na avaliação, independentemente de sua localização

geográfica, acesso a recursos tecnológicos ou deficiências físicas. Medidas devem ser adotadas para garantir que nenhum estudante seja prejudicado devido a barreiras tecnológicas ou outras limitações.

- **Plágio e fraude:** É essencial combater o plágio e a fraude acadêmica no ensino superior online. Os estudantes devem ser orientados sobre as práticas de integridade acadêmica e os sistemas de detecção de plágio devem ser implementados para garantir a originalidade do trabalho dos estudantes.
- **Transparência:** Os critérios de avaliação devem ser claramente comunicados aos estudantes, incluindo as expectativas em relação à qualidade do trabalho, as regras sobre colaboração e citação de fontes, e os métodos utilizados para a atribuição de notas.

## **6.2 Legislação e regulamentação**

Além das considerações éticas, a legislação desempenha um papel fundamental na garantia da validade e da confiabilidade dos processos de avaliação no ensino superior online. Algumas áreas importantes de legislação relacionadas à avaliação incluem:

- **Proteção de dados:** As instituições de ensino superior devem cumprir as leis de proteção de dados, garantindo que as informações pessoais dos estudantes sejam coletadas, armazenadas e utilizadas de acordo com as regulamentações aplicáveis.
- **Acessibilidade:** As instituições devem atender às leis de acessibilidade, garantindo que os estudantes com deficiência tenham igualdade de acesso aos materiais e às atividades de avaliação.
- **Propriedade intelectual:** As leis de propriedade intelectual devem ser respeitadas, com a devida atribuição de crédito às fontes utilizadas e a garantia de que os direitos autorais sejam protegidos.
- **Direitos dos estudantes:** As instituições devem garantir que os direitos dos estudantes sejam protegidos durante os processos de avaliação, incluindo o direito a recursos de apelação e revisão de notas.

## **7 RECOMENDAÇÕES E BOAS PRÁTICAS**

Com base nos desafios mencionados anteriormente e de acordo com as opiniões expressas em diferentes trabalhos (e.g. [27-31]), a seguir são fornecidas algumas sugestões para melhorar a avaliação no contexto do ensino superior online:

- É essencial fornecer suporte e treinamento adequados aos professores para que possam planejar e realizar avaliações efetivas no ambiente online.



- Os desafios devem ser abordados de forma proativa, desenvolvendo estratégias e soluções que minimizem seus impactos negativos e maximizem os benefícios da avaliação no ensino superior online.
- Deve-se avaliar e selecionar cuidadosamente as ferramentas tecnológicas de acordo com as necessidades específicas do ensino superior. Considerar a usabilidade, a escalabilidade, a segurança e a acessibilidade das ferramentas, além de garantir que estejam alinhadas com os objetivos de aprendizagem e avaliação.
- Antes de selecionar as ferramentas e métodos de avaliação, é de capital importância o estabelecimento de objetivos claros para a avaliação. Isso ajudará a direcionar a escolha de estratégias adequadas para medir o desempenho dos alunos no ambiente online.
- É essencial a implementação de medidas para assegurar a autenticidade e a integridade das avaliações online. Isso pode incluir o uso de tecnologias de controle online, a criação de bancos de questões variadas, o estabelecimento de prazos rigorosos e a utilização de ferramentas de detecção de plágio.
- É importante fornecer feedback significativo, personalizado e oportuno aos alunos. Utilizar ferramentas de feedback online, como comentários escritos, gravações de áudio ou vídeo, para auxiliar no desenvolvimento dos alunos e na compreensão de seus pontos fortes e fracos.
- Deve ser promovida a investigação centrada em áreas específicas relacionadas com esta temática. Destacam-se o desenvolvimento e a validação de novas estratégias de avaliação online, a investigação de abordagens mais eficazes para garantir a autenticidade e a integridade acadêmica, a exploração do impacto do feedback e da interação no processo de avaliação online, e a análise comparativa entre a avaliação *online* e a avaliação presencial em termos de qualidade e eficácia.
- Devem ser criadas oportunidades para a interação e a colaboração entre os alunos no ambiente online. Isso pode ser feito por meio de fóruns de discussão, grupos de trabalho online, atividades de aprendizagem colaborativa e projetos em equipe. A interação entre os alunos não só melhora o envolvimento e a participação, mas também promove a construção coletiva do conhecimento.
- Em vez de depender exclusivamente de testes tradicionais, é recomendável diversificar os formatos de avaliação. Isso inclui a incorporação de projetos, trabalhos em grupo, apresentações, portfólios e discussões online. Essa abordagem permitirá que os alunos demonstrem suas habilidades e conhecimentos de maneiras diferentes, promovendo uma avaliação mais abrangente.

É fundamental ter sempre em consideração a perspectiva dos estudantes e dos professores no que diz respeito às suas percepções, experiências e

necessidades relacionadas com a avaliação online. Estudos permanentes que investiguem o envolvimento dos alunos, a motivação e a satisfação com a avaliação online podem fornecer insights valiosos para o aprimoramento contínuo das práticas de avaliação.

## **8 CONCLUSÃO**

Neste artigo, foi realizada uma análise da avaliação no ensino superior online, visando aprofundar a compreensão desse contexto educacional em constante transformação. Os resultados obtidos fornecem *insights* valiosos para professores, instituições de ensino e profissionais da área da educação *online*. Esses resultados podem ser aplicados no desenvolvimento de estratégias de avaliação mais eficientes e adequadas ao ambiente virtual.

A avaliação no ensino superior online apresenta vantagens como flexibilidade de horários, acesso a recursos digitais e ampliação do alcance geográfico. Contudo, foram identificadas algumas questões desafiadoras, como a necessidade de garantir a autenticidade dos resultados, a ausência de interação presencial e a constante necessidade de adaptação às novas tecnologias e metodologias emergentes.

É recomendável diversificar os formatos de avaliação, promover a interação e o feedback ativo dos estudantes e garantir a integridade acadêmica com tecnologias de controlo online e implementação de outras medidas de segurança apropriadas. Além disso, é essencial capacitar os professores para aproveitar plenamente as tecnologias disponíveis e explorar o potencial da avaliação online no ensino superior.

No desfecho do artigo, além das recomendações para aprimorar a avaliação no ensino superior online, também foram abordadas questões éticas e legais, que desempenham um papel fundamental na garantia da integridade, validade e equidade nesse contexto.

As instituições de ensino superior devem estar atentas aos desafios da avaliação online, buscando soluções inovadoras e aprimorando constantemente suas práticas. Recomenda-se explorar as melhores práticas e inovações tecnológicas nesse campo em constante evolução.

Por último, é esperado que este artigo seja um marco de referência para estudos futuros que abordem a avaliação no ensino superior online. A exploração bibliográfica apresentada neste estudo oferece uma visão abrangente das práticas atuais, desafios emergentes, tendências atuais e perspectivas futuras no campo da avaliação no ensino superior online.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Instituto de Telecomunicações (IT), pólo da UBI, pelo acolhimento durante grande parte do tempo dedicado à realização deste trabalho. Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através

da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UIDB/50008/2020, com o identificador DOI, <https://doi.org/10.54499/UIDB/50008/2020>.

## REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, L. et al. Inovação pedagógica no ensino superior: Cenários e caminhos de transformação. Lisboa: Agência de Avaliação e Acreditação do Ensino Superior, 2022.
2. MASTAN, I. A. Evaluation of distance learning system (e-learning): A systematic literature review. 2022.
3. MEDINA-GUILLEN, L. F.; BARBOZA-PALOMINO, M.; CAMACHO-MORA, I. Workload in a group of Latin American teachers during the COVID-19 pandemic. *Uniciencia*, v. 35, n. 2, p. 1-13, 2021.
4. BOUSSAKUK, M.; BOUCHBOUA, A.; OUREMCHI, R.; GHAZI, M. E. Online assessment system based on IMS-QTI specification. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/cmt.2019.8931309>. Acesso em: 08 set. 2024.
5. WATANOBE, Y.; RAGE, U. K.; PENUGONDA, R.; RAHMAN, M. M. Online automatic assessment system for program code: Architecture and experiences. In: Springer, 2021, p. 272–283. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79463-7\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79463-7_23). Acesso em: 08 set. 2024.
6. PURSKY, O.; KULAZHENKO, V.; KHARCHENKO, O.; SELIVANOVA, A.; DEMIDOV, P. E-trade management system architecture. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/atit49449.2019.9030491>. Acesso em: 08 set. 2024.
7. WOOK, M.; HASBULLAH, N. A.; RAZALI, N. A. M.; RAMLI, S.; VASANTHAN, S.; ZAINUDIN, N. M. Exploring students' feedback in online assessment system using opinion mining technique. *International Journal of Information and Education Technology*, v. 10, n. 9, p. 664–668, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18178/ijiet.2020.10.9.1440>. Acesso em: 08 set. 2024.
8. ER, H. M.; NADARAJAH, V. D.; HAYS, R. B.; YUSOFF, N.; LOH, K. L. Y. Lessons learnt from the development and implementation of an online assessment system for medical science programmes. *Medical Science Educator*, v. 29, n. 4, p. 1103–1108, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40670-019-00802-5>. Acesso em: 08 set. 2024.
9. GARRISON, D. R. *E-learning in the 21st century: A framework for research and practice*. Routledge, 2011.
10. BATES, A. W. *Teaching in a digital age: Guidelines for designing teaching and learning*. Tony Bates Associates Ltd., 2015.
11. SALMON, G. *E-tivities: The key to active online learning*. Routledge, 2013.

12. BIGGS, J.; TANG, C. Teaching for quality learning at university: What the student does. McGraw-Hill Education, 2011.
13. HRASTINSKI, S. A theory of online learning as online participation. *Computers & Education*, v. 52, n. 1, p. 78-82, 2009.
14. FIALHO, L. M. F.; NEVES, V. N. S. Professores em meio ao ensino remoto emergencial: repercussões do isolamento social na educação formal. *Educação e Pesquisa*, v. 48, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1678-4634202248260256en>>. Acesso em: 08 set. 2024.
15. NO, J. G. Experiences of physical education teachers on students' assessment in times of COVID-19 pandemic. *Asian Journal of Education and Social Studies*, p. 10-21, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.9734/ajess/2022/v31i230741>>. Acesso em: 08 set. 2024.
16. SHRAIM, K. Online examination practices in higher education institutions: learners' perspectives. *Turkish Online Journal of Distance Education*, v. 20, n. 4, p. 185-196, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.17718/tojde.640588>>. Acesso em: 08 set. 2024.
17. BAIDOO-ANU, D.; SASU, E. O.; AMOATENG, E. Y.; ASAMOAH, D.; QUAINOO, E. A.; GYAMERAH, K. Emergency remote assessment practices in higher education in sub-Saharan Africa during COVID-19. *Frontiers in Education*, v. 8, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1221115>>. Acesso em: 08 set. 2024.
18. DZIUBAN, C. D. et al. Blended learning: The new normal and emerging technologies. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, v. 15, n. 1, p. 3, 2018.
19. PICCIANO, A. G. Theories and frameworks for online education: Seeking an integrated model. *Online Learning*, v. 21, n. 3, p. 166-190, 2017.
20. MEANS, B.; BAKIA, M.; MURPHY, R. Learning online: What research tells us about whether, when and how. Routledge, 2014.
21. KUH, G. D. et al. Piecing together the student success puzzle: Research, propositions, and recommendations. *ASHE Higher Education Report*, v. 32, n. 5, p. 1-181, 2007.
22. AL-FAHAD, F. N. Students' views of the importance of assessment in tertiary education: A comparison between face-to-face and online learning. *Journal of Computer Assisted Learning*, v. 34, n. 1, p. 59-69, 2018.
23. PALLOFF, R. M.; PRATT, K. Assessing the online learner: Resources and strategies for faculty. John Wiley & Sons, 2013.
24. ANDERSON, T.; DRON, J. Learning in a networked world: A review of online distance learning and blended learning. *Journal of Asynchronous Learning Networks*, v. 16, n. 2, p. 91-112, 2012.
25. SALMON, G. E-moderating: The key to teaching and learning online. Routledge, 2011.

26. BROWN, S.; KNIGHT, P. Assessing learners in higher education. Psychology Press, 1994.
27. CONRAD, D.; OPENO, J. Ethical considerations in online learning. In: HACKMAN, F.; GARCIA, R. (Ed.). The handbook of distance education. Routledge, 2018. p. 209-222.
28. FREEMAN, L. A. Legal and ethical issues in online teaching and learning. In: HACKMAN, F.; GARCIA, R. (Ed.). Teaching and learning at a distance: Foundations of distance education. Routledge, 2017. p. 437-461.
29. HARRINGTON, C.; KELLEHER, K. Ethics in online higher education. In: IGI GLOBAL. Handbook of research on administration, policy, and leadership in higher education. IGI Global, 2018. p. 136-154.
30. PAULSEN, M. F. Online education and ethics: The challenge of crafting an ethics policy for distance education. In: BROWN, T. (Ed.). Online distance education. Routledge, 2017. p. 37-56.
31. BRANON, R. F.; ESSEX, C. Legal issues in online education. In: HARPER, R. (Ed.). Building learning communities in cyberspace. Jossey-Bass, 2001. p. 351-376.



## **MONITORIZAÇÃO DA DISPONIBILIZAÇÃO DE COBERTURA CELULAR UBÍQUA EM AMBIENTE HOSPITALAR: MEDIÇÕES DO ESPECTRO RADIOELÉTRICO NO CHUCB**

SILVA, OSCAR (1); TEIXEIRA, EMANUEL (2); CORCEIRO, ANA (3); REIS,  
ANTONIO D. (4); VELEZ, FERNANDO J. (5)

(1) Instituto de Telecomunicações e DEM – UBI, E-mail: [oscar.silva@ubi.pt](mailto:oscar.silva@ubi.pt)

(2) Instituto de Telecomunicações e DEM – UBI, E-mail: [emanuelt@ubi.pt](mailto:emanuelt@ubi.pt)

(3) DEM – Universidade da Beira Interior, E-mail: [anacorceiro@hotmail.com](mailto:anacorceiro@hotmail.com)

(4) Universidade da Beira Interior, E-mail: [adreis@ubi.pt](mailto:adreis@ubi.pt)

(5) Instituto de Telecomunicações e DEM – UBI, E-mail: [fjv@ubi.pt](mailto:fjv@ubi.pt)

### **RESUMO**

Nos últimos anos, as comunicações móveis celulares e sem fios têm evoluído de forma significativa, possibilitando o surgimento de várias tecnologias que transformaram a forma como nos comunicamos. No contexto da saúde, as Redes Sem Fios de Área Corporal (WBAN) possibilitam a monitorização remota de pacientes, recolhendo e transmitindo dados vitais através de dispositivos localizados ao redor ou dentro do corpo humano. Apesar dos avanços nas tecnologias de comunicação, estudos anteriores indicam que muitos hospitais enfrentam desafios de garantia de uma cobertura adequada, devido à complexidade das suas infraestruturas e às interferências que podem comprometer o sinal. O objetivo deste estudo é avaliar a cobertura celular no Centro Hospitalar Universitário Cova da Beira (CHUCB), identificando áreas onde a melhoria é necessária. Foram realizadas medições do espectro radioelétrico em mais de 20 pontos no CHUCB, utilizando dois equipamentos principais: o analisador de espectro NARDA SRM-3006 e o Scanner R&S@TSME6. As medições abrangeram diversas áreas do hospital, avaliando a potência do sinal recebido e a qualidade da ligação em diferentes horários, ao longo do dia. Os resultados indicam que as operadoras MEO e NOS dominam a cobertura celular no CHUCB, embora áreas como os pontos 17, 19 e 21 de medição, necessitem de melhorias significativas. Para a tecnologia 5G NR, a cobertura predominante em quase todos os pontos de medição pertence à operadora MEO, enquanto para a tecnologia LTE, a operadora NOS apresentou a melhor qualidade de sinal. Com base nos dados obtidos, propõe-se a instalação de femtocélulas nas áreas identificadas como deficientes para melhorar a cobertura celular no CHUCB.

**Palavras-chave:** WBAN, Comunicações sem Fios, Redes móveis, Cobertura celular ubíqua, Medições de espectro radioelétrico.

## ABSTRACT

*In recent years, cellular and wireless mobile communications have evolved significantly, enabling the emergence of various technologies that have transformed the way we communicate. In the context of healthcare, Wireless Body Area Networks (WBAN) facilitate the remote monitoring of patients, collecting and transmitting vital data through devices located around or within the human body. Despite advancements in communication technologies, previous studies indicate that many hospitals face challenges in ensuring adequate coverage due to the complexity of their infrastructures and the interferences that can compromise the signal. The objective of this study is to evaluate cellular coverage at the Centro Hospitalar Universitário Cova da Beira (CHUCB), identifying areas where improvement is needed. Measurements of the radio spectrum were conducted at over 20 points in the CHUCB, using two main pieces of equipment: the NARDA SRM-3006 spectrum analyzer and the R&S@TSME6 scanner. The measurements covered various areas of the hospital, assessing signal strength and connection quality at different times throughout the day. The results indicate that the operators MEO and NOS dominate cellular coverage at CHUCB, although areas such as measurement points 17, 19, and 21 require significant improvements. For the 5G NR technology, the predominant coverage at almost all measurement points belongs to the operator MEO, while for LTE technology, the operator NOS demonstrated the best signal quality. Based on the data obtained, the installation of femtocells is proposed in the identified deficient areas to improve cellular coverage at CHUCB.*

**Keywords:** WBAN, Wireless Communications, Mobile Networks, Ubiquitous Cellular Coverage, Radio Spectrum Measurements.

## 1 INTRODUÇÃO

Vivemos uma época na qual se testemunha um avanço tecnológico ímpar na área das telecomunicações, nomeadamente no desenvolvimento das tecnologias de comunicações sem fios, levando ao surgimento de soluções que transformam a interação social e profissional (SILVA, 2022). No setor da saúde, as Redes Sem Fios de Área Corporal (WBAN) emergiram como uma solução inovadora para a monitorização remota de pacientes (MAJEED e AISH, 2021). Estas redes utilizam dispositivos de baixo consumo energético que têm capacidade para comunicar sem fios (TALEB, NASSER, et al., 2021). Em geral, esses dispositivos incluem sensores, atuadores e microcontroladores, posicionados ao redor ou dentro do corpo humano, para monitorizar, recolher e transmitir dados específicos, como batimentos cardíacos, níveis de oxigénio no sangue e temperatura corporal (HAJAR, AL-KADRI e KALUTARAGE, 2021) (TALEB, NASSER, et al., 2021). Estes dados são, então, processados e diagnosticados por profissionais de saúde. Esta evolução tecnológica é importante, pois permite que os profissionais de saúde acompanhem em tempo real o estado de saúde dos pacientes,

melhorando, assim, a qualidade do cuidado prestado (FRIEND, JENNINGS, et al., 2017).

Apesar dos avanços nas tecnologias de comunicação e das suas aplicações na saúde, muitos hospitais ainda enfrentam desafios significativos na garantia de uma cobertura adequada (VYAS e GUPTA, 2023). Estudos anteriores indicam que a complexidade das estruturas hospitalares e as interferências ambientais podem comprometer a qualidade do sinal, levando a falhas de comunicação. Estas lacunas na cobertura não apenas dificultam o funcionamento eficaz das WBANs, mas também podem afetar diretamente a segurança e o bem-estar dos pacientes, especialmente em áreas críticas, como unidades de cuidados intensivos e salas de emergência, uma vez que, na área da saúde, os dados precisam ser o mais completos possível.

Dada a importância dessa comunicação, a eficácia das redes em ambientes hospitalares depende, fundamentalmente, da qualidade e da disponibilidade da cobertura celular (ANBARASAN e NATARAJAN, 2022), já que os hospitais são ambientes muito complexos, com diversas fontes de interferência e obstruções no sinal. Assim, é essencial identificar as áreas que necessitam de melhorias na cobertura celular para garantir a continuidade e a qualidade dos serviços prestados (MANZO, BRITO e ALVES, 2013). Pesquisas recentes sublinham a importância das tecnologias sem fios, como ZigBee, Wi-Fi e Bluetooth/BLE, em conjunto com redes móveis, assim como a utilização de pequenas células, como femtocélulas, para melhorar a cobertura em ambientes interiores (HAJAR, AL-KADRI e KALUTARAGE, 2021; TALEB et al., 2021).

O objetivo deste trabalho é avaliar a cobertura celular no Centro Hospitalar Universitário Cova da Beira (CHUCB), identificando áreas onde melhorias são necessárias. Com essa finalidade, foram realizadas medições do espectro radioelétrico em mais de 20 pontos do hospital, utilizando equipamentos avançados como o analisador de espectro NARDA SRM-3006 e o scanner R&S@TSME6 incluindo frequências até 2.6 GHz (VELEZ, 2023). Os dados obtidos permitirão uma análise detalhada da qualidade da cobertura, possibilitando a proposta de soluções, como a instalação de femtocélulas em áreas críticas, para assegurar uma comunicação eficiente e contínua. A realização deste estudo é essencial para garantir que todos os setores do hospital disponham da cobertura necessária para operar com segurança e eficácia, contribuindo assim para a melhoria dos cuidados de saúde prestados aos pacientes.

As restantes seções do artigo estão organizadas da seguinte forma. A Seção 2 aborda a metodologia aplicada, elencando a contexto e objetivos das medições, os equipamentos utilizados e os procedimentos de medição. Na Seção 3, analisam-se as medições realizadas com o Narda SRM-3006 e o scanner R&S@TSME6 nos pontos de medição identificados. Na Seção 4 analisam-se os resultados e discute-se a importância da cobertura celular ubíqua em ambientes hospitalares, a



proposta de desenvolvimento de femtocélulas e propostas de expansão futuras. Finalmente, apresentam-se as conclusões na Seção 6.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Contexto e Objetivos das Medições

Foram realizadas medições do espectro radioelétrico no Centro Hospitalar Universitário Cova da Beira (CHUCB), com o intuito de avaliar a qualidade do sinal disponível em diferentes áreas do hospital e nos arredores, bem como identificar zonas que apresentam deficiências de cobertura que possam comprometer a eficácia das WBANs e outros sistemas dependentes de comunicação sem fios (SILVA, 2022). Este estudo foi motivado pela necessidade de explorar possibilidades de disponibilização de cobertura celular ubíqua no contexto hospitalar e circundante, garantindo assim, que todos os setores do hospital, especialmente aqueles de maior criticidade, possuam uma cobertura ubíqua que assegure a continuidade das operações e a segurança dos pacientes (VELEZ, 2023).

### 2.2 Equipamentos Utilizados

Para a realização das medições, foram utilizados dois equipamentos principais:

- O NARDA SRM-3006 é um analisador de espectro que permite medições seletivas de frequência para análise de segurança e medições ambientais em campos eletromagnéticos de alta frequência, com faixas que vão de 9 kHz a 6 GHz (SILVA, 2022). O sistema de medição SRM-3006 completo é composto por uma Unidade Básica SRM-3006 e uma antena de três eixos, que possibilita medições isotrópicas rápidas e simples, com determinação automática dos três componentes espaciais do campo a ser medido (VELEZ, 2023). O NARDA SRM-3006 é amplamente utilizado para monitorizar a cobertura de redes móveis celulares e redes sem fios locais (SILVA, 2022). Este equipamento combina processamento de sinal analógico e digital para poder garantir valores absolutos e limites de campos eletromagnéticos de elevada frequência. O SRM-3006 utiliza esta técnica de combinação, porque os sinais nesta gama de frequências dessa magnitude são muito difíceis de amostrar digitalmente (VELEZ, 2023).
- O R&S@TSME6 é um scanner que serve para análise e otimização das redes móveis. Este scanner, combinado com o software de teste de unidade R&S@ROMES4, consegue detetar todas as tecnologias de redes móveis disponíveis numa gama de frequências que varia de 9 KHz a 6 GHz, como 5G NR, LTE, NB-IoT, GSM, entre outras (SILVA, 2022). Além de identificar as tecnologias das redes móveis disponíveis, o R&S@TSME6 consegue executar tarefas essenciais envolvidas em medições de cobertura como, identificar interferências, medir o

desempenho, e fazer uma análise de qualidade em redes móveis (SILVA, 2022), (VELEZ, 2021).

### 2.3 Procedimentos de Medição

As medições foram realizadas tanto no interior como nos arredores do hospital, abrangendo áreas críticas como enfermarias, setor de urgência, imagiologia, heliporto e parques de estacionamento. De acordo com (PUNJ e KUMAR, 2019), o Hospital deve disponibilizar acesso ubíquo de comunicações móveis e sem fios para utilização de aplicações relevantes e bases de dados dos pacientes. Recomenda-se que as estações rádio-base devam ficar mais próximas aos utilizadores, assim diminuindo o nível de campos eletromagnéticos. Quanto mais longe estiver a estação de base em relação aos seus utilizadores, mais elevado será a potência necessária para transmitir, conseqüentemente mais elevado será o campo eletromagnético na sua proximidade.

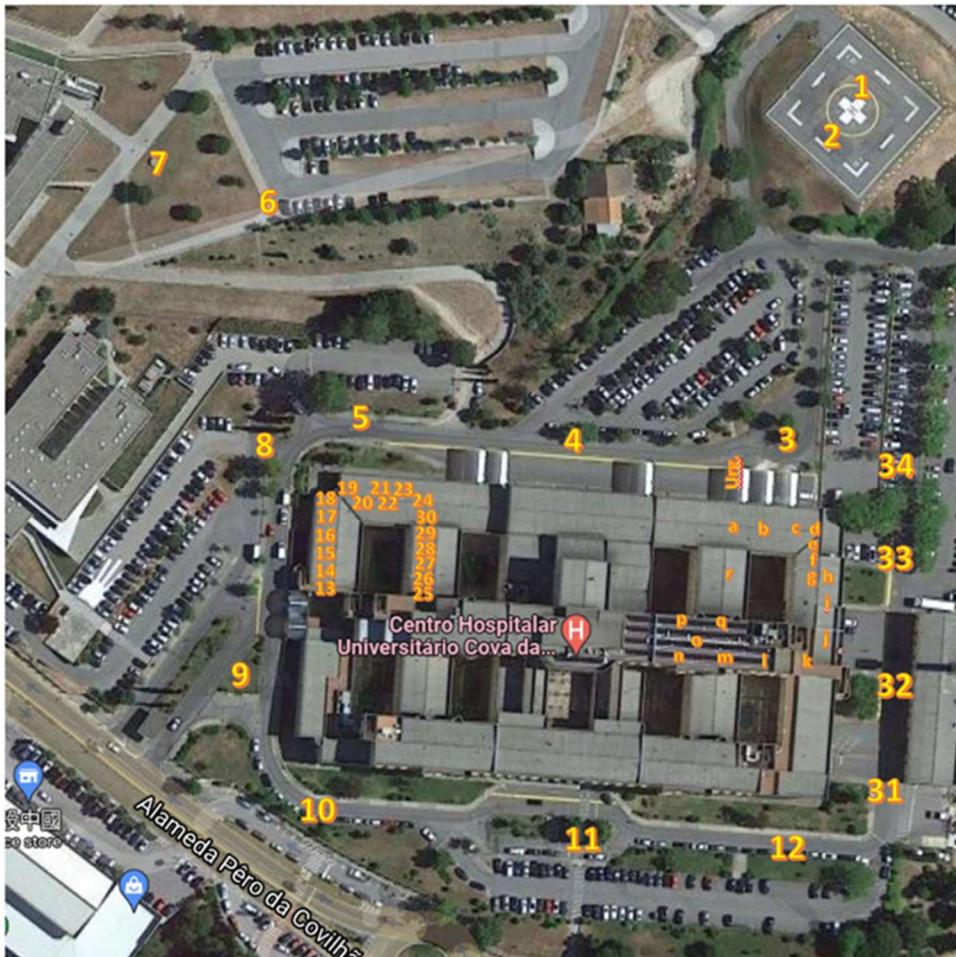


Figura 1 - Mapa dos pontos de medição.  
Fonte: Os autores.

Cada ponto de medição foi analisado em termos de intensidade de sinal e qualidade da ligação, representadas por RSSI, RSRP, SINR e RSRQ (SILVA, 2022). As medições foram realizadas em diferentes horários do dia para

capturar variações temporais na qualidade do sinal. Os dados recolhidos foram posteriormente analisados para identificar a qualidade da cobertura em cada área, abrangendo os seguintes setores do Hospital: i) Enfermarias MEDICINA 1; ii) Enfermarias CIRURGIA 1; iii) Urgência Geral; iv) Imagiologia; v) Exames complementares.

Os dados recolhidos foram processados e comparados para identificar tendências e padrões na qualidade da cobertura celular. Os resultados foram apresentados em gráficos que ilustram a intensidade do sinal para diferentes tecnologias em cada ponto de medição, permitindo uma visualização clara das áreas onde a cobertura é insuficiente. Com base nesses resultados, foram feitas recomendações específicas para a melhoria da cobertura, incluindo a proposta de instalação de femtocélulas em zonas críticas.

### 3 RESULTADOS

Embora todos os resultados tenham sido obtidos e analisados, para manter a concisão do manuscrito, apenas os dados mais relevantes estão apresentados no corpo do texto. Os resultados completos e detalhados das medições podem ser consultados em (VELEZ, 2023).

Foram realizadas medições em várias zonas dentro e fora do CHUCB. Para as medições realizadas com o NARDA SRM-3006, apresentaremos os resultados de seis pontos selecionados para análise. Por outro lado, nas medições feitas com o scanner R&S@TSMÉ6, analisaremos o pior ponto de medição para as quatro (4) tecnologias (LTE, UMTS, 5G NR, e NB-IoT), o ponto 17. Além disso, o resumo com todos os seis pontos de medições será apresentado em um quadro. Esses pontos foram selecionados cuidadosamente para o análise, tendo em vista uma correspondência com as possíveis localizações do sistema de rastreamento de ativos que está a ser concebido para operar no contexto do CHUCB.

Os pontos selecionados são os mesmos tanto para as medições com o Narda quanto para as medições com o scanner. O software de teste de unidade R&S@ROMES4, combinado com o scanner, permitiu-nos registar o tempo em cada ponto de medição, o que facilitou muito análise dos resultados. Através do software, em cada ponto de medição, foi possível selecionar um determinado tempo específico para analisar os resultados. Por outro lado, nas medições feitas com Narda, cada ponto tem o seu número de medição correspondente, conforme apresentado na Tabela 1, facilitando assim a extração dos dados recolhidos em cada um dos pontos de medição. A Tabela 2 apresenta uma listagem das faixas de frequências atribuídas às diversas operadoras, para cada tecnologia disponível, o que permitiu correlacionar os resultados das medições com as tecnologias específicas e suas respectivas operadoras (VELEZ, 2023). Esta tabela é essencial para compreender a distribuição das frequências utilizadas pelas principais operadoras, nomeadamente MEO, NOS e Vodafone.

**Tabela 1 - Tabela com a designação dos pontos de medição**

Ponto	Narda SRM-3006	Scanner R&S@TSME6
Porta de entrada	325	45 s
13	328	1:18 min
17	332	2:10 min
19	333	2:32 min
21	334	2:47 min
23	337	3:05 min

**Fonte:** Os autores.

**Tabela 2 - Faixas de frequências das operadoras, com base na informação disponibilizada pela ANACOM**

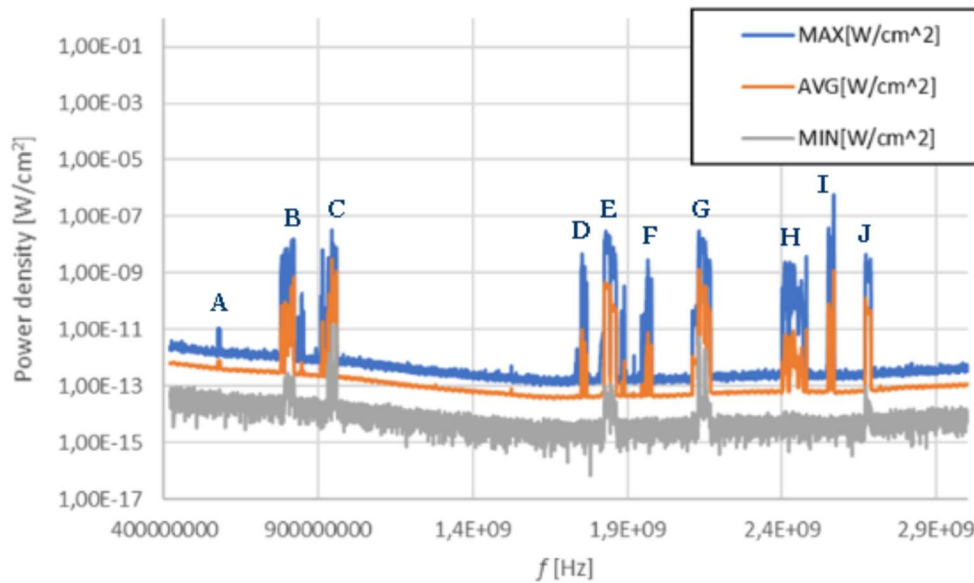
Operador	Intervalo de frequências - downlink [MHz]		Faixa de frequência [MHz]	Tecnologia
	<a href="https://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=382989">https://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=382989</a>			
MEO	791,0	801,0	800	Neutralidade Tecnológica
MEO	950,9	958,9	900	GSM / UMTS / WIMAX / LTE
MEO	1845,0	1865,0	1800	GSM / UMTS / WIMAX / LTE
MEO	2149,9	2169,7	2100	UMTS
MEO	2670,0	2690,0	2600	Neutralidade Tecnológica
NOS	811,0	821,0	800	Neutralidade Tecnológica
NOS	943,1	950,9	900	GSM / UMTS / WIMAX / LTE
NOS	1825,0	1845,0	1800	GSM / UMTS / WIMAX / LTE
NOS	2130,1	2144,9	2100	UMTS
NOS	2650,0	2670,0	2600	Neutralidade Tecnológica
Vodafone	801,0	811,0	800	Neutralidade Tecnológica
Vodafone	930,0	935,0	900	GSM / UMTS / WIMAX / LTE
Vodafone	935,1	943,1	900	GSM / UMTS / WIMAX / LTE
Vodafone	1805,0	1825,0	1800	GSM / UMTS / WIMAX / LTE
Vodafone	2110,3	2130,1	2100	UMTS
Vodafone	2570,0	2595,0	2600	Neutralidade Tecnológica
Vodafone	2630,0	2650,0	2600	Neutralidade Tecnológica

**Fonte:** (VELEZ, 2023).

### 3.1 Resultados de medição com o Narda SRM-3006

Os gráficos das Figuras 2 a 7 apresentam os resultados das medições realizadas com o NARDA SRM-3006 nos seis pontos seleccionados mencionados na Tabela 1. Esses gráficos fornecem detalhes importantes sobre a cobertura celular no CHUCB.

A análise das frequências detectadas na Figura 2 foi possível graças à informação apresentada na Tabela 2. Esta tabela disponibiliza um a listagem das faixas de frequências atribuídas às diversas operadoras de telecomunicações móveis, assim como os detalhes do intervalo concreto de frequências considerado.

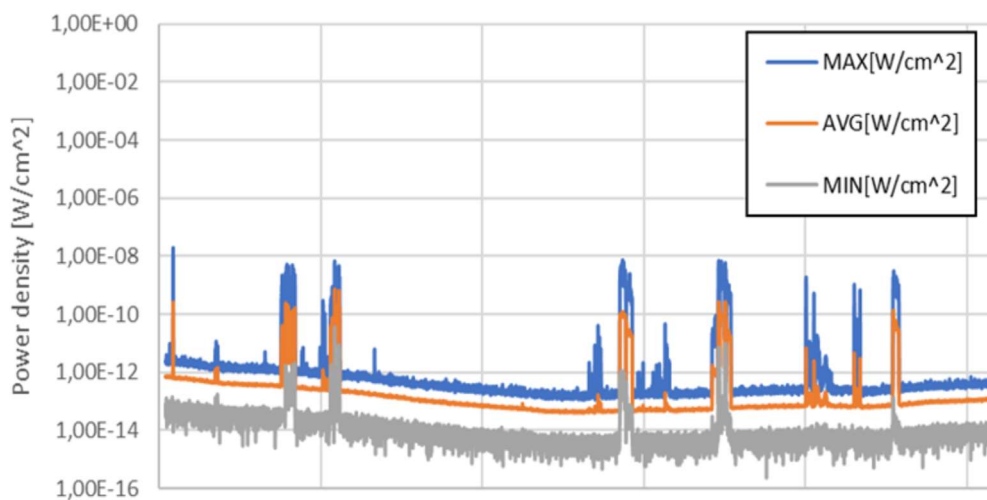


**Figura 2 - Gráfico da medição feita no ponto 13.**  
**Fonte:** Os autores.

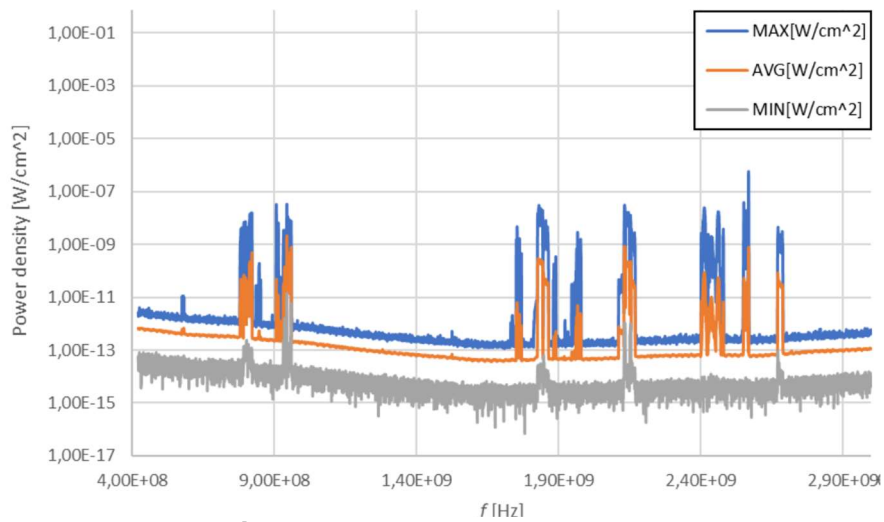
Com base nos dados da Tabela 2, foram identificadas as seguintes frequências e suas tecnologias associadas no ponto 13.

- ◆ A - 760 MHz 5G NR
- ◆ B - 819 MHz Neutralidade Tecnológica
- ◆ C - 945 MHz GSM / UMTS / LTE
- ◆ D - 1754 MHz GSM / UMTS / LTE
- ◆ E - 1837 MHz GSM / UMTS / LTE
- ◆ F - 1977 MHz UMTS
- ◆ G - 2132 MHz UMTS
- ◆ H - 2415 MHz Neutralidade Tecnológica
- ◆ I - 2568 MHz Neutralidade Tecnológica
- ◆ J - 2687 MHz Neutralidade Tecnológica

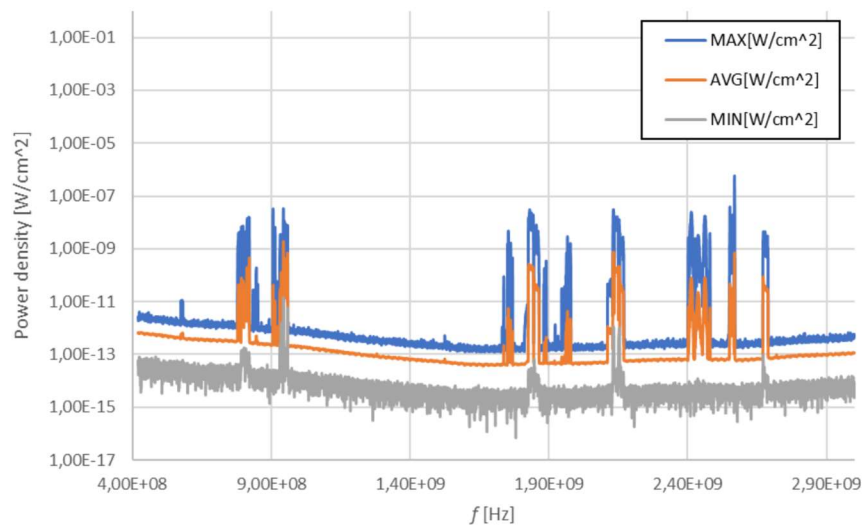
Podem-se extrair lições semelhantes na porta de entrada das consultas externas, que não está muito longe do ponto 13. No entanto, existem calramente outras tecnologias relevantes identificadas, dado que, devido à existência de uma superfície envidraçada de largas dimensões junto à porta, recoheram-se medições de tecnologias que estão presentes apenas no exterior.



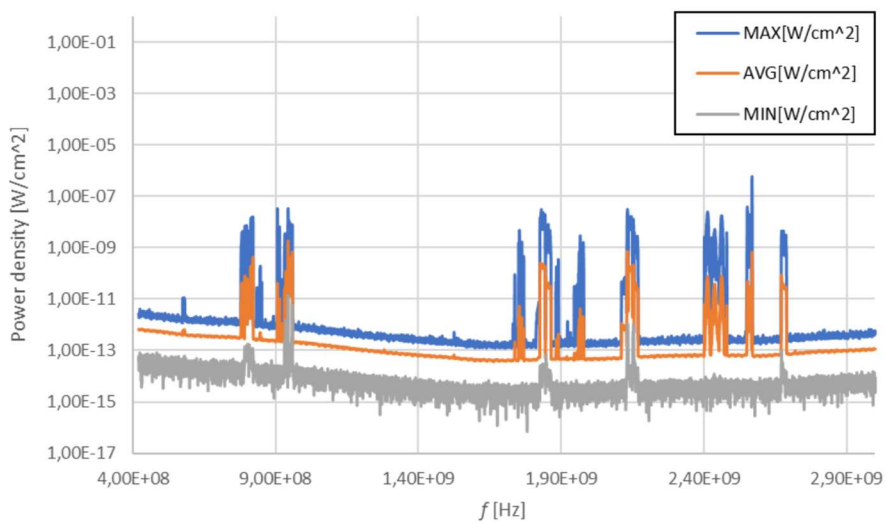
**Figura 3 - Gráfico das medições na porta de entrada das consultas.**  
**Fonte:** Os autores.



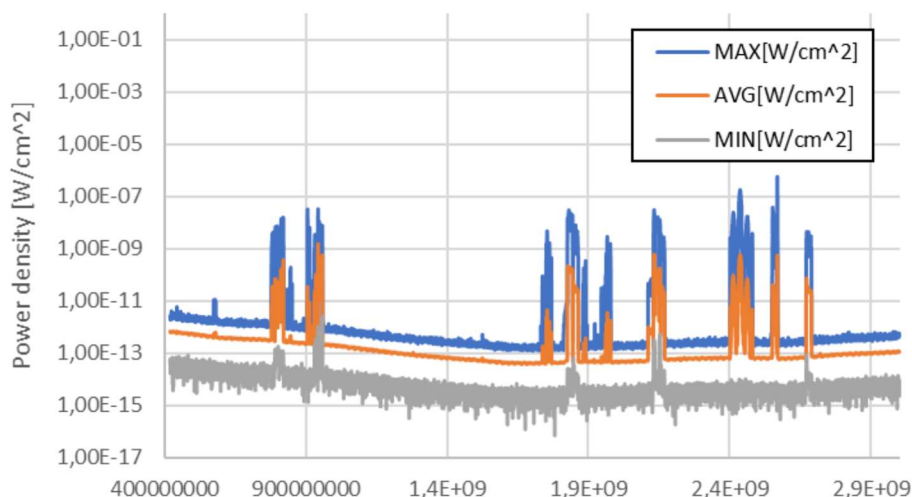
**Figura 4 - Gráfico das medições realizadas no ponto 17.**  
**Fonte:** Os autores.



**Figura 5 - Gráfico das medições realizadas no ponto 19.**  
**Fonte:** Os autores.



**Figura 6 - Gráfico das medições realizadas no ponto 21.**  
**Fonte:** Os autores.

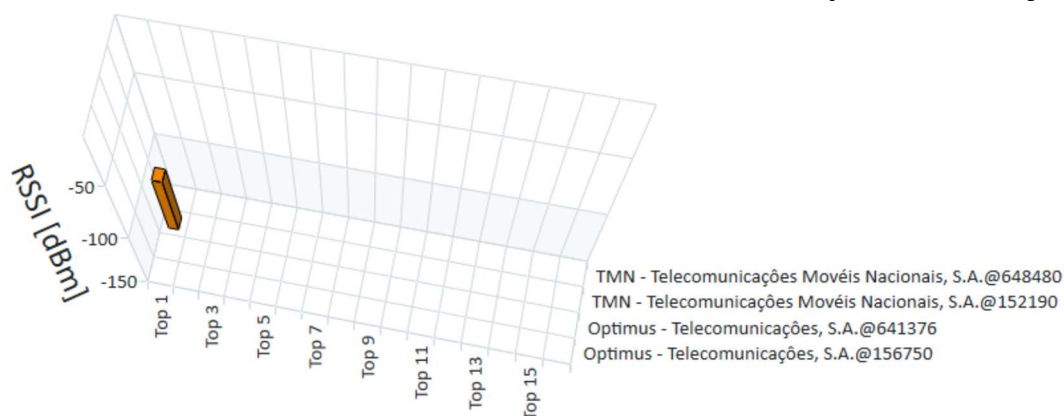


**Figura 7 - Gráfico das medições realizadas no ponto 23.**  
**Fonte:** Os autores.

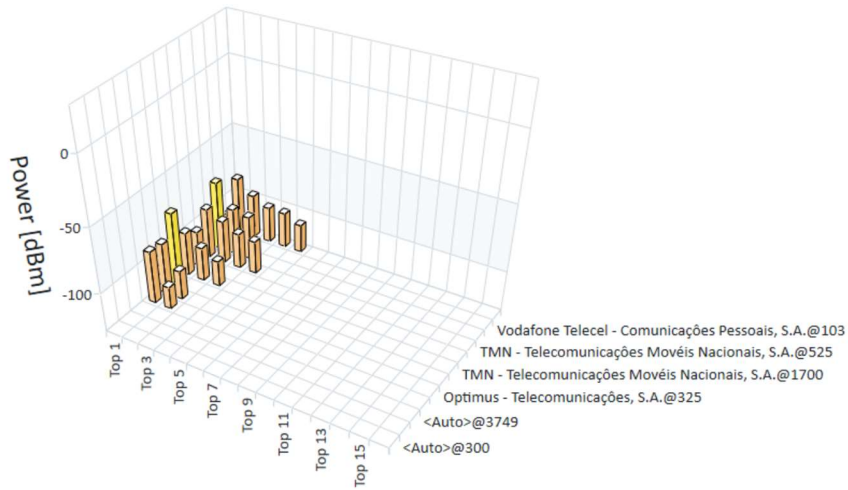
### 3.2 Resultados de medição com o Scanner R&S@TSME6

As medições para este estudo foram realizadas em janeiro de 2022. O scanner R&S@TSME6, em combinação com o software R&S@ROMES4, forneceu uma análise detalhada e em tempo real das tecnologias disponíveis em cada ponto de medição. As medições registaram o momento exato em que cada ponto foi avaliado, permitindo uma análise temporal que complementa a avaliação espacial da cobertura.

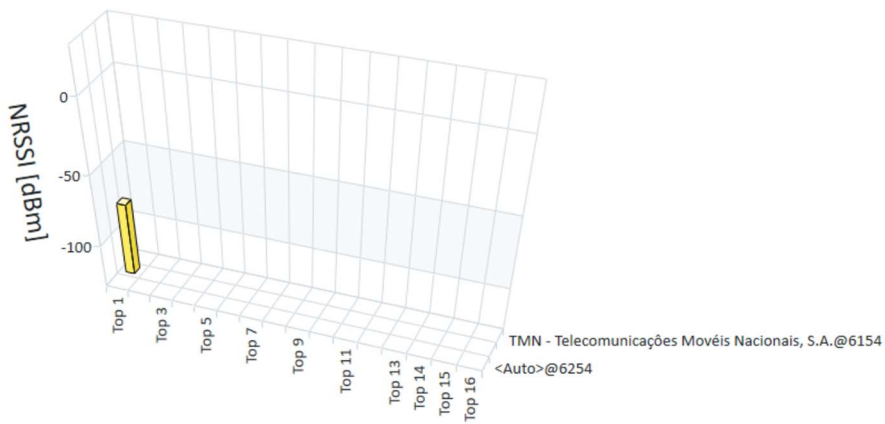
As Figuras 8 a 11 apresentam os gráficos da cobertura, representando a potência recebida disponível para as quatro tecnologias detetadas nas medições feitas com o scanner R&S@TSME6 no ponto 17 de medição (mencionado na Tabela 1). É importante notar que, embora o objetivo seja apresentar resultados multi-tecnologia, em alguns casos apenas uma tecnologia estava presente ou, em outros, nenhuma tecnologia foi detetada. Assim, em certos gráficos, a representação pode consistir numa única barra ou, noutros casos sem deteção de qualquer das tecnologias, não existem barras, tendo cada gráfico esse significado. Na Tabela 3 apresenta-se o resumo desses melhores valores de cobertura de sinal para cada operadora e diferentes pontos de medição/tecnologias.



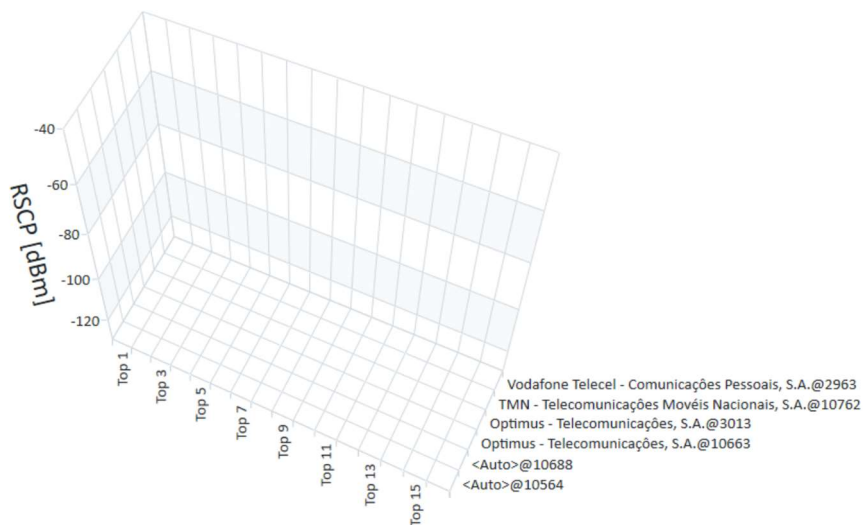
**Figura 8 - Gráfico do RRSI medido para o 5G NR no ponto 17.**  
**Fonte:** Os autores.



**Figura 9 - Gráfico da potência recebida para o LTE no ponto 17.**  
**Fonte:** Os autores.



**Figura 10 - Gráfico do NRSSI para o NB-IoT no ponto 17.**  
**Fonte:** Os autores.



**Figura 11 - Gráfico do RSCP para a tecnologia UMTS no ponto 17**  
**Fonte:** Os autores.



**Tabela 3 - Resumo dos melhores valores de potência recebida para cada operadora para diferentes pontos de medição e tecnologias. A tabela apresenta os valores de sinal (RSSI, Power, NRSSI, RSCP) para as tecnologias 5G NR, LTE, NB-IoT e UMTS, respectivamente destacando-se a operadora com a melhor cobertura em cada ponto de medição.**

Pontos de medição	Tecnologias	Operadora		
		MEO	NOS	Vodafone
13	5G NR (RSSI)	-100.22		
	LTE (Power)		-78.23	
	NB-IoT (NRSSI)	-104.34		
	UMTS (RSCP)		-89.2	
17	5G NR (RSSI)	-100.21		
	LTE (Power)		-74.02	
	NB-IoT (NRSSI)			
	UMTS (RSCP)			
19	5G NR (RSSI)		-100.52	
	LTE (Power)	-78.43		
	NB-IoT (NRSSI)	-92.15		
	UMTS (RSCP)		-95.4	
21	5G NR (RSSI)	-97.70		
	LTE (Power)	-83.11		
	NB-IoT (NRSSI)	-98.22		
	UMTS (RSCP)			
23	5G NR (RSSI)	-97.70		
	LTE (Power)	-80.88		
	NB-IoT (NRSSI)	-98.74		
	UMTS (RSCP)	-102.1		
Porta de entrada	5G NR (RSSI)		-94.5	
	LTE (Power)	- 98		
	NB-IoT (NRSSI)	-100.31		
	UMTS (RSCP)	-98.6		

**Fonte:** Os autores.

A Tabela 3 fornece uma visão clara da cobertura de cada uma das quatro tecnologias (5G NR, LTE, NB-IoT e UMTS) em diferentes pontos de medição, destacando-se qual operadora (MEO, NOS ou Vodafone) que apresentou a melhor cobertura para cada tecnologia. Para cada ponto de medição, foram registados os valores de sinal (RSSI, Power, NRSSI, RSCP), para as tecnologias 5G NR, LTE, NB-IoT e UMTS, possibilitando a identificação imediata da operadora que oferece a melhor qualidade de sinal em cada tecnologia. O significado das grandezas é o seguinte:

**RSSI** (Received Signal Strength Indicator) - Indica a potência do sinal recebido, em dBm, com intervalos de -120 dBm (sinal muito fraco) a 0 dBm (sinal muito forte).

**Power** - Refere-se à potência do sinal, medido em dBm, geralmente entre -30 dBm (muito forte) e -110 dBm (fraca).

**NRSSI** (NR Signal Strength Indicator) - Indica a potência do sinal, variando entre -140 dBm (sinal muito fraco) e -40 dBm (sinal forte).

**RSCP** (Received Signal Codes Power) - Mede a potência média do sinal recebido, no intervalo de -120 dBm (sinal fraco) a -40 dBm (sinal forte).

#### **4 ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os resultados das medições realizadas com o NARDA SRM-3006 revelaram detalhes importantes sobre a distribuição da cobertura celular no CHUCB. Foram identificados vários picos de potência em diferentes frequências, indicando a presença de algumas tecnologias, como 5G NR e LTE, em diversas áreas do hospital. Por exemplo, a frequência de 760 MHz, associada à tecnologia 5G NR, apresentou um pico significativo, sugerindo uma cobertura adequada dessa tecnologia em alguns dos pontos considerados. No entanto, em frequências mais elevadas, como 2568 MHz, a cobertura mostrou-se irregular.

Embora os dados obtidos com o NARDA SRM-3006 tenham permitido mapear algumas áreas do hospital que apresentam desafios significativos em termos de cobertura, o nível de detalhe não foi suficiente. Tornou-se necessário realizar medições adicionais, com maior abrangência, para determinar com maior precisão as potências recebidas, as frequências e as operadoras disponíveis no CHUCB. Assim, foram efetuadas novas medições utilizando o scanner R&S® TSME6, permitindo identificar de forma mais expedita as frequências de operação e as respectivas operadoras.

Ao realizar uma análise mais detalhada dos pontos de medição, com base nos novos resultados, verificou-se que, nos pontos 21, 23 e na Porta de Entrada das Consultas Externas, a tecnologia 5G NR apresentou a melhor cobertura de sinal. Em contraste, nos pontos 13, 17 e 19, foi a tecnologia LTE que demonstrou uma melhor cobertura. Em termos globais, a tecnologia LTE apresentou a melhor performance no que diz respeito aos valores de potência (power) e aos índices de sinal (RSSI, NRSSI, RSCP). Além disso, tanto as tecnologias LTE como 5G NR estiveram presentes em todos os seis pontos de medição analisados, sendo que a tecnologia LTE obteve a melhor cobertura, exceto na Porta de Entrada das Consultas Externas, onde a 5G NR apresentou uma cobertura superior.

Relativamente às operadoras, os resultados indicam que a MEO e a NOS estiveram presentes em todos os seis pontos de medição analisados, enquanto se registou a ausência da operadora Vodafone em alguns desses pontos. Numa análise comparativa entre as duas operadoras mais frequentemente presentes (MEO e NOS), constatou-se que a MEO apresentou a melhor cobertura de sinal em mais pontos para as quatro tecnologias testadas (5G NR, LTE, NB-IoT e UMTS).

Com base nestes resultados, para as tecnologias analisadas (LTE, UMTS, 5G NR e NB-IoT), as zonas que necessitam de melhoria da cobertura são

os pontos 13, 17 e 21. Estes pontos registaram valores mais elevados de sinal fraco, sendo que nos pontos 17 e 21 se verificou a ausência de algumas tecnologias, nomeadamente NB-IoT e UMTS no ponto 17 e UMTS no ponto 21.

## **5 DISCUSSÃO**

### **5.1 Importância da Cobertura Celular em Ambientes Hospitalares**

A análise dos resultados reforça a importância de uma cobertura celular robusta em ambientes hospitalares e circundantes. Uma cobertura celular adequada é essencial não apenas para o funcionamento das Redes Sem Fios de Área Corporal (WBANs), mas também para as operações de sistemas críticos, como a telemedicina e os registos médicos eletrónicos (EHRs), além de facilitar a coordenação entre diferentes departamentos médicos. A ausência de uma cobertura adequada em áreas críticas pode levar a falhas na comunicação, resultando em atrasos no atendimento e até em erros médicos.

### **5.2 Soluções Propostas: Implementação de Femtocélulas**

Com base nos resultados obtidos, propõe-se a instalação de femtocélulas nas áreas identificadas como tendo fraca cobertura celular. As femtocélulas são pequenas estações base que podem ser instaladas em ambientes internos para amplificar o sinal de redes móveis, proporcionando assim, uma solução eficaz para áreas com cobertura insuficiente. A instalação dessas unidades no CHUCB pode aprimorar significativamente a qualidade do sinal em áreas que necessitam de melhorias na cobertura celular, como o ponto 17, onde a cobertura atual é fraca.

Ademais, as femtocélulas apresentam a vantagem de reduzir a exposição a campos eletromagnéticos, pois possibilitam a transmissão de sinais de potência inferior, dado que as estações de base estão mais próximas dos utilizadores (XENAKIS, PASSAS, *et al.*, 2014). Essa característica é particularmente relevante em ambientes hospitalares, onde a saúde dos pacientes é um dos principais objetivos.

### **5.3 Expansão Futura do Estudo**

Embora o estudo tenha focado em áreas críticas identificadas durante as medições, é essencial expandir a análise para outras partes do hospital, onde a precisão e a continuidade do sinal são cruciais. Essas áreas podem apresentar desafios únicos que precisam ser abordados de forma específica. Estudos futuros devem incluir uma avaliação mais abrangente de todo o complexo hospitalar, considerando a instalação de soluções complementares, como repetidores de sinal e sistemas de antenas distribuídas.

## **6 CONCLUSÕES**

Neste trabalho, foi avaliada a cobertura celular no Centro Hospitalar Universitário Cova da Beira (CHUCB). Com base nos resultados obtidos a partir das medições realizadas, utilizando o scanner R&S® TSME6 em combinação com o software R&S® ROMES4, e comparando com as medições prévias efetuadas com o NARDA SRM-3006, foi possível alcançar um maior nível de detalhe sobre a distribuição das diferentes tecnologias no hospital. A análise dos resultados permitiu identificar áreas específicas que requerem melhorias da cobertura.

Verificou-se que, nos pontos de medição 21, 23 e na Porta de Entrada das Consultas Externas, a tecnologia 5G NR apresentou a melhor cobertura de sinal. Ao passo que, nos pontos 13, 17 e 19, foi a tecnologia LTE que demonstrou uma melhor cobertura. As tecnologias LTE e 5G NR estiveram presentes em todos os seis pontos de medição analisados, sendo que a LTE apresentou a melhor cobertura de sinal, exceto na Porta de Entrada das Consultas Externas, onde a 5G NR apresentou uma cobertura superior. Em geral, a tecnologia LTE apresentou o melhor desempenho no que diz respeito aos valores de potência (power) e aos índices de sinal (RSSI, NRSSI, RSCP). Constatou-se que, relativamente às operadoras, os resultados indicaram que a MEO e a NOS estiveram presentes em todos os seis pontos de medição analisados, enquanto se registou a ausência da operadora Vodafone em alguns desses pontos. A MEO apresentou a melhor cobertura de sinal em mais pontos e para as quatro tecnologias analisadas (5G NR, LTE, NB-IoT e UMTS).

As áreas identificadas que requerem melhorias de cobertura incluem os pontos 13, 17 e 21. Para resolver estas deficiências, propõe-se a implementação de femtocélulas nas zonas com sinal insuficiente. Esta solução permitirá otimizar a qualidade da comunicação no CHUCB, garantindo uma cobertura robusta e ininterrupta, essencial para o bom funcionamento dos sistemas hospitalares, especialmente em áreas críticas.

A implementação destas melhorias terá um impacto significativo na eficiência dos serviços hospitalares, particularmente no suporte a sistemas de monitorização de saúde e redes de comunicação sem fios, assegurando que as tecnologias móveis possam ser plenamente utilizadas para proporcionar cuidados de saúde de elevada qualidade e segurança.

### **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho foi suportada financeiramente pelo projeto de Telemonitorização de Doentes em Risco (TERI) do SISTEMA DE APOIO À MODERNIZAÇÃO E CAPACITAÇÃO DA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA (SAMA 2020), cofinanciado pelo COMPETE 2020, através do FEDER – Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional - Operações de Capacitação (PI 11.1) da Administração Pública. Os autores agradecem ao Instituto de Telecomunicações, e à FCT/MCTES que financiou este trabalho através de fundos nacionais e quando aplicável cofinanciado por fundos

comunitários no âmbito do projeto com referência UIDB/EEA/50008/2020 e identificador DOI <https://doi.org/10.54499/UIDB/50008/2020>. Óscar da Silva também agradece à FCT/MCTES o apoio concedido recentemente, através da bolsa de doutoramento (PALOP e Timor Leste).

## REFERÊNCIAS

ANBARASAN, H. S.; NATARAJAN, J. Blockchain Based Delay and Energy Harvest Aware Healthcare Monitoring System in WBAN Environment. *Sensors*, v. 22, n. 15, p. 5763, Aug. 2022.

FRIEND, T. H. et al. Implementation of the Vocera Communication System in a Quaternary Perioperative Environment. *Journal of Medical Systems*, v. 41, n. 1, p. 6, Jan. 2017.

FTOUNI, R. et al. Challenges of Telemedicine during the COVID-19 pandemic: a systematic review. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, v. 22, n. 1, p. 207, 3 13 2022.

HAJAR, M. S.; AL-KADRI, M. O.; KALUTARAGE, H. K. A survey on wireless body area networks: architecture, security challenges and research opportunities. *Computers & Security*, v. 104, p. 102211, May 2021.

MAJEED, J. H.; AISH, Q. A remote patient monitoring based on WBAN implementation with internet of thing and cloud server. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, v. 10, n. 3, p. 1640, June 2021.

MANZO, B. F.; BRITO, M. J. M.; ALVES, M. Influência da comunicação no processo de acreditação hospitalar. *Revista Brasileira de Enfermagem*, v. 66, p. 46 - 51, Feb. 2013.

PUNJ, R.; KUMAR, R. Technological aspects of WBANs for health monitoring: a comprehensive review. *Wireless Networks*, v. 25, n. 3, p. 1125, Apr. 2019.

TALEB, H. et al. Wireless technologies, medical applications and future challenges in WBAN: a survey. *Wireless Networks*, v. 27, n. 8, p. 5271, Nov. 2021.

VYAS, S.; GUPTA, S. WBAN-based remote monitoring system utilising machine learning for healthcare services. *International Journal of System of Systems Engineering*, v. 13, n. 1, p. 100, Feb. 2023.

XENAKIS, D. et al. Mobility Management for Femtocells in LTE-Advanced: Key Aspects and Survey of Handover Decision Algorithms. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 16, p. 64 - 91, Mar. 2014.

SILVA, Óscar da. Comunicações Móveis Celulares e Sem Fios Aplicadas a e-Saúde em Ambientes Hospitalares. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2022.

VELEZ, Fernando J. Velez, Emanuel B. Teixeira, Ana Corceiro And Óscar da Silva Radiofrequency Spectrum Measurement Campaign at Pero da Covilhã Hospital. 2023. TERI Report UBI.3.1, Universidade da Beira Interior. Covilhã. 2023.



## **DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS EM EDIFÍCIOS**

AGOSTINHO, ABEL (1); CARREIRA, FERNANDO (2); CASACA, CLÁUDIA (3)

(1) ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, E-mail: [a47386@alunos.isel.pt](mailto:a47386@alunos.isel.pt)

(2) UniRE, ISEL– Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, E-mail: [fernando.carreira@isel.pt](mailto:fernando.carreira@isel.pt)

(3) CIMOSM, ISEL– Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, E-mail: [claudia.casaca@isel.pt](mailto:claudia.casaca@isel.pt)

### **RESUMO**

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma aplicação computacional para o cálculo e análise de cargas térmicas em edifícios. A modelação dos edifícios é realizada através da definição e parametrização dos vários elementos construtivos dos espaços, nomeadamente, paredes exteriores e interiores, cobertura, pavimento e superfícies envidraçadas. A aplicação também permite parametrizar as cargas térmicas internas existentes num edifício, tais como, a iluminação, equipamentos e cargas adicionadas devido à atividade humana. O cálculo das cargas térmicas existentes nos espaços do edifício é obtido pelo método da função de transferência. Os módulos de cálculo são desenvolvidos em *Python*, sendo possível quantificar a transferência de calor que ocorre no edifício, considerando os modelos que descrevem os fenómenos de condução, convecção e radiação a partir de um modelo de dados que considera as condições climáticas, materiais, elementos construtivos, espaços, iluminação, equipamentos, perfis de ocupação, entre outros. Os resultados dos módulos de cálculo foram validados com uma aplicação comercial de cálculo de cargas térmicas. A validação da aplicação foi efetuada isoladamente para uma parede exterior, uma superfície envidraçada, e iluminação, tendo-se verificado diferenças inferiores a 2%. Para uma parede exterior com coeficiente de transmissão global  $U=1,43 \text{ W/m}^2\text{k}$ , obteve-se uma carga térmica para o mês de março de  $13,37 \text{ W/m}^2$  que diferiu em 0,3% da aplicação comercial. Para uma superfície envidraçada com  $U=3,18 \text{ W/m}^2\text{k}$ , fator sombreamento de 0,83, no mês de junho e considerando uma latitude de  $40^\circ\text{N}$ , obteve-se  $176 \text{ W/m}^2$  de componente radiativa e  $24,46 \text{ W/m}^2$  convectiva, correspondendo a um desvio de 1,7% e 0,5%, respetivamente. Para uma potência de 1000 W de iluminação durante 10h obteve-se uma carga térmica máxima de 904 W em ambas aplicações.

**Palavras-chave:** Cargas térmicas, Aplicação computacional, edifício, transferência de calor, Python.

## ABSTRACT

*The aim of the present study is to develop a computer application for the calculation and analysis of thermal loads in buildings. The modelling of a building entails the definition and parameterization of the various constructive elements of the spaces, including exterior and interior walls, roof, floor and glazed surfaces. Moreover, the application allows for the parameterization of internal thermal loads, including lighting, equipment and occupancy. The thermal loads within the building's spaces are calculated using the transfer function method. The calculation modules have been developed in Python, thereby enabling the quantification of the heat transfer occurring within the building. This is achieved by considering the models that describe the phenomena of conduction, convection and radiation, from a data model that considers climatic conditions, materials, construction elements, spaces, lighting, equipment and occupancy profiles, among other factors. The results of the calculation modules were validated with a commercial application for calculating thermal loads. Validation was conducted on a separate basis for each of the following elements: exterior wall, glazed surface, and lighting. It was determined that the discrepancies between the results were less than 2% in each instance. For an exterior wall with a global transmission coefficient (U) of 1.43 W/m<sup>2</sup>k, a thermal load of 13.37 W/m<sup>2</sup> was obtained for the month of March, which differed by 0.3% from the results obtained using the commercial application. For a glazed surface with a global transmission coefficient (U) of 3.18 W/m<sup>2</sup>k and a shade coefficient of 0.83, the radiative and convective components of the thermal load in June at a latitude of 40°N were found to be 176 W/m<sup>2</sup> and 24.46 W/m<sup>2</sup>, respectively. These values correspond to a deviation of 1.7% and 0.5%, respectively. For a lighting power of 1000 W for 10 hours, the maximum thermal load obtained in both applications was 904 W.*

**Keywords:** Thermal loads, Computer application, Building, Heat transfer, Python.

## 1 INTRODUÇÃO

As cargas térmicas num edifício é a energia em forma de calor que entra ou sai de um espaço. Isto afeta o equilíbrio térmico pretendido num determinado espaço, provocando variações na temperatura e também na humidade do ar. A proveniência das cargas térmicas num espaço pode ser de fontes externas ou internas. As fontes externas dependem das condições climáticas e da constituição da envolvente do edifício. Entende-se por envolvente do edifício, as paredes, a cobertura, o pavimento e as superfícies envidraçadas. As fontes internas dependem da atividade dentro do edifício, como ocupação, equipamentos e iluminação.

Na determinação das cargas térmicas do edifício, é necessário ter em consideração diversos fatores e fenômenos de transmissão de calor. Deste modo, foram desenvolvidos vários métodos de cálculo que modelam os vários fenômenos (Spitler, 2014). Os métodos simplificados são destinados para cálculo manual e determinam a carga térmica para um dia típico, ou dia de projeto. Por outro lado, os métodos que recorrem a ferramentas computacionais permitem obter resultados mais fiáveis, onde é possível analisar as cargas de hora-em-hora (Bhatia, 2022).

As cargas térmicas do edifício são utilizadas para diferentes fins, sendo um deles a seleção e dimensionamento do sistema de climatização necessário para determinado espaço. A determinação das cargas térmicas hora-a-hora permite saber a energia consumida pelo sistema de climatização. Além disso, uma vez que são descritas as envolventes do edifício, os equipamentos, a iluminação e o seu perfil de utilização, é possível obter o consumo e o desempenho energético do edifício (Hussain et al., 2024).

A simulação computacional utiliza modelos que permitem analisar o comportamento de sistemas reais, sendo o modelo desenvolvido realizado num conjunto de instruções programadas em computador. Os modelos devem ser fundamentados em conceitos lógicos, físicos ou matemáticos. A parametrização feita pelo utilizador permite ajustar o modelo de simulação ao caso de estudo, permitindo obter uma melhor compreensão sobre a dinâmica do sistema (McHaney, 2009).

A SADEMON é uma aplicação computacional onde é implementado o método SAPEVO-M, integrando a abordagem multicritério de apoio à decisão (Tenório et al., 2022). Guan et al. (2020) desenvolveram uma aplicação computacional destinada à criação de um modelo de estrutura não linear, simulação estática e dinâmica de estruturas metálicas, bem como o estudo sísmico. Esta aplicação, implementada em Python, segue uma estrutura modular e programação orientada a objetos. Nesta aplicação, o utilizador define a localização do edifício, as cargas no seu interior, bem como a composição do edifício, nomeadamente, a dimensão, número de pisos e tipo de estrutura. Com a informação recolhida, é determinada a secção dos elementos estruturais conforme o estudo sísmico e calculada a resistência à flexão para essa secção.

Neste contexto, o presente artigo visa apresentar o desenvolvimento de uma aplicação em *Python* para a quantificação das cargas térmicas em edifícios. A aplicação integra um modelo numérico, pelo método da função de transferência, que descreve os fenômenos de condução, convecção e radiação que ocorrem num edifício hora-a-hora. Adicionalmente, a aplicação permite definir e parametrizar vários elementos construtivos dos espaços, bem como variar diferentes cargas térmicas internas existentes no edifício.



## 2 METODOLOGIA

A quantificação das cargas térmicas é realizada com recurso ao método das funções de transferência, sendo que os módulos de cálculo são desenvolvidos em linguagem *Python*. O procedimento de cálculo é realizado em duas fases: 1) calcular todos os ganhos térmicos e 2) converter esses ganhos em cargas térmicas (ASHRAE, 1997).

### 2.1 Ganhos térmicos

O ganho térmico num determinado espaço corresponde à quantidade de transferência de calor que é trocado e inserido nesse espaço. O cálculo efetuado para quantificar o ganho térmico depende da sua origem, podendo ser de origem interna ou externa ao espaço. Nesta secção descreve-se os métodos de cálculo para a determinação dos ganhos térmicos num edifício, nomeadamente, na envolvente opaca, superfícies envidraçadas, iluminação, entre outras fontes.

#### 2.1.1 Ganhos térmicos na envolvente opaca

O cálculo do ganho térmico na envolvente opaca (paredes exteriores e coberturas), realizado através do método da função de transferência, é obtido por aplicação dos coeficientes da função de transferência de condução. Estes coeficientes são aplicados às temperaturas interior e exterior e também ao ganho, decorrido na hora atual e nas anteriores. O ganho térmico em paredes exteriores e cobertura num determinado instante  $\theta$ ,  $q_{p,ext}$ , é obtido utilizando a equação 1 (ASHRAE, 1997):

$$q_{p,ext} = A \cdot \left[ \sum_{n=0} b_n(t_{sol,\theta-n}) - \sum_{n=1} d_n \left( \frac{q_{e,\theta-n}}{A} \right) - t_{int} \sum_{n=0} c_n \right] \quad (1)$$

onde,

$A$	= área da superfície [m <sup>2</sup> ];
$t_{sol,\theta-n}$	= temperatura exterior sol-ar na hora $\theta-n$ [°C];
$t_{int}$	= temperatura interior [°C];
$b_n, c_n$ e $d_n$	= coeficientes da função transferência de condução.

A função de transferência de condução permite modelar a resistência e a inércia térmica de uma solução construtiva. Os seus coeficientes são obtidos pela resolução da função de transferência ou recorrendo a tabelas, que perante as soluções construtivas listadas, obtém-se os seus coeficientes. A utilização de tabelas tem como vantagem a realização de um cálculo mais simplificado, necessitando por isso de uma menor capacidade computacional. No entanto, implica que apenas é possível obter o ganho térmico para as soluções construtivas definidas nas tabelas. Os coeficientes utilizados nesta aplicação são obtidos em tabelas, obtidas através do manual *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (ASHRAE, 1997).

O ganho térmico na envolvente opaca depende do próprio ganho, em instantes anteriores, ao determinar o termo  $\sum_{n=1} d_n \left( \frac{q_{e,\theta-n}}{A} \right)$ , como se verifica na equação 1. Desta forma, a sua determinação consiste em calcular uma aproximação inicial para as primeiras 24 horas, considerando o ganho em horas anteriores nulo. O processo de cálculo é iterativo até se obter convergência. Como critério de convergência, utilizou-se a média do ganho térmico da iteração atual (equação 2).

$$\overline{q_{e,d}} = \left( \sum_{\theta=0}^{23} q_{e,\theta} \right) / 24 \quad (2)$$

onde,  $\overline{q_{e,d}}$  = ganho térmico de cada iteração [W];

$q_{e,\theta}$  = ganho térmico de cada hora  $\theta$  [W].

O processo iterativo termina quando o erro relativo entre a média atual e a anterior for inferior ao limite de convergência definido, conforme descrito na equação 3. Se não houver convergência, é definido como critério de paragem um limite máximo de 1000 iterações, na aplicação computacional. Este processo foi implementado em *Python* utilizando o ciclo de repetição *WHILE*.

$$\frac{|\overline{q_{e,d}} - \overline{q_{e,d-1}}|}{|\overline{q_{e,d}}|} < \text{limit\_converg} \vee n\_iter \geq \text{limit\_iter} \quad (3)$$

em que,  $\overline{q_{e,d}}$  = média dos ganhos da iteração atual [W];

$\overline{q_{e,d-1}}$  = média dos ganhos da iteração anterior, [W];

limit\_converg = limite de convergência;

n\_iter = número de iterações;

limit\_iter = limite de iterações.

A temperatura sol-ar,  $t_{sol}$  [°C], é a temperatura exterior que, ao considerar apenas o fenómeno de condução e convecção, resulta no mesmo calor transferido pelo elemento construtivo se for incluído também a radiação solar incidente. Assim, esta representa um valor de temperatura equivalente da superfície exterior que engloba a temperatura do ar exterior e a radiação solar, calculada pela equação 4 (ASHRAE, 1997).

$$t_{sol} = t_{ext} + \frac{\alpha_{sup} \cdot I_t}{h_0} - \varepsilon \frac{\Delta R}{h_0} \quad (4)$$

onde,  $t_{sol}$  = temperatura sol-ar [°C];

$t_{ext}$  = temperatura exterior [°C];

$\alpha_{sup}$  = absortividade da superfície exterior;

$I_t$  = radiação solar total incidente [W/m<sup>2</sup>];

- $h_0$  = coeficiente de convecção na superfície exterior, [W/(m<sup>2</sup>. K)];
- $\varepsilon$  = emissividade hemisférica da superfície;
- $\Delta R$  = diferença entre a radiação refletida que incide na superfície e a radiação emitida pelo corpo negro, em [W/m<sup>2</sup>].

De acordo com ASHRAE (1997), utiliza-se uma absortividade,  $\alpha_{sup}$ , de 0,45 para superfícies claras e de 0,90 para superfícies escuras ou com ausência de informação. Para o coeficiente de convecção na superfície exterior,  $h_0$ , é utilizado um valor de 17 W/(m<sup>2</sup>.K) e a emissividade hemisférica,  $\varepsilon$ , igual a 1. Em superfícies horizontais e verticais utiliza-se uma diferença entre a radiação refletida que incide na superfície e a radiação emitida pelo corpo negro de 63 W/m<sup>2</sup> e 0 W/m<sup>2</sup>, respetivamente. A radiação solar total incidente é obtida em bases de dados meteorológicas ou a partir de modelos de radiação.

### 2.1.2 Ganhos térmicos em superfícies envidraçadas

A superfície envidraçada apresenta um impacto significativo na carga térmica de um edifício, uma vez que permite a transmissão direta da radiação solar (Williamson et al., 2018). O ganho térmico em superfícies envidraçadas é composto por uma componente condutiva, que se deve à diferença térmica entre as condições exteriores e interiores, e por uma componente radiativa, que se deve à radiação solar. A componente condutiva,  $q_{envidraçado,c}$ , é calculada pela equação 5 (ASHRAE, 1997):

$$q_{envidraçado,c} = U \cdot A \cdot (t_{ext} - t_{int}) \quad (5)$$

- onde,  $q_{envidraçado,c}$  = ganho condutivo em superfície envidraçada;
- $U$  = coeficiente de transmissão global da superfície envidraçada, que inclui o vidro e a estrutura [W/(m<sup>2</sup>. K)];
- $A$  = área de abertura [m<sup>2</sup>];
- $t_{ext}$  = temperatura exterior [°C];
- $t_{int}$  = temperatura do espaço [°C].

A componente radiativa da superfície envidraçada,  $q_{envidraçado,r}$ , obtém-se pela equação 6 (ASHRAE, 1997):

$$q_{envidraçado,r} = A \cdot SHGF \cdot SC \quad (6)$$

- onde,  $q_{envidraçado,r}$  = ganho radiativo em superfície envidraçada [W];
- $A$  = área [m<sup>2</sup>];
- SHGF = fator de ganho térmico solar [W/m<sup>2</sup>];
- SC = fator de sombreamento.

O fator de sombreamento, SC, é uma característica do vão envidraçado, sendo este valor fornecido pelo fabricante ou determinado pelo utilizador tendo em conta as suas características. O fator de ganho térmico solar depende da radiação solar incidente, utilizado na envolvente opaca, sendo o método de cálculo utilizado, o descrito no manual *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (ASHRAE, 1997).

### 2.1.3 Ganhos térmicos de iluminação

O ganho térmico proveniente da iluminação,  $q_{iluminação}$ , deve-se, essencialmente, ao elemento emissor de luz, ou seja, as lâmpadas. A existência de equipamentos adicionais que garantem o funcionamento da iluminação devem ser considerados. Estes equipamentos dependem da tecnologia de iluminação instalada. Adicionalmente, também deve ser considerado o horário de utilização da iluminação (ASHRAE, 1997). O cálculo do ganho térmico de iluminação é calculado pela equação 7 (ASHRAE, 1997).

$$q_{iluminação} = W_{lâmp} \cdot F_{sa} \cdot F_{ul} \quad (7)$$

onde,  $W_{lâmp}$  = Potência das lâmpadas [W];

$F_{sa}$  = Fator de equipamentos adicionais (ex.: balastro, transformador, etc.);

$F_{ul}$  = Fator de utilização.

### 2.1.4 Outros ganhos térmicos

Os ganhos térmicos também podem ser provenientes da envolvente opaca interior, da ocupação e dos equipamentos. O ganho térmico obtido através da envolvente opaca interior (paredes, tetos e pavimentos interiores, etc.) depende da área de superfície, da diferença de temperatura entre espaços e da constituição da envolvente. O ganho térmico pela ocupação depende da quantidade de ocupantes e do tipo de atividade desempenhada. O ganho térmico devido aos equipamentos depende da sua potência nominal de serviço (elétrica, mecânica, térmica, etc.).

## 2.2 Cargas térmicas

O ganho térmico é o calor introduzido no espaço num determinado instante, enquanto a carga térmica de arrefecimento é o calor que deve ser transferido por um sistema de climatização de modo a manter a temperatura do espaço constante ao longo do tempo (ASHRAE, 1997). Assim, para cada um dos ganhos térmicos é calculada a correspondente carga térmica, considerando o efeito de acumulação térmica.

O calor introduzido no espaço resulta num ganho térmico, com componente convectiva e radiativa. A componente convectiva é uma carga térmica imediata, afetando diretamente o calor a ser retirado do espaço. A componente radiativa é absorvida pelas superfícies e objetos, o que só é considerada como carga térmica quando houver transmissão

desse calor para o espaço. Assim, o atraso da carga térmica depende da proporção de calor convectivo e radiativo, bem como da capacidade de acumulação das superfícies e objetos no espaço.

A carga térmica é calculada utilizando a equação 8, (ASHRAE, 1997) em que os coeficientes  $v_n$  e  $w_n$  são coeficientes da função de transferência que dependem do tipo de ganho e do peso da construção (ASHRAE, 1997). Estes coeficientes podem ser obtidos em tabelas publicadas em *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (ASHRAE, 1997), em função do peso de construção. O processo de cálculo consiste em obter uma aproximação inicial seguido de um processo de cálculo iterativo, aplicando o mesmo critério de convergência e de paragem utilizados na secção 2.1.1, ou seja, obter um erro entre a média atual e a anterior inferior ao limite de convergência ou exceder o limite de 1000 iterações.

$$Q_\theta = \sum_{n=0} v_n q_{\theta-n} - \sum_{n=1} w_n Q_{\theta-n} \quad (8)$$

onde,  $Q_\theta$  = carga térmica na hora  $\theta$  [W];  
 $v_n, w_n$  = coeficientes da função de transferência do espaço;  
 $q_{\theta-n}$  = ganho térmico em  $n$  horas anteriores [W];  
 $Q_{\theta-n}$  = carga térmica em  $n$  horas anteriores [W].

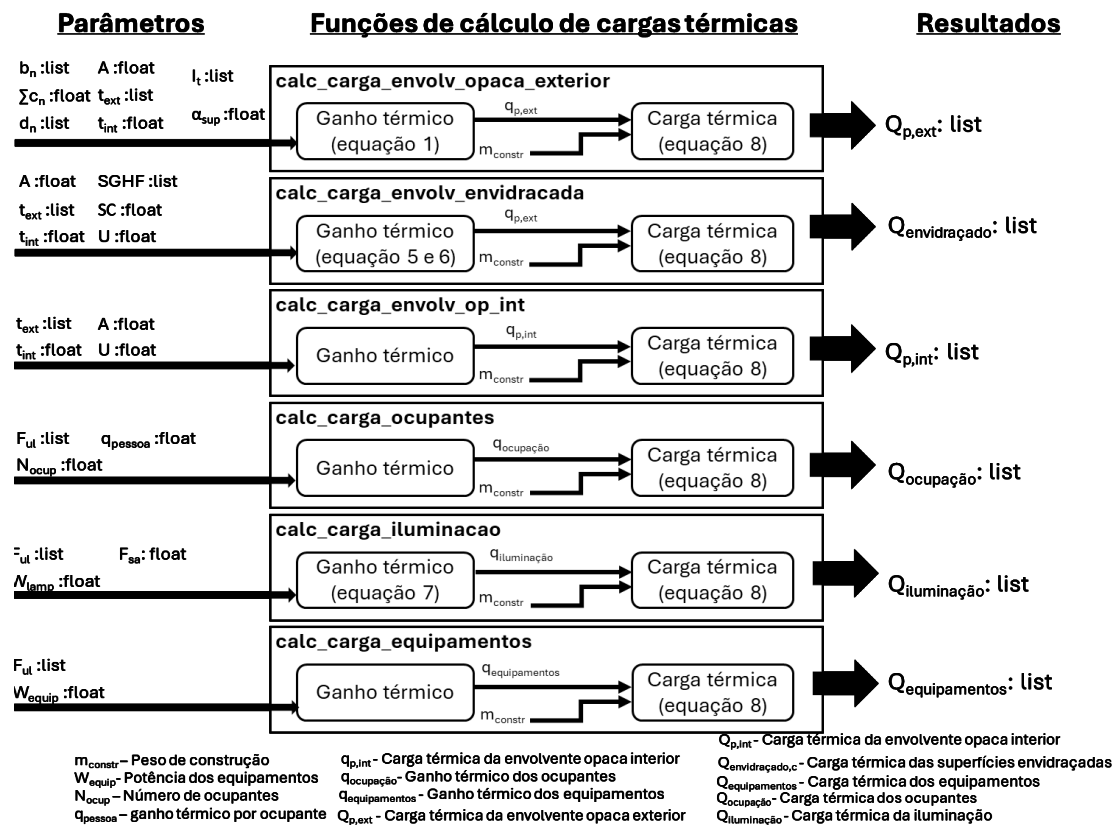
### 2.3 Desenvolvimento da aplicação computacional

Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma aplicação computacional, em *Python*, tendo como foco principal a implementação de algoritmos com modelos numéricos para a determinação das cargas térmicas de um edifício, nomeadamente, para os cálculos de: i) ganhos térmicos (secção 2.1) e ii) cargas térmicas (secção 2.2). Como a determinação da carga térmica depende do tipo de ganho, foram desenvolvidas várias funções para o cálculo dos ganhos e cargas térmicas, sendo que as funções das cargas térmicas utilizam dados provenientes da função dos correspondentes ganhos térmicos, conforme se apresenta na Figura 1.

Para realizar uma simulação, o utilizador deve fornecer os dados que caracterizam o edifício (componentes da envolvente opaca, incluindo a orientação das diversas superfícies) e os dados climatéricos, nomeadamente a radiação solar e a temperatura exterior, que dependem da localização, e da altura do dia do ano. A introdução de dados é realizada através de uma interface externa, a qual não é objeto de estudo deste artigo.

Os dados climatéricos podem ser introduzidos a partir de um ficheiro externo com recurso à biblioteca *Pandas* (*pandas documentation — pandas 2.2.2 documentation, 2024*). Em todas as superfícies é necessário definir as suas áreas e o seu comportamento térmico. Adicionalmente, nas superfícies envidraçadas é necessário caracterizar o fator de sombreamento. Para caracterizar o interior do edifício, deve ser indicada

a quantidade de ocupantes, o ganho térmico por cada ocupante, a potência dos equipamentos e da iluminação, bem como o horário de utilização dos espaços. Sobre o edifício, deve ainda ser indicada a temperatura pretendida no espaço e o peso de construção. As listas de temperatura exterior, radiação solar e horários utilizadas pela aplicação devem caracterizar no mínimo 24 h.

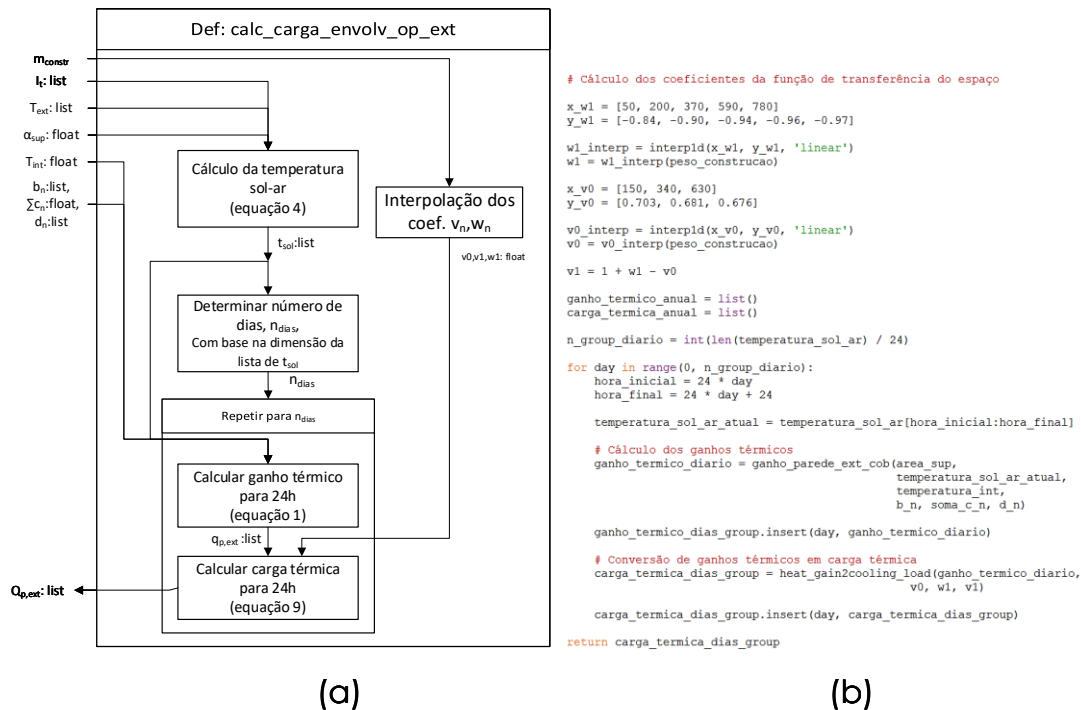


**Figura 1 – Estrutura da aplicação de cálculo desenvolvida em Python**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com as funções implementadas e os parâmetros descritos pelo utilizador, é possível obter as cargas térmicas do edifício para o período descrito pela temperatura exterior, radiação e horários. Os resultados podem ser posteriormente exportados para uma folha de cálculo, utilizando a biblioteca Pandas (*pandas documentation — pandas 2.2.2 documentation, 2024*).

A Figura 2 a) apresenta a estrutura do módulo que contém a função `calc_carga_envolv_opaca_exterior`, utilizada para calcular a carga térmica na envolvente opaca. Na Figura 2 b) é apresentado um excerto do módulo, desenvolvido em *Python*, onde se obtém os coeficientes da função de transferência  $v_n$  e  $w_n$ , em função do peso de construção ( $m_{constr}$ ), e do processo de cálculo da carga térmica na envolvente opaca para vários dias ( $n_{dias}$ ).



**Figura 2 – (a) Estrutura da função do cálculo da carga da envolvente opaca e (b) código Python**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

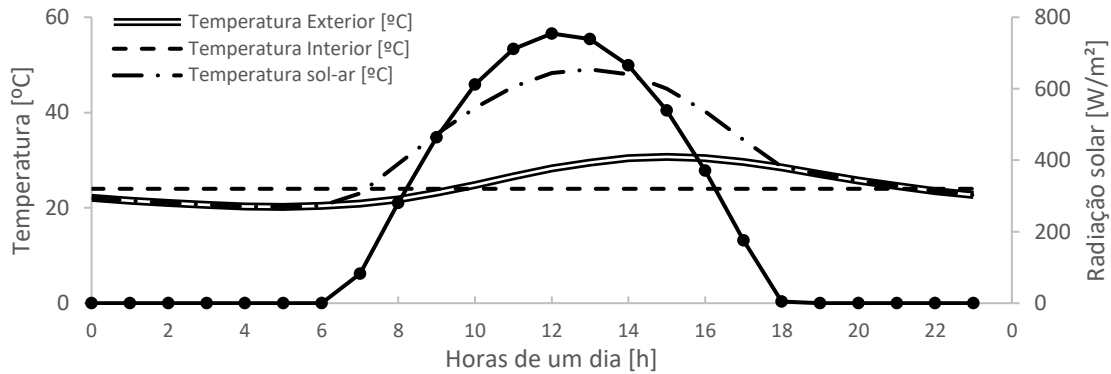
### 3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A validação da aplicação foi efetuada através de uma análise isolada da carga térmica obtida numa parede exterior, uma superfície envidraçada, e iluminação. Adicionalmente, estas análises foram efetuadas para diferentes pesos de construção de modo a avaliar o efeito da inércia térmica do edifício. Os resultados são comparados com os obtidos na aplicação comercial, HAP (Carrier, 2022), versão 4.8. Nesta versão, o cálculo das cargas térmicas é realizado pelo método das funções de transferências (Carrier, 2005). Uma vez que a aplicação desenvolvida implementa o método das funções de transferência, o mesmo método implementado no HAP v4.8, a comparação dos resultados permite validar a aplicação desenvolvida.

#### 3.1 Parede exterior

O cálculo da carga térmica na envolvente opaca é validado com uma parede exterior clara orientada a sul. Esta parede é composta por tijolo de 100 mm, betão de alta densidade, isolamento e camada de acabamento, resultando num coeficiente de transmissão global de 1,43 W/(m<sup>2</sup>. K). O edifício em estudo está localizado em Lisboa, Portugal, e tem um peso de construção de 340 kg/m<sup>2</sup>. De modo a utilizar os mesmos dados no cálculo da carga térmica na envolvente opaca, os dados climatéricos foram obtidos a partir da aplicação comercial HAP para o mês de março e encontram-se representados na Figura 3, onde também

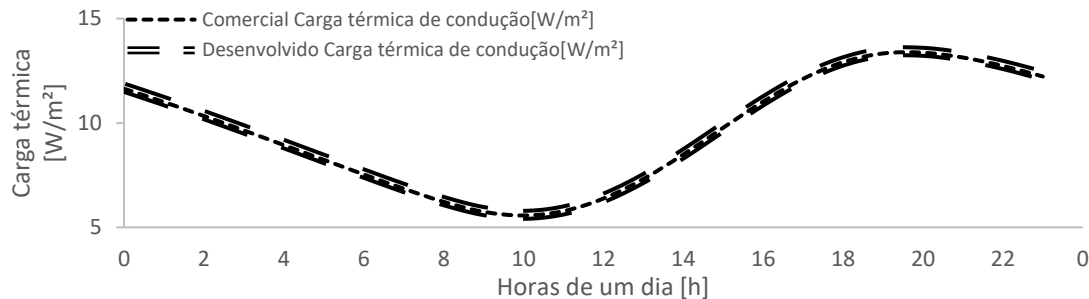
se apresenta a temperatura sol-ar calculada e a temperatura interior estabelecida para o espaço de 24 °C.



**Figura 3 – Temperatura e radiação solar em Lisboa num dia em março**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na Figura 4, é apresentada a evolução da carga térmica da parede exterior, em março, onde se verifica uma carga máxima de 13,37 W/m², às 20 h, que resultou num desvio de 0,3% em relação à carga obtida pelo HAP. Sabendo que a temperatura sol-ar é máxima às 13 h, verificou-se um atraso na carga térmica de 7 h. Este atraso deve-se ao fenómeno de acumulação térmica, bem como a inércia da solução construtiva, conforme mencionado na secção 2.2 e 2.1.1, respetivamente.



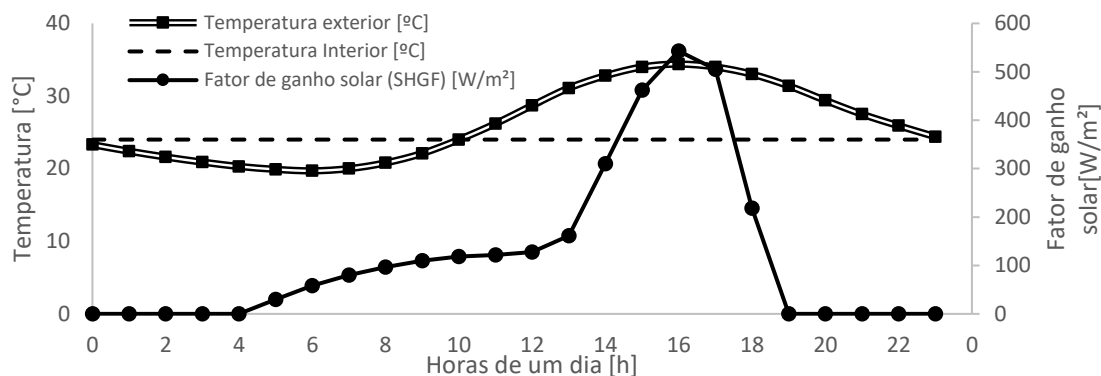
**Figura 4 – Evolução da carga térmica em parede exterior**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

### 3.2 Superfície envidraçada

A carga térmica obtida nas superfícies envidraçadas é validada com uma superfície orientada a noroeste, com coeficiente de transmissão global de 3,18 W/(m². K) e um fator de sombreamento de 0,83. O edifício em estudo apresenta 585 kg/m² de peso de construção. Para validar a aplicação noutra localização geográfica, foi selecionada a cidade de Goodland, Kansas, com latitude de 40°N. Assim, obtém-se da aplicação comercial a temperatura e o fator de ganho solar (SHGF), em junho, ilustrados na Figura 5, onde também se apresenta a temperatura interior estabelecida para o espaço de 24 °C.



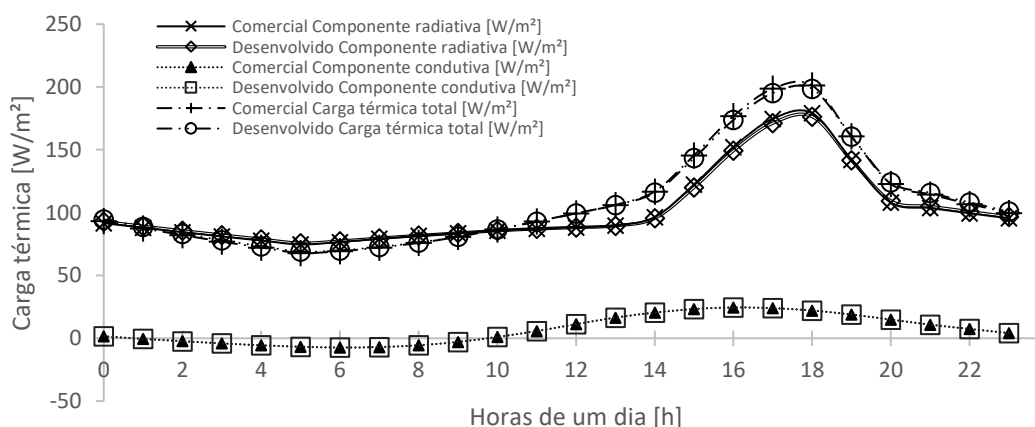


**Figura 5 – Temperatura e fator de ganho solar em Goodland, Kansas, em junho**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com a obtenção do perfil climático apresentado e a metodologia descrita nas secções 2.1 e 2.2, foi possível obter a evolução da carga térmica na superfície envidraçada e das respetivas componentes apresentada na Figura 6.

Verifica-se que a componente radiativa máxima de 176 W/m<sup>2</sup> foi obtida às 18 h e que a componente condutiva máxima foi obtida às 16 h com um valor de 24,46 W/m<sup>2</sup>, correspondendo a um desvio em relação à aplicação HAP de 1,7% e 0,5%, respetivamente. Para a superfície orientada a noroeste, em Goodland, Kansas, o fator de ganho solar é máximo às 16 h, o que representa um atraso de 2 h na carga térmica radiativa máxima. Por outro lado, a temperatura exterior é máxima às 16 h, onde não se verificou qualquer atraso em ambas aplicações. A diferença no comportamento térmico deve-se ao fenómeno de acumulação térmica, que depende do peso de construção e do tipo de ganho, conforme descrito na secção 2.2. A carga máxima total na superfície envidraçada foi de 199 W/m<sup>2</sup> às 18 h, o que correspondeu a um desvio de 1,3%, em relação aos resultados do HAP.

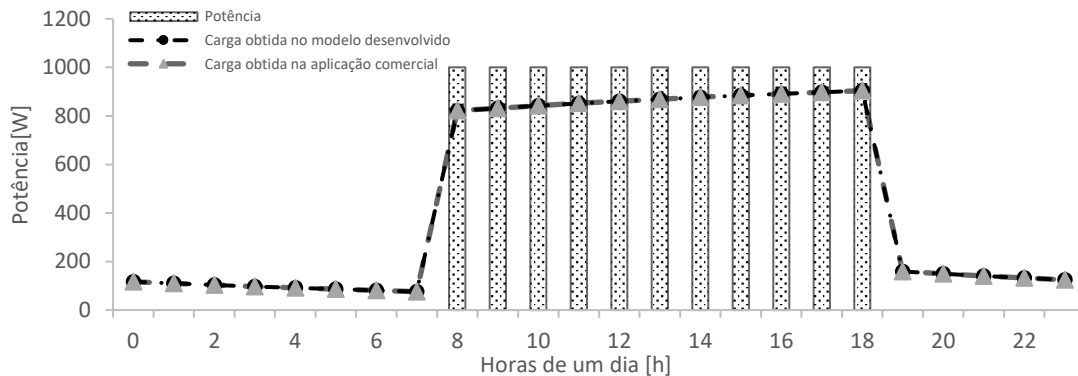


**Figura 6 - Evolução da carga térmica em superfícies envidraçadas**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

### 3.3 Iluminação

O cálculo de carga térmica devido à iluminação foi validado considerando a utilização de uma potência elétrica de 1000 W, num período normal de funcionamento de um edifício, das 8 h às 18 h, resultando em 10 h de utilização. Considerando o peso de construção do edifício de 370 kg/m<sup>2</sup>, obteve-se a evolução da carga térmica apresentada na Figura 7. A carga máxima obtida foi de 904 W às 18 h, situação que se verificou em ambas as aplicações.



**Figura 7 - Evolução da carga térmica de iluminação**

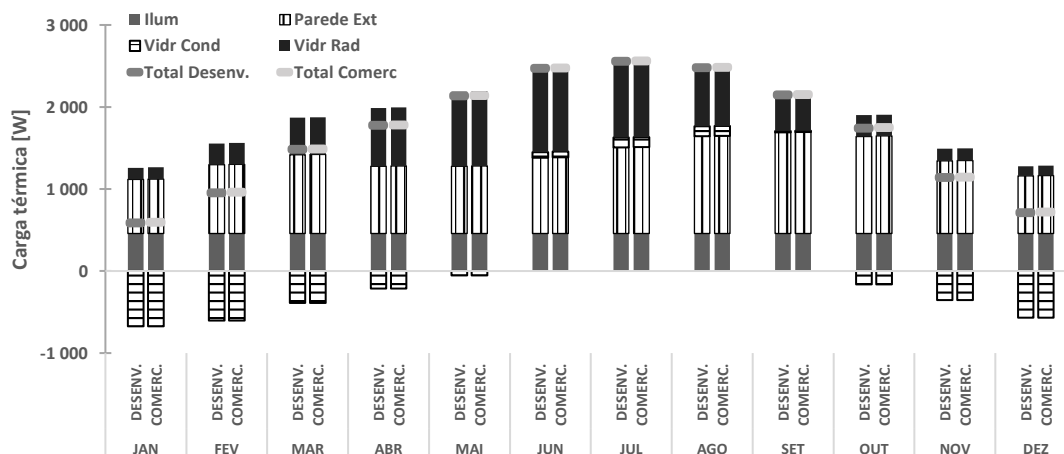
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

### 3.4 Condições exteriores

A influência da variação das condições exteriores ao longo do ano, temperatura e radiação solar, foi verificada para os elementos: parede exterior, a superfície envidraçada e iluminação descritos na secção 3.1, 3.2, 3.3, respetivamente. Foi considerada uma área de parede exterior e de superfície envidraçada igual a 100 m<sup>2</sup> e 10 m<sup>2</sup>, respetivamente. Na Figura 8, são apresentadas as cargas térmicas médias mensais obtidas ao longo do ano, onde se verifica a mesma tendência em ambas aplicações, com um desvio máximo de 0,9% no mês de janeiro.

A carga térmica na parede exterior foi máxima no mês de setembro sendo concordante com a evolução da temperatura exterior e radiação solar. A temperatura exterior foi máxima nos meses de julho e agosto e a radiação solar para a superfície orientada a sul foi máxima no mês de janeiro. Neste sentido, a carga térmica na parede exterior é máxima quando a combinação da temperatura exterior e radiação solar incidente for maior, ou seja, quando a temperatura sol-ar foi máxima.

Na superfície envidraçada, a carga térmica radiativa foi máxima no mês de junho, dado que o fator de ganho solar numa superfície orientada a noroeste é máximo no mês de junho. A carga térmica condutiva é máxima em julho e agosto, uma vez que a temperatura exterior é máxima nestes meses. Por outro lado, a carga térmica condutiva é mínima no mês de janeiro, onde a temperatura exterior se verificou ser a menor, resultando numa perda térmica significativa.



**Figura 8 – Evolução média anual das cargas térmicas em parede exterior, superfície envidraçada e iluminação**

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A carga térmica de iluminação manteve-se constante ao longo do ano, uma vez que se considerou um perfil de utilização constante durante todo ano, não sendo afetado pelas condições exteriores.

Os resultados obtidos pela aplicação computacional apresentaram um desvio inferior a 2% relativamente aos obtidos pela aplicação comercial, o que permitiu validar o seu funcionamento. O uso de diferentes pesos de construção, períodos do ano, orientações, entre outras características permitiu avaliar a versatilidade da aplicação desenvolvida, que não se limitou apenas à obtenção da carga térmica em situações extremas.

#### 4 CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo demonstrar o desenvolvimento de uma aplicação que permite calcular as cargas térmicas num edifício. Nesta aplicação, o utilizador deve fornecer a informação sobre a localização, as características da construção e a atividade desempenhada nesse edifício.

Os resultados obtidos permitem contabilizar os efeitos de transmissão de calor de radiação, convecção e condução, de inércia e acumulação térmica da construção, numa análise de hora-a-hora de um edifício. A aplicação recorre a dados de envolventes opacas predefinidas para determinar os coeficientes de função de transferência a usar no cálculo das cargas térmicas.

A aplicação foi desenvolvida em Python, onde foram implementadas as equações de ganho e carga térmica. Estas equações foram implementadas em funções específicas, uma para cada tipo de ganho. Deste modo, a carga térmica é obtida assim que a informação for submetida, sem necessitar de calcular o ganho e a carga térmica em momentos distintos. Posteriormente à execução dos cálculos, os

resultados obtidos podem ser exportados para ficheiros de dados, utilizando uma biblioteca para esse efeito.

Por fim, a aplicação computacional foi validada através de uma parede exterior, uma superfície envidraçada e iluminação. Os resultados da aplicação computacional obtiveram um desvio máximo de 2% comparativamente ao obtido na aplicação comercial HAP, validando o método implementado. Na parede exterior, com coeficiente de transmissão global 1,43 W/(m<sup>2</sup>. K), obteve-se uma carga térmica em março de 13,37 W/m<sup>2</sup>, que diferiu em 0,3% da aplicação comercial. Na superfície envidraçada a uma latitude de 40°N em junho, com um coeficiente de transmissão global de 3,18 W/(m<sup>2</sup>. K) e um fator de sombreamento de 0,83 obteve-se 176 W/m<sup>2</sup> de componente radiativa e 24,46 W/m<sup>2</sup> convectiva, correspondendo a um desvio de 1,7% e 0,5%, respetivamente. Para uma potência de 1000 W de iluminação durante 10h obteve-se uma carga térmica máxima de 904 W em ambas as aplicações. No que se refere à resposta da aplicação computacional em relação à variação das condições exteriores, verificou-se um desvio máximo de 0,9% na evolução da carga térmica média ao longo do ano.

## REFERÊNCIAS

- ASHRAE. (1997). *1997 ASHRAE Handbook: Fundamentals*.
- Bhatia, A. (2022). *Cooling Load Calculations and Principles - Professional Engineer PDH*. <https://www.cedengineering.com/courses/cooling-load-calculations-and-principles>
- Carrier. (2005). *HAP v4.20 e-Help Transfer Function Methodology (TFM)*.
- Carrier. (2022). *HAP v6 - Building load calculation and energy modeling software*. <https://www.carrier.com/commercial/en/us/software/hvac-system-design/hourly-analysis-program/>
- Decreto-Lei n. 79/2006, de 4 de abril (2006).
- Guan, X., Burton, H., & Sabol, T. (2020). Python-based computational platform to automate seismic design, nonlinear structural model construction and analysis of steel moment resisting frames. *Engineering Structures*, 224, 111199. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111199>
- Hussain, M., Kumar, A., Malipatil, S., & Holkar, R. (2024). Energy Analysis and Design of HVAC System Using BIM. *International Journal of Thermal Engineering (IJTE)*, 12(1), 1–21. <https://iaeme.com/Home/issue/IJTE?Volume=12&Issue=1>
- McHaney, Roger. (2009). *Understanding computer simulation*. Ventus Publishing.
- pandas documentation — pandas 2.2.2 documentation*. (2024). <https://pandas.pydata.org/docs/index.html>
- Spitler, J. D. (2014). *Load calculation applications manual* (ASHRAE, Org.; Second edition). [www.ashrae.org/publication](http://www.ashrae.org/publication)
- Tenório, F. M., Moreira, M. Â. L., De Araújo Costa, I. P., Gomes, C. F. S., Dos Santos, M., Silva, F. C. A., Da Silva, R. F., & Babilio, M. P. (2022). SADEMON: The Computational Web Platform to the SAPEVO-M Method. *Procedia Computer Science*, 214(C), 125–132. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2022.11.157>

Williamson, J. L., Fu, T., Gabby, B., Testa, J., Hu, C., & Gumpertz, S. (2018). *Glazing in Commercial Buildings - The balance between cost and energy consumption*. [www.ibpsa.us](http://www.ibpsa.us)



## **UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE APRENDIZAGEM AUTOMÁTICA PARA TIPIFICAÇÃO DO RISCO DE ABANDONO ESCOLAR**

PEDRO, NKANGA (1); FAZENDEIRO, PAULO (2)

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, UNIVERSIDADE KIMPA VITA, E-mail:  
[nkanga.pedro@ubi.pt](mailto:nkanga.pedro@ubi.pt)

(2) INSTITUTO DE TELECOMUNICAÇÕES (IT), UNIVERSIDADE DA BEIRA  
INTERIOR, E-mail: [pandre@di.ubi.pt](mailto:pandre@di.ubi.pt)

### **RESUMO**

Este estudo foca-se na identificação e prevenção do risco de abandono na Universidade Kimpa Vita (UNIKIVI) com base no desempenho escolar dos alunos. O objetivo geral é treinar um modelo de Aprendizagem Automática (AA) capaz de prever problemas como abandono de alunos inscritos e o aumento da taxa de reprovações na instituição. Para atingir esse objetivo, foram empregadas diversas técnicas de AA propondo um conjunto de dados académicos recolhidos de 5 cursos diferentes correspondentes a 7 anos letivos (de 2016/2017 a 2022/2023 dos cursos de Contabilidade e gestão, Hidráulica e saneamento de água, Agronomia, Engenharia Informática e Enfermagem). Após a recolha do percurso académico dos alunos, feito o pré-processamento dos dados, foi conduzido um processo de engenharia e seleção de atributos, construindo assim os conjuntos de dados. Para identificar padrões de comportamento entre os alunos, foi utilizado um modelo de aglomeração Kprototypes, que dividiu os alunos em 5 grupos com características semelhantes. Embora o modelo de aglomeração já permita atribuir etiquetas a novos dados, algoritmo de classificação como Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM) e Decision Tree (DT) foram empregados para refinar as predições, comparando instâncias com as etiquetas atribuídas e melhorando a precisão do modelo ao prever a probabilidade de abandono de cada aluno com base dos cinco grupos predito e, por fim, utilizamos métricas apropriadas para avaliar a precisão dos modelos. A fim de lidar com desbalanceamento dos dados, aplicou-se o algoritmo SMOTE. Os resultados demonstram um desempenho satisfatória dos modelos preditivos, taxa de acerto variando entre 93% a 95%. Apesar das limitações relacionadas ao tamanho do conjunto de dados, este trabalho apresenta contribuições significativas ao explorar o potencial das técnicas de AA para prever o abandono escolar.

**Palavras-chave:** Abandono escolar, Aprendizagem Automática, Desempenho acadêmico, Modelo de Classificação e Kprototypes.

## ABSTRACT

This study focuses on identifying and preventing the risk of dropout at Kimpa Vita University (UNIKIVI) based on students' academic performance. The general objective is to train a Machine Learning (ML) model capable of predicting issues such as student dropout and an increase in the failure rate at the institution. To achieve this goal, various ML techniques were employed, proposing a set of academic data collected from 5 different courses corresponding to 7 academic years (from 2016/2017 to 2022/2023) including Accounting and Management, Hydraulic and Water Sanitation, Agronomy, Computer Engineering, and Nursing. After collecting the students' academic progress and preprocessing the data, an attribute engineering and selection process was carried out, thus constructing the datasets. A K-prototype clustering ML model was used to identify behavioral patterns among the students. This helped to divide the students into 5 groups with similar characteristics. Although the clustering model already allows labels to be assigned to new data, classification algorithms such as Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM) and Decision Tree (DT) were used to refine the predictions, comparing instances with the assigned labels and improving the model's accuracy by predicting the probability of each student's dropout based on the five predicted groups. Finally, appropriate metrics were used to evaluate the accuracy of the models. To address data imbalance, the SMOTE algorithm was applied. The results demonstrate highly satisfactory performance of the predictive models, with accuracy ranging between 93% and 95%. Despite limitations related to the dataset size, this work makes significant contributions by exploring the potential of ML techniques for predicting school dropout.

**Keywords:** School Dropout, Machine Learning, Academic Performance, Classification Model, and K-prototypes.

## 1 INTRODUÇÃO

Em Angola, a UNIKIVI desempenha um papel fundamental na formação de jovens talentos em diversas áreas. No entanto, uma questão que tem despertado a atenção na província do Uíge, onde está inserida e não só, é a taxa de reprovações, desistência de alunos e transição de alunos para outras instituições de ensino superior. Os alunos com reprovações consecutivas apresentam maior probabilidade de desistir do curso, o que contribui para o aumento do desemprego e desigualdade social.

O presente artigo foca-se na identificação do risco de abandono escolar na UNIKIVI com base no desempenho escolar dos alunos com objetivo

de treinar o modelo de AA capaz de prever problemas como abandono de alunos inscritos e o aumento da taxa de reprovações na instituição. Existem várias explicações possíveis para a elevada taxa de reprovações na UNIKIVI. Entre as possíveis explicações estão a preparação insuficiente dos alunos para o ensino superior, escolhas inadequadas de curso, desigualdade no acesso à educação de qualidade, entre outros fatores como desigualdades sociais (incluindo pobreza) e métodos de avaliação deficientes. A aplicação de técnicas de AA, como algoritmos de aglomeração e classificadores, ajudará a identificar alunos em risco de abandono escolar, permitindo que a instituição tome medidas preventivas.

Em termos de abandono no ensino superior, em geral, são cada vez mais comuns as notícias acerca das crescentes necessidades de vária ordem que assolam as famílias. De acordo com uma pesquisa do Jornal de Angola de 2021, a desistência está relacionada com o aumento do número de reprovações na UNIKIVI (CAPITÃO, 2021). Além disso, pesquisas realizadas por outros jornais do país mostram preocupação com a fuga de alunos da instituição, como menciona o jornal AngoEmprego (ANGO EMPREGO, 2021), também os alunos têm se manifestados contra o número de reprovações, recursos, taxa de emolumentos e alegações de injustiças (FRANCISCO, 2021).

## **2 ESTADO DA ARTE**

Existem vários trabalhos e artigos que já abordaram a relação entre o desempenho académico, abandono escolar e a taxa de reprovações nas instituições de ensino. No trabalho de (RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ; CASCALLAR; KYNDT, 2020), discute-se a relação entre situação socioeconómica (SES) e desempenho académico no ensino superior, argumentando que essa relação é importante para entender e melhorar o desempenho académico. O artigo utiliza uma metodologia mista, incluindo pesquisa bibliográfica, seleção de literatura, análise crítica e análise de conteúdo para analisar as diferentes medidas de SES e desempenho académico, e determinar o papel dos fatores como mediadores na relação entre SES e desempenho académico. O estudo de (LI; DING; ZHANG, 2021), utilizou uma metodologia de revisão sistemática para avaliar a eficácia da educação centrada no aluno no desempenho académico. Foi incluída uma revisão de estudos publicados entre 2010 e 2020, que investigaram diferentes modelos de ensino centrado no aluno, como aprendizagem cooperativa, aprendizagem independente, aprendizagem experimental e técnicas de sala de aula invertida. A meta-análise foi realizada utilizando técnicas quantitativas e 42 dos 81 artigos revistos foram selecionados para a análise.

Já com as noções obtidos nos artigos anterior, abordamos agora a questão da desistência de certos alunos por razões mencionadas nos artigos acima, então exploramos com maior detalhes os trabalhos de (IAM-ON; BOONGOEN, 2017) e (SOOD; SAINI, 2021). Estes discutem o uso



da mineração de dados para melhorar a retenção de alunos e entender o comportamento deles. Ambos os artigos mencionam que a mineração de dados educacionais é um campo de pesquisa em crescimento que usa métodos computacionais para analisar grandes coleções de dados educacionais. Os autores usam técnicas, como algoritmos de AA, para desenvolver modelos preditivos para identificar alunos em risco. O artigo de (MDUMA; KALEGELE; MACHUVE, 2019) tenta mostrar o quanto é importante o uso de AA para a resolução de problema de abandono escolar. Este aborda o uso de AA para reduzir as taxas de abandono escolar dos alunos, visando identificar os fatores que contribuem para abandono e desenvolver modelos preditivos que possam identificar alunos em riscos de abandono escolar. Os autores utilizaram diferentes modelos de AA tal como Regressão Logística, Árvore de decisão, redes neuronais, SVM e RF para ter os resultados desejados. De igual modo, o artigo de (KIM et al., 2023), aborda a previsão de abandono de alunos numa universidade, utilizando métricas precisão e recall. O objetivo é identificar antecipadamente os alunos que estão em risco de abandonar os seus estudos, permitindo que a universidade tome medidas preventivas para ajudá-los a permanecerem matriculados. Este artigo propõe um modelo híbrido para prever os alunos que estão prestes a abandonar a universidade. O modelo tenta aumentar a precisão e a taxa de recall na previsão dos abandonos. Em seguida, o conjunto de recursos foi comprimido com PCA e aplicado a aglomeração K-Means para analisar a razão do abandono.

Após analisar alguns fatores e métodos apresentados em artigos anteriores, chegamos a um consenso de que combinaríamos esses alunos com os nossos dados mistos para permitir uma melhor identificação, segundo (LIANG et al., 2012), onde é uma proposta uma nova maneira de descobrir quantos clusters existem em conjuntos de dados mistos com atributos numéricos e categóricos. Este artigo discute a tarefa de agrupar dados mistos, que consistem em atributos numéricos e categóricos. Além disso, é introduzida uma nova medida de dissimilaridade no algoritmo k-protótipos e é desenvolvido um algoritmo para determinar o número de clusters num conjunto de dados misto.

Utilizamos esses artigos como base de estudo para a ideia de criar perfis dos alunos com base na classificação do grau de risco de abandono escolar. Também fornecemos clareza sobre a maneira como todos eles utilizaram a classificação como modelo principal de previsão de risco, com o modelo de DT e RF dominando a classificação de abandono escolar.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Introdução**

Nesta secção, apresentamos a metodologia adotada para abordar a tipificação do risco de abandono escolar e da taxa de reprovações num contexto académico. Esta metodologia produz passos necessários para

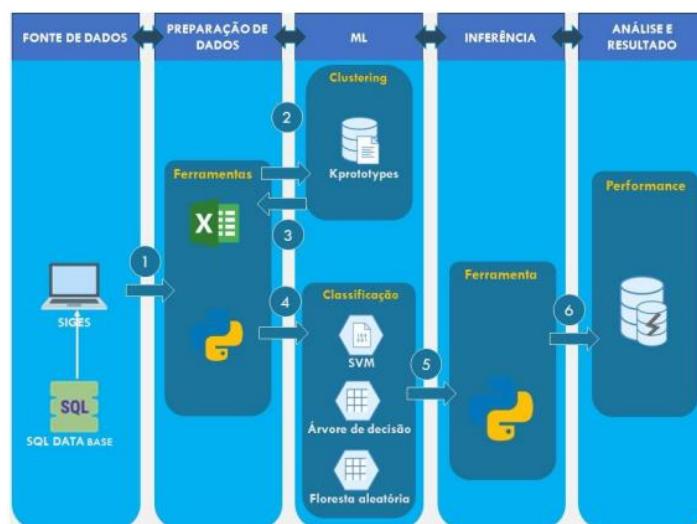
desenvolver um modelo robusto para estimar o risco individual de cada aluno abandonar a escola, gerando aplicações para apoiar a tomada de decisão de políticas públicas. Com abandono dos alunos o avanço de pesquisas anteriores, esta proposta foca-se na criação e análise de perfis individuais de alunos com modelo de aglomeração, incorporando o perfil criado na classificação para prever o abandono com diferentes modelos.

### **3.2 Método utilizado**

Para avaliação das diferentes técnicas de AA usados neste artigo, foi considerado um conjunto de dados relativo aos alunos que frequentaram os cursos de Engenharia Informática, Contabilidade e Gestão, Hidráulica e Saneamento de Água, Agronomia e Enfermagem Geral na UNIKIVI, nos anos académicos de 2016 ao 2022/2023. O conjunto de dados é constituído por 20056 registos (alunos com vários registos histórico) com 20 atributos que foram extraídos a partir do aplicativo académico utilizado na UNIKIVI designado SIGES.

Os algoritmos de AA utilizados neste estudo permitiram tipificar de forma eficiente o abandono escolar dos alunos. Foi utilizado um modelo de aglomeração para agrupar os alunos com base em características relevantes. Embora o modelo de aglomeração permita a atribuir etiquetas a novos dados, optámos por aplicar algoritmos de classificação adicionais para refinar as predições, comparando novas instâncias com os grupos previamente identificados. Esta etapa adicional melhora a precisão do modelo ao prever a probabilidade de abandono de cada aluno. Tanto os modelos de AA não supervisionada como os de aprendizagem supervisionada recebem dados inéditos durante o processo de inferência. Inicialmente, foi utilizado o modelo Kprototypes para agrupar os alunos conforme os seus perfis. Posteriormente, a variável agrupamento, ou seja, os cluster, foi adicionada ao novo dataset para ser alimentada no treino para os modelos de AA supervisionada, que calculam a probabilidade dos alunos que abandonam a escola. O registo de modelos facilita o acompanhamento de modelos treinados na universidade. As etapas do estudo estão ilustradas na Figura 1.

#### **Figura 1 – Método de validação**



Fonte: De autores

### 3.3 Estrutura de dados dos alunos

As informações relevantes para o modelo de abandono escolar dos alunos incluem elementos que impactam o comportamento dos alunos. A Tabela 1, lista os elementos de dados que afetam os padrões de abandono e retenção dos alunos.

**Quadro 1 – Atributos abstraídos da UNIKIVI**

Característica	Tipo	Descrição
CodAluno	Número	Código do aluno
Nom_compl	Categórico	Nome completo do aluno
Id. Institucional	Categórica	Código da Instituição atual
Sexo	Categórica	Sexo do aluno (Masculino e Feminino)
Idade	Número	Idade do aluno (19 a 75 anos)
Ano_Lect_Ingresso	Número	Ano de Ingresso na Universidade
Turma acesso	Categórica	Turma (TL101, TL201 e TL202)
Ano(classe)	Número	Nível do aluno (1º ano ao 4º ano), exceto curso de Enfermagem e Hidráulica que estende ao 5º ano
Morada	Categórica	Endereço do aluno
Institui_Proveni	Categórica	Código da Instituição da Proveniência
Desc. habilitação anterior	Categórica	Descrição da habilitação anterior do aluno comprida entre 11º, 12º ou 13º Classe
Nome_instit_curso	Categórica	Nome da instituição do curso anterior
Período	Categórica	Período que aluno frequentou (Manhã e Tarde)
Esta_civil	Categórica	Estado civil do aluno

Característica	Tipo	Descrição
Naturalidade	Categórica	Naturalidade do aluno
Habilita_literá_pai	Categórica	Habilitação literária do pai (Não estudou, Técnico básico, Técnico Médio, Licenciado, Mestrado, Doutor e Técnico Profissional)
Habilita_liter_mãe	Categórica	Habilitação literária da mãe (Não estudou, Técnico básico, Técnico Médio, Licenciado, Mestrado, Doutor e Técnico Profissional)
Semestre	Categórico	Histórico de semestre (1º e 2 semestre)
Curso	Categórica	Curso do aluno
Ano_Acad	Número	Ano académico (dados recolhidos)

Após análise exploratória foram adicionados os atributos seguintes a situação de cada aluno, incluindo o número de inscrições do aluno, o ano da primeira e última matrícula do aluno, o número de vezes que o aluno foi reprovado em cada classe e a situação de abandono, ou o número de anos abandonados. Isso permitiu-nos analisar por classe e por curso para descobrir quais cursos são mais frequentes na instituição de origem, estabelecendo perfis e outras características. Ficamos com 4354 registos (alunos) e 21 registos, a tabela mostra os atributos restantes.

**Tabela 2 – Atributos selecionados**

Característica	Descrição
CodAluno	Código do aluno
Sexo	Sexo do aluno
Idade	Idade do aluno
Ano_ingres	Ano de ingresso do aluno (Primeira matrícula do aluno)
Ulti_matri	Última matrícula ou último registo na faculdade do aluno (Última matrícula do aluno)
Num_repro	Número de vez que aluno já reprovou durante o seu ciclo
Dura_Curso	Duração do curso que é de 4 anos, exceto curso de Enfermagem e Hidráulica e saneamento de água que são 5 anos de duração
N_inscri	Número de vez foi inscrito, visto que por regra um aluno deve se inscrever pelo menos uma vez por ano, mas no caso de dever disciplinas noutra classe, ele deve se inscrever mais neste caso duas vez num ano assim por diante
N_abando	Número de vez que aluno abandonou a faculdade

Característica	Descrição
Clas_atual	Classe que está a frequentar ou frequentou atualmente
Semestre	Semestre que pode ser 1 ou 2 semestre
Período	Período que aluno frequentou
Esta_civil	Estado civil do aluno
Naturalidade	Naturalidade do aluno
Habil_pai	Habilitação do pai
Habil_mãe	Habilitação da mãe
Insti_Proven	Instituição de Proveniência do aluno
Corresp_inst_curso	Código da correspondência do curso de proveniências (valor 1 representa a correspondência do curso frequentado na instituição anterior e 0 caso contrário)
Curso	Curso do aluno (Informática, Enfermagem, Contabilidade e Gestão, Agronomia e Hidráulica e saneamento de água)
Ano_Acad	Ano académico (dados recolhidos de 2016 a 2022)
Status	Situação do aluno que pode ser "Cursando", "Concluído" ou "Abandonado", neste caso se olharam últimos registos (Ano académico 2022) dos dados recolhidos.

Os algoritmos de aglomeração Kprototypes e modelos de classificação como DT, SVM e RF foram usados como métodos de AA para resolver o problema de abandono e reprovação na universidade. As técnicas de pré-processamento utilizadas incluíram o tratamento de dados desbalanceados, ruídos, incompletos, redundâncias e conversão de dados categóricos em números.

### 3.4 Os perfis de alunos utilizando aglomeração

Para formar grupos de perfis de alunos em risco de abandono escolar com AA, é importante levar em consideração uma variedade de elementos. O estudo enfatiza a importância de examinar informações das variáveis que se encontra na tabela 2. O objetivo desta fase é fornecer um sistema de alerta precoce para um grupo de aluno em risco de abandono e aumentar a nossa compreensão dos diferentes perfis de alunos e o seu comportamento dinâmico ao longo do tempo.

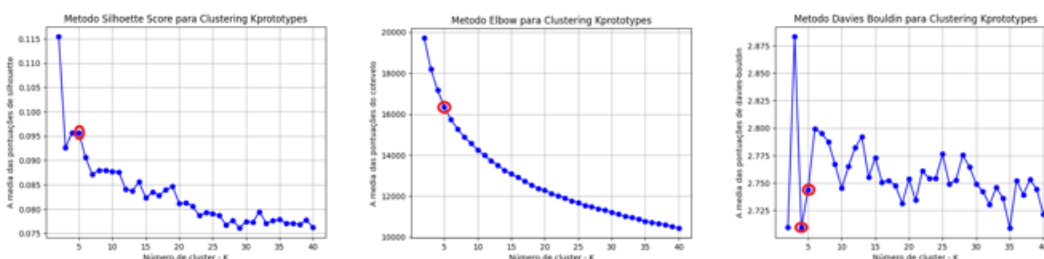
Para determinar o número ideal de clusters (k), empregamos a técnica de repetição 20 vezes de k=2 a 40. Calculamos a média de cada k para evitar resultados aleatórios. Utilizamos métodos de validação, como método Elbow, Silhueta e Davies\_bouldin, para selecionar o k ideal. Posteriormente, aplicamos o algoritmo Kprototypes para segmentar os alunos em perfis distintos.

A abordagem Elbow, Silhouette Score e Davies\_bouldin Method com múltiplas iterações médias é uma abordagem sólida e criteriosa para

encontrar o valor ideal de k. Além disso, os resultados são comparados. Uma estratégia é usar a técnica de iterar várias vezes dentro dos clusters e calcular a média para encontrar o valor ideal de k. Isso aumenta a confiabilidade dos resultados porque as iterações podem variar e a média ajuda a reduzir as flutuações. Isso leva em consideração a variação e a estabilidade entre vários valores k ao longo das iterações.

A figura 2 mostra os resultados médios da aplicação dos métodos de validação de aglomeração selecionados.

**Figura 2 – Método de validação**



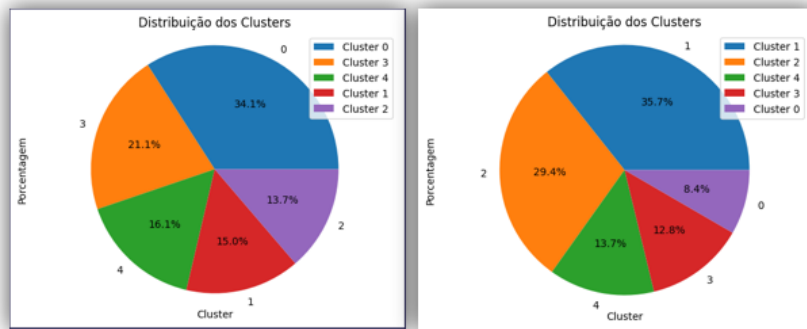
Esta tabela 3, apresenta os resultados de vários métodos de validação para previsão de aglomeração usando o algoritmo Kprototypes.

**Tabela 3 – Atributos selecionados**

Categoria	Método/Técnica	Valor
Previsão de aglomeração com Kprototypes	Método do Cotovelo	K = 5
	Método do Score Silhouette	K = 5
	Método de Davies_bouldin	K = 4, K = 5
	Média	5
	Frequência (Ideal)	5

Com base nestes resultados, poderia argumentar-se que quer 4 ou 5 grupos de dados seria uma escolha adequada. Após a seleção do valor k ideal usando os métodos acima mencionados, aplicamos o algoritmo Kprototypes para segmentar os alunos em perfis distintos. Os cinco perfis criados com as suas diferentes características constam em anexo. A Figura 3 mostra a repartição de aluno distribuído em diferente cluster, tendo sido realizado testes com a utilização da variável Status (lado esquerdo) e com a remoção da variável Status (lado direito).

**Figura 3 – Distribuição de aluno em cluster**



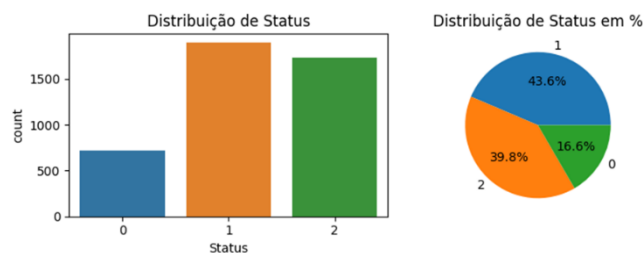
### 3.5 As classificações de alunos com modelo de AA

A pesquisa alcançou uma precisão de classificação extremamente alta. Usando a validação cruzada, resultados para SVM é de 93% e Árvore de decisão e floresta aleatória tem 95%.

Os modelos de previsão podem ajudar a minimizar perdas na instituição. Para classificar os alunos em risco de abandono escolar com AA, levou-se em consideração uma variedade de elementos.

O dataset usado contém alunos assim distribuídos: concluído tem 43,6% (1899 alunos), cursando tem 39,8% (1732 alunos) e abandono 16,6% (723 alunos), a Figura 4 mostra em detalhes a distribuição de estado de aluno em percentagem. Como estamos a prever a abandono e o sucesso acadêmico de aluno, essa imagem mostra em detalhes os dados que pretendemos prever, onde temos Status de Abandono representado por 0, Status de Concluído por 1 e por fim Status Cursando por 2.

**Figura 4 – Distribuição de estado**



Uma estratégia é utilizar três tipos de técnica de classificação para poder encontrar a melhor. Isso aumenta a confiabilidade dos resultados. Ao comparar os resultados desses métodos, chegamos a uma melhor conclusão. Utilizamos os modelos de AA de SVM, RF e DT. Para melhor treinar o modelo passaremos por Transformar os dados para a escala padronizada, a razão da escolha de padronização relativamente à normalização visto que SVM é mais sensível na técnica de normalização.

Inicialmente, o modelo foi treinado com os desbalanceados. Posteriormente, utilizou-se a técnica SMOTE para gerar dados sintéticos, aumentando a quantidade de amostras da classe minoritária. O objetivo foi equilibrar as classes, ajustando as amostras da classe minoritária para

cerca 50% da classe majoritária. O conjunto final contém amostras reais e sintéticas.

### 3.6 Resultado de classificação

É interessante comparar os desempenhos de vários modelos e determinar qual é o mais eficaz. Utilizando a técnica de validação cruzada k-fold com k=5, com dados não balanceados, o SVM teve uma taxa de 93%, uma árvore de decisão de 95% e uma RF de 96%, enquanto no caso de dados balanceados, o SVM manteve uma taxa de 93% e árvore de decisão de 95%, quanto ao RF foi de 95%. Esses resultados nos permitem ter uma ideia do nosso resultado. Esses valores mostram que os modelos são excepcionalmente precisos na classificação de dados e podem identificar casos positivos.

Na tabela 4, apresentam os resultados de três modelos de classificação: SVM, DT e RF, os nomes das classes são 0, 1 e 2. O desempenho desses modelos foram analisados em duas situações diferentes: dados balanceados e não balanceados.

**Tabela 4 – Matriz de confusão**

Modelo / Classe	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Taxa de acerto
<b>Dados Não Balanceados</b>				
SVM	209 (0)	556 (30)	509 (3)	93,9%
Decision Tree	237 (0)	556 (3)	508 (3)	95%
Random Forest	236 (0)	558 (2)	510 (1)	96%
<b>Dados Balanceados</b>				
SVM	605 (13)	551 (4)	536 (1)	94%
Decision Tree	607 (0)	563 (1)	538 (1)	95%
Random Forest	607 (0)	563 (0)	539 (1)	95,6%

Observação: valor entre parêntesis são valores mal classificados pelos modelos. Com base nos resultados, o modelo de RF teve a melhor matriz de confusão e a melhor pontuação de validação cruzada. Como resultado, o modelo de RF é o mais adequado para classificar os dados.

## 4 DISCUSSÃO

Com base nos resultados estatísticos obtidos, os modelos de AA, incluindo Kprototypes permitiu-nos agrupar os alunos em relação as suas semelhanças. Para prever o abandono foi utilizado algoritmo de classificação SVM, DT e RF, demonstraram alta precisão e eficácia na classificação de alunos em risco de abandono escolar. Ao utilizar amostras balanceadas, os modelos apresentaram taxa de acerto de 93% (SVM) e 95% (DT e RT), com altas taxas de precisão e recall. Além disso, a



análise das características dos alunos revelou insights sobre a distribuição de pais com diferentes níveis de educação, histórico de reprovações e taxas de abandono. O cluster 0, < 29 idade, 2º e 3º ano, hidráulica, 83% nunca reprovaram, 5% abandonaram pelo menos uma vez. Mãe e pai com técnico básico. cluster 1, < 39 idade, 3º ano, Contabilidade, Informática, Agronomia, 22% nunca reprovaram, 40% abandonaram pelo menos uma vez. Mãe com técnico básico e pai com médio. Possui 20% abandonado. cluster 2, < 39 idade, 2º e 3º ano, informática e seguida da Contabilidade, Agronomia, 34% nunca reprovaram, 31% abandonaram pelo menos uma vez. Mãe e pai com técnico básico. Possui 25% de abandono. O cluster 3, < 29 idade, 3º ano, enfermagem, 87% nunca reprovaram, 5% abandonaram pelo menos uma vez. Mãe e pai com técnico básico. Possui 0% de abandono. O cluster 4, < 39 idade, 4º e 5º ano, enfermagem, 70% nunca reprovaram, 16% abandonaram pelo menos uma vez. Mãe com técnico básico e pai com secundário. Possui 13% de abandono.

Os algoritmos alcançaram valores de recall superiores a 0,93 e simultaneamente uma precisão ótima. Embora os algoritmos de classificação apresentaram resultado de alta precisão, há o risco de resultados distorcidos devido a quantidade limitada de dados. Para mitigar esse problema, diversas técnicas de verificação foram aplicadas, incluindo a validação cruzada k-fold além do uso de amostragem de k com média iterando 20 vezes dentro de k de 2 a 40, segue-se por experimentar em agrupar os alunos usando a variável 'Status' alcançar uma precisão muito alta prevendo apenas a classe majoritária depois optamos por utilizar outra forma isolar a variável 'Status' para verificar os resultados de agrupamos com essa duas formas de. No entanto, mesmo utilizando estratégias distintas, os resultados de previsão se mantiveram estáveis, sugerindo que o impacto das técnicas utilizadas foi limitado.

Todos os modelos demonstraram melhorias para os dados balanceados. A SVM manteve os pontos, mas melhorou nas classes 1 e 2. Com um score de 0.951, o DT alcançou uma taxa de acerto quase perfeita. O RF se destacou em precisão e consistência com um score de 0,956. Enquanto as SVMs são boas, mas são mais propensas a cometer erros em classes menos representadas, os modelos RF e DT são mais robustos e precisos, especialmente com dados balanceados.

No entanto, o estudo de caso apresentado e os seus resultados têm algumas limitações. Como já foi mencionado, o tamanho limitado do conjunto de dados é o primeiro. Em contraste com muitos outros domínios de aplicação de modelos de AA, a quantidade de dados no domínio educacional não pode ser facilmente aumentada através da combinação de diferentes recursos. A última fraqueza do estudo de caso é uma forma de intervenção adequada, que não é discutida em detalhe no caso de dados fora da instituição, as dimensões sociais, culturais e económicas regionais, num contexto global. Ao reconhecer a interconexão entre o sucesso individual dos alunos e o desenvolvimento holístico das comunidades.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo foca-se na aplicação de métodos de AA para prever o abandono escolar. Com dados de 7 anos letivos, o estudo utilizou algoritmos de AA, incluindo Kprototypes para aglomeração, RF, SVM e DT para classificação. Os dados foram coletados de vários cursos. A pesquisa examinou e previu o risco de abandono escolar entre os alunos utilizando estes métodos. As principais etapas metodológicas incluíram a coleta e organização de dados acadêmicos, o tratamento de dados ausentes, a normalização e a transformação de variáveis categóricas foram partes da preparação dos dados. O modelo Kprototypes permitiu identificar grupos de alunos com padrões semelhantes, combinando informações numéricas e categóricas, enquanto os modelos DT, RF e SVM foram aplicados para predição e classificação do risco de abandono escolar. A melhoria da capacidade preditiva dos modelos e o tratamento do desbalanceamento dos dados dependeram da implementação do algoritmo SMOTE, uma técnica sintética para balanceamento de classes. Além disso, este artigo oferece uma ferramenta prática para a instituição, permitindo intervenções proativas na identificação precoce de alunos em risco de abandono. Através da previsão assertiva, a universidade pode implementar estratégias de retenção mais eficazes, reduzindo o abandono escolar e promovendo o sucesso acadêmico dos seus alunos. Assim, este estudo contrinui diretamente para a melhoria de gestão educativa, fornecendo subsídios para tomada de decisão baseada em dados e para o desenvolvimento de políticas institucionais focadas na redução do abandono escolar.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UNIKIVI e ao Instituto de Telecomunicações (IT), pólo da UBI, pelo acolhimento durante grande parte do tempo dedicado à realização dos trabalhos de desenvolvimento. Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para ciência e a Tecnologia, IP., no âmbito do projeto UIDB/50008/2020, com o identificador DOI, <https://doi.org/10.54499/UIDB/50008/2020>.

## REFERÊNCIAS

ANGO EMPREGO. Reprovações leva à desistência de muitos Estudantes (Universidade Kimpa Vita). **Ango Emprego**, 12 maio 2021.

CAPITÃO, A. Excesso de reprovações no “Kimpa Vita” leva estudantes à desistência. **Jornal de Angola**, 20 abr. 2021.

FRANCISCO, M. Estudantes da Universidade Kimpa Vita, no Uíge, protestam contra decreto presidencial. **Voa português**, 23 abr. 2021.

IAM-ON, N.; BOONGOEN, T. **Generating descriptive model for student dropout: a review of clustering approach. Human-centric Computing and Information Sciences** Springer Berlin Heidelberg, , 1 dez. 2017.

KIM, S. et al. Student Dropout Prediction for University with High Precision and Recall. **Applied Sciences**, v. 13, n. 10, p. 6275, 20 maio 2023.

LI, Y. D.; DING, G. H.; ZHANG, C. Y. Effects of learner-centred education on academic achievement: a meta-analysis. **Educational Studies**, 2021.

LIANG, J. et al. Determining the number of clusters using information entropy for mixed data. **Pattern Recognition**, v. 45, n. 6, p. 2251–2265, jun. 2012.

MDUMA, N.; KALEGELE, K.; MACHUVE, D. Machine learning approach for reducing students dropout rates. **International Journal of Advanced Computer Research**, v. 9, n. 42, p. 156–169, 18 maio 2019.

RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, C. F.; CASCALLAR, E.; KYNDT, E. Socio-economic status and academic performance in higher education: A systematic review. **Educational Research Review**, v. 29, p. 100305, fev. 2020.

SOOD, S.; SAINI, M. Hybridization of cluster-based LDA and ANN for student performance prediction and comments evaluation. **Education and Information Technologies**, v. 26, n. 3, p. 2863–2878, 1 maio 2021.



## CONTRIBUIÇÃO DOS JOGOS ELETRÓNICOS PARA O ENVELHECIMENTO ATIVO

ARAÚJO, PEDRO (1); RONDÃO, CATARINA (1,2)

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-mail: [paraujo@di.ubi.pt](mailto:paraujo@di.ubi.pt)

(2) CÂMARA MUNICIPAL DO FUNDÃO, E-mail: [cr.sport11@gmail.com](mailto:cr.sport11@gmail.com)

### RESUMO

Portugal é um país cujo índice de envelhecimento (proporção de idosos com mais de 65 anos em relação aos jovens com menos de 15) o coloca como o quarto mais envelhecido do mundo. De facto, se em 1961 esse índice era de 27.5%, ou seja, havia 27.5 idosos para 100 jovens, em 2023 passou para 186,2% (INE,2024). Isto acarreta implicações a nível económico, com cada vez menos população ativa, mas também a nível de saúde, pois a população idosa tende a ter mais doenças e necessidades de cuidados médicos, além de grande isolamento social. Diversos estudos sugerem que a prática de atividade física é determinante para um envelhecimento ativo de qualidade, reconhecendo também que um dos principais efeitos do envelhecimento se manifesta a nível cognitivo especialmente na diminuição do raciocínio e da memória (Ribeiro & Paúl, 2011). Neste artigo apresenta-se um projeto de utilização de jogos de computador vocacionados para combater os efeitos do envelhecimento, levando a melhorias a nível de coordenação motora, estimulação do raciocínio e da memorização e aumento de socialização entre os intervenientes. Para tal recorre à utilização de jogos eletrónicos simples e bem conhecidos (exs. Tetris, MemoryGame), cuja interface de controlo não usa teclado nem rato mas é constituída por sensores ou câmaras de deteção da posição e movimentos do jogador, obrigando a que este se desloque em frente ao sensor à medida que vai respondendo a questões sobre diversos temas que lhe vão sendo colocadas. Representa também uma oportunidade para pessoas de mais idade terem contacto com o mundo dos jogos eletrónicos, que muitas desconhecem ou julgam erradamente não estar ao seu alcance. O projeto está a ser testado no âmbito do programa Memo\_Move da Câmara Municipal do Fundão e embora ainda numa fase inicial, os resultados preliminares já recolhidos apontam para a validade da proposta.

**Palavras-chave:** Envelhecimento ativo, idosos, jogos eletrónicos.

# CONTRIBUTION OF ELECTRONIC GAMES TO ACTIVE AGING

## ABSTRACT

*Portugal is a country whose aging rate (the ratio of elderly people over 65 to young people under 15) makes it the fourth oldest in the world. In fact, while in 1961 this rate was 27.5%, i.e. there were 27.5 elderly people for every 100 young people, in 2023 it will rise to 186.2% (INE, 2024). This has implications for the economy, with an ever smaller working population, but also for health, as the elderly tend to have more illnesses and medical needs, as well as greater social isolation. Several studies suggest that physical activity is a determining factor in quality active ageing, and also recognize that one of the main effects of ageing is cognitive, especially in terms of reduced reasoning and memory (Ribeiro & Paúl, 2011). This article presents a project that utilizes computer games aimed at combating the effects of aging, leading to improvements in motor coordination, stimulation of reasoning and memory, and increased socialization among participants. It employs simple and well-known electronic games (e.g., Tetris, Memory Game) whose control interface does not use a keyboard or mouse but is made up of sensors or cameras that detect the player's position and movements, requiring them to move in front of the sensor as they respond to questions on various topics. It also represents an opportunity for older people to get in touch with the world of electronic games, which many are unaware of or mistakenly believe are out of their reach. The project is being tested under the Memo\_Move activity of the Municipality of Fundão, and although still at an early stage, the preliminary results already gathered point to the validity of the proposal.*

**Keywords:** Active aging, electronic games

## 1 INTRODUÇÃO

O envelhecimento é um processo natural que afeta todos os seres vivos. Nos humanos provoca mudanças a nível físico, cognitivo e social. Portugal é um dos países mais envelhecidos a nível mundial, prevendo-se que o número de idosos (pessoas acima dos 65 anos) atingirá a marca de 2,95 milhões em 2050, mais um milhão do que em 2005(1,78 milhões) e 2006(1,82 milhões) (INE, 2024).

Caminha-se para uma sociedade envelhecida e menos ativa, o que exige atenção e apoio por parte das autoridades e da sociedade em geral, nomeadamente na promoção de hábitos de vida saudável.

Isto conduz ao conceito de envelhecimento ativo, entendido como o processo de otimização das oportunidades para a saúde, participação e segurança, para a melhoria da qualidade de vida à medida que as pessoas envelhecem bem como o processo de desenvolvimento e manutenção da capacidade funcional, que contribui para o bem-estar das pessoas idosas, sendo a capacidade funcional o resultado da

interação das capacidades intrínsecas da pessoa (físicas e mentais) com o meio (CE, 2021)(WHO, 2015).

Neste trabalho apresenta-se um projeto de utilização de jogos eletrónicos como forma de contribuição para o envelhecimento ativo. Para tal recorre à adaptação de jogos simples e bem conhecidos (exs. Tetris, MemoryGame), mas sem recorrer à utilização de teclado ou rato, antes utilizando técnicas de inteligência artificial, suportadas por sensores ou câmaras de deteção da posição e movimentos do jogador. Isso irá obrigar a que o jogador tenha de se deslocar em frente ao sensor à medida que vai respondendo a questões sobre diversos temas que lhe vão sendo colocadas (ex. cultura geral). Pode ainda fazer uso de dispositivos como bicicletas fixas ou passadeiras rolantes para atuarem como mecanismos de interação com o jogo, permitindo ao mesmo tempo controlar parâmetros fisiológicos como a pulsação ou a taxa de respiração.

## **2 JOGAR PARA ENVELHECER BEM**

“os que não encontram tempo para o exercício terão de encontrar tempo para a doença” - Edward Derby

Diversos estudos e projetos reconhecem que a prática de atividade física é determinante para um envelhecimento ativo de qualidade, reconhecendo também que um dos principais efeitos do envelhecimento se manifesta a nível cognitivo, especialmente na diminuição do raciocínio e da memória. Adicionalmente, o isolamento social é também uma característica comum no processo de envelhecimento (Ribeiro & Paúl, 2011).

A utilização de jogos poderá contribuir para apoiar o processo de envelhecimento. O divertimento e o bem-estar conseguidos através dos jogos apresenta-se sob diversas formas: ultrapassar desafios, estímulo da curiosidade, prazer sensorial, relaxamento e competição são alguns exemplos.

Segundo o projetista de jogos Noah Falstein (2024), o divertimento pode ser mental, social, físico ou misto. Mentalmente podemos ter jogos com a utilização de táticas e estratégias, como o xadrez ou damas. Os jogos sociais têm outro papel na área do divertimento, já que as pessoas competem mais com a intenção de conversar ou partilhar experiências. Por fim, os jogos de carácter físico utilizam o corpo como meio auxiliar do divertimento. Caçar ou explorar um determinado ambiente, pode ser um jogo físico interessante.

Enquanto os primeiros jogos tinham um carácter essencialmente de divertimento, tal como jogar às cartas, tiro às naves espaciais ou realizar puzzles, a partir da década de 80, aparece o conceito de jogos sérios (*serious games*), um tipo de jogos que não se relacionam apenas com o divertimento. O objetivo é transmitir um conteúdo de aprendizagem ao utilizador, e deste modo permitir uma redefinição da sua perceção,

atenção ou memória, para facilitar mudanças no seu comportamento na prática. Esta categoria de jogos está cada vez mais ligada a exemplos reais, como campanhas de sensibilização e de educação, atividades promocionais e de marketing, entre outros. (Derryberry, 2007)

Jogar recorrendo ao corpo como interface de controlo, um tipo de jogos conhecidos como *exergames* (Stanmorea et al, 2017), exige algum esforço físico levando a melhorias de coordenação motora, enquanto estimula a capacidade de raciocínio, testa e/ou melhora o nível de conhecimentos e exercita a memória. Por outro lado, a capacidade de jogar mais de uma pessoa em simultâneo (presencialmente ou em rede) a par da obtenção de pontuação, fomenta a interação e a socialização entre os intervenientes. Representa também uma oportunidade para pessoas de mais idade terem contacto com o mundo dos jogos eletrónicos, que muitas desconhecem ou julgam erradamente só estar ao alcance dos mais novos.

## 2.1 Propostas existentes

Existem atualmente diversas propostas nesta área, quer a nível nacional quer internacional. Sendo os seus objetivos coincidentes em muitos aspetos, irão aqui referir-se apenas três exemplos, todos a nível nacional.

O primeiro é o projeto EuroAGE2 (Figura 1) criado pelo Instituto Politécnico da Guarda (IPG) que desenvolveu jogos digitais interativos para promover a autonomia dos idosos, no âmbito do programa de cooperação transfronteiriça POCTEP. Segundo o site do projeto, os seus objetivos são: “Neste projeto desenvolvemos vários jogos digitais que ajudam a estimular as capacidades física e cognitiva da pessoa idosa, nomeadamente através da superação de desafios de estratégia, motricidade, organização, memória, agilidade e tempo de reação”.

Figura 1 – projeto EuroAGE2



FONTE: [IPG utiliza tecnologia para estimular capacidades física e cognitiva de idosos — Politécnico da Guarda \(politecnicoguarda.pt\)](https://www.politecnicoguarda.pt) (consultado em 2024-09-06)

Um outro projeto semelhante está a ser promovido pela Câmara Municipal de Gaia, através do seu Centro de Recursos de Jogos Terapêuticos (Figura 2). Este centro integra o Projeto "Felicidade ao Ritmo do Jogo" que tem como objetivo a estimulação do ritmo ao longo do ciclo de vida, fomentando a funcionalidade da pessoa e a promoção das funções vitais, contribuindo para o envolvimento e a interação com o outro.

Figura 2 – Centro de Recursos de Jogos Terapêuticos



Fonte: [Centro de Recursos de Jogos Terapêuticos - Envelhecimento - Ação Social - Cidade - Câmara Municipal de Gaia \(cm-gaia.pt\)](https://cm-gaia.pt) (consultado em 2024-09-06)

Uma proposta com particular incidência no treino físico, está a ser desenvolvida na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), localizada em Vila Real. Trata-se do projeto 'VR2Care' (Figura 3), que possibilita entrar num ginásio virtual para uma aula de exercício físico ou para uma sessão com o *personal trainer*, de acordo com um plano de treinos personalizado.

Figura 3 – Projeto VR2Care



FONTE: [Tecnologia desenvolvida na UTAD leva idosos a 'ginásio virtual' | Notícias de Vila Real \(sapo.pt\)](https://noticias.vilareal.sapo.pt) (consultado em 2024-09-06)



### **3 CONSÓRCIO MEMO\_MOVE**

O projeto de jogos digitais apresentado neste artigo está a ser testado nas instalações do consórcio Memo\_Move que engloba uma universidade (UBI-Universidade da Beira Interior), um centro de investigação (Centro de Investigação em Ciências do Desporto, Ciências da Saúde e Desenvolvimento Humano) e a Câmara Municipal do Fundão. O consórcio pretende associar a ciência do desporto a um programa comunitário adaptado a pessoas com DCL(Décifre Cognition Ligeiro)/demência (Memo\_Move, 2024).

Tem o objetivo de melhorar as capacidades cognitivas como a memória, atenção, linguagem, cálculo, funções executivas e funções motoras através de exercícios físicos e cognitivos. Combina atividades físicas com estímulos cognitivos para ajudar a manter e melhorar a capacidade de movimento e memória em pacientes que sofrem de doença neurológica degenerativa (Rondão et al, 2022a). O programa é baseado no princípio de que o exercício físico ajuda a retardar a progressão dos sintomas motores das doenças neurodegenerativas tais como o Alzheimer, enquanto as atividades cognitivas visam reduzir o declínio cognitivo associado à doença. Esse método de intervenção multidimensional inclui exercícios de equilíbrio, coordenação e força, além de atividades cognitivas, como memória e resolução de problemas.

O Memo\_Move faz parte de uma abordagem mais ampla de tratamento da Doença de Alzheimer, que não se baseia apenas em medicamentos, mas também em intervenções que promovem a qualidade de vida e a funcionalidade diária do paciente (Rondão et al, 2022b).

### **4 PROPOSTA DESENVOLVIDA : JOGOS PARA IDOSOS**

#### **4.1 Objetivos**

Os utentes que frequentam o Memo\_Move são maioritariamente provenientes do meio rural ou são pessoas de classes sociais que não lhes permitiram ter grande contacto com as tecnologias informáticas, nomeadamente com jogos digitais.

Para muitas dessas pessoas o contacto com esse tipo de jogos deve-se apenas ao observar os mais novos a jogar. Por outro lado a maioria dos jogos digitais comuns não está adaptada a estes utilizadores, pois frequentemente exigem muita rapidez, contêm uma quantidade excessiva de elementos visuais ou sonoros e obedecem a muitas e complexas regras. A juntar a tudo isto a maioria são para jogar com teclado e/ou rato, não servindo para a estimulação física que se pretende. É certo que existem no mercado propostas de jogos com interfaces diferentes do par teclado/rato, como por exemplo os sensores da consola Wii do fabricante Nintendo (Figura 4), que obrigam o utilizador a movimentar-se junto com o sensor (*exergames*). No entanto estas consolas e jogos apresentam normalmente preços elevados, são complexos e obrigam a usar acessórios/sensores compatíveis.

Figura 4 – Consola Wii



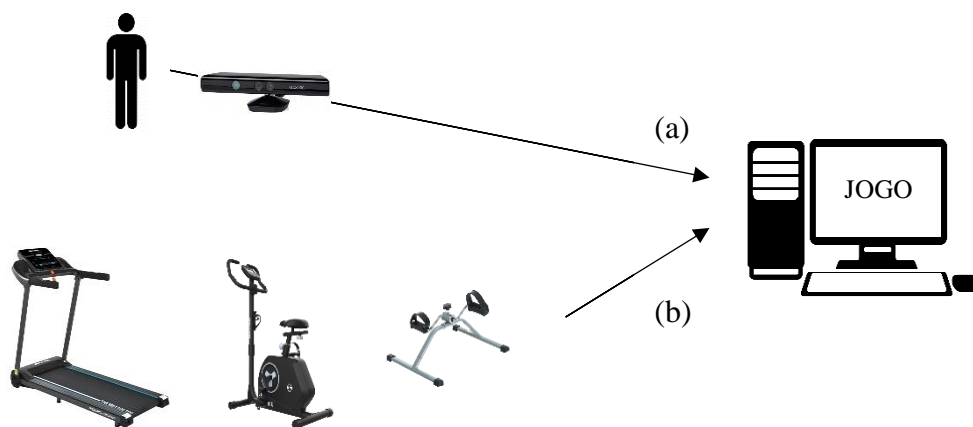
FONTE: imagem retirada da internet

Os objetivos do presente projeto são diferentes das propostas existentes. Trata-se de utilizar jogos já bem conhecidos, porém conferindo-lhes aspetos de funcionamento diferentes do habitual. Em primeiro lugar alterando o aspeto gráfico, removendo todos os elementos não essenciais que possam confundir o jogador. Em seguida transformá-los em *exergames*, fazendo com que o jogo possa ser controlado apenas pelo movimento do corpo ou usando dispositivos fixos de treino, conforme ilustrado no diagrama da Figura 5.

Relativamente à figura, a alternativa (a) refere-se à utilização de sensores de posição e movimento do corpo humano, através dos quais são enviados comandos para controlo do jogo. O sensor é exterior ao corpo do jogador, este apenas precisa de se posicionar e movimentar dentro da área de ação do sensor. São exemplos o Kinect da Microsoft usado na consola XBOX360, que embora descontinuado ainda continua a poder ser usado, ou câmaras digitais equipadas com software de reconhecimento do corpo humano.

Na alternativa (b), o jogo é controlado por dispositivos de treino físico (fitness), como sejam passadeira rolantes, bicicletas fixas ou simples pedaleiras. Para que tal seja possível é necessário que estes dispositivos permitam ligação ao computador, tipicamente por USB ou wireless. À medida que caminha ou pedala, o jogador vai controlando o jogo.

Figura 5 – Projeto de jogos MemoMove



FONTE: produção própria

Um último e importante objetivo dos jogos é a inclusão de capacidades de ajuda e apoio. Esta necessidade deriva do facto de que alguns dos utilizadores que irão usar os jogos apresentam limitações de várias ordens, que vão desde dificuldade de visão, de movimentação e/ou de coordenação dos movimentos. Alguns têm mesmo dificuldade em entender a relação entre os seus movimentos e a reação do jogo. Por exemplo, entenderem que ao deslocarem-se para a esquerda uma raquete se desloque também para a esquerda no ecrã e que se pretenderem mover a raquete para a direita deverão movimentar-se para a direita e não de novo para a esquerda.

Sendo a utilização dos jogos supervisionada por monitores, é importante que estes disponham de mecanismos de ajuda e apoio de modo a poderem explicar melhor as funcionalidades e regras do jogo. Por exemplo eles devem poder parar/arrancar o jogo, alterar as cores e tamanhos dos vários elementos, mostrar o que vai acontecer a seguir em face das escolhas do jogador, etc.

#### 4.2 Jogos desenvolvidos

Apresentam-se a seguir as principais características de alguns dos jogos já desenvolvidos. Todos eles são clássicos dos jogos de computador e portanto as regras serão apenas referidas superficialmente, apresentando-se com mais pormenor os objetivos de cada um para o projeto. Nas versões comuns destes jogos, é utilizado o par teclado e/ou rato para interagir com o jogo, quer para movimentar marcadores (ex. uma raquete) quer para selecionar opções. Nos exemplos mostrados a seguir a interação é feita à custa dos movimentos do utilizador, o que corresponde à opção (a) da Figura 5, sendo usado como sensor a Kinect da Microsoft.

Na Figura 6 pode observar-se um utilizador a jogar um dos jogos disponíveis (Tetris Move). O utilizador movimenta-se à frente do sensor e a imagem é projetada à sua frente num alvo de grandes dimensões.

Figura 6 – Idoso jogando



FONTE: produção própria

Todos os jogos apresentam estimulação cognitiva pois obrigam à memorização ou a responder a questões em determinados momentos do jogo. A resposta a essas questões condiciona a pontuação obtida no final, mas também a velocidade e evolução do jogo. As questões versam sobre diversas categorias como cultura geral, história, geografia, etc. As categorias e as correspondentes perguntas são selecionadas aleatoriamente dentre o conjunto de categorias e perguntas disponíveis.

Na Figura 7 são apresentados dois exemplos de questões que podem surgir. Na primeira foi dada uma resposta errada (a vermelho) sendo indicada qual seria a resposta correta (a verde). No segundo caso a resposta dada está certa. A seleção da resposta é feita também através do movimento do corpo do jogador.

Figura 7 – Perguntas e respostas

Reco

Pergunta  
1



Reinou apenas cerca de dois anos até 1910

Qual foi o último rei de Portugal?

D.Manuel II     D.João VI     D.Carlos

**ERRADO**

---

Reco

Pergunta  
2



A Batalha de Aljubarrota foi travada contra que tropas?

Alemãs     Castelhanas     Francesas

**CERTO**

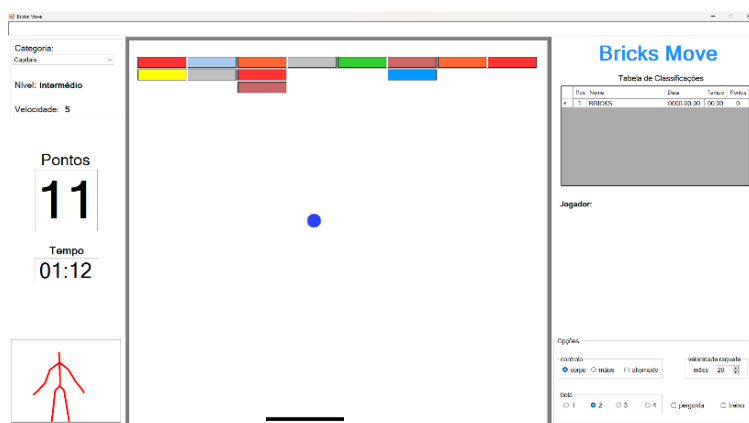
FONTE: produção própria

### 4.2.1 Bricks Move

Trata-se de uma versão do jogo conhecido por Brick Braker, cujo objetivo é derrubar uma parede de blocos/tijolos, usando uma bola que se desloca entre a parede e uma raquete movida pelo utilizador. A Figura 8 mostra o ecran do jogo.

O jogo treina sobretudo a rapidez dos movimentos e a capacidade de prever qual será a trajetória da bola. O deslocamento da raquete para a esquerda ou direita é conseguido pelo correspondente deslocamento do corpo ou em alternativa pelo levantar do braço esquerdo ou direito (uma figura estilizada do corpo do jogador surge na janela do canto inferior esquerdo). De cada vez que uma linha de blocos é derrubada surge uma pergunta pertencente à categoria seleccionada (Figura 7).

Figura 8 – Jogo Bricks Move



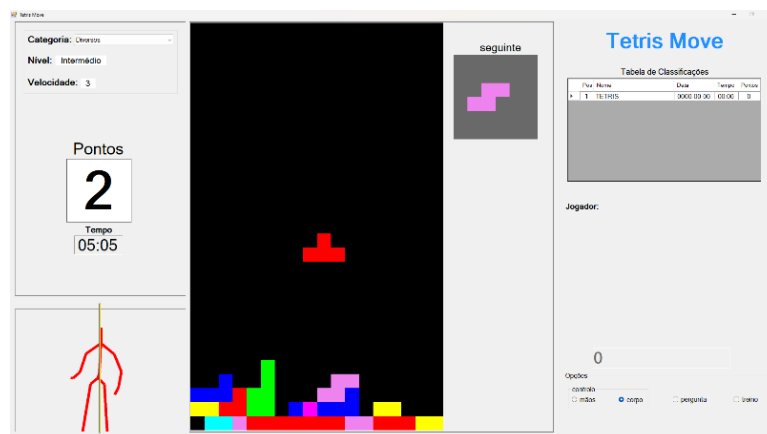
FONTE: produção própria

### 4.2.2 Tetris Move

Este é uma versão de um dos jogos de computador mais conhecidos, embora não o seja para muitos idosos.

O jogo, mostrado na Figura 9, treina sobretudo a orientação espacial e a coordenação entre os movimentos do utilizador e a orientação das peças no ecran. O deslocamento horizontal das peças é conseguido pelo correspondente deslocamento do corpo ou em alternativa pelo levantar do braço esquerdo ou direito; a rotação das peças é conseguida pelo levantar de ambos os braços. Estes movimentos são muito desafiantes para os jogadores, que frequentemente os confundem e trocam. De cada vez que é completada uma linha de peças surge uma pergunta pertencente à categoria seleccionada (Figura 7).

Figura 9 – Jogo Tetris Move



FONTE: produção própria

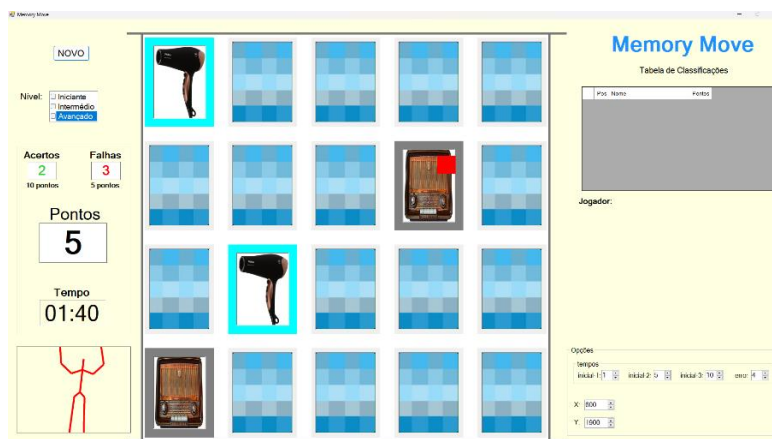
### 4.2.3 Memory Move

Versão de um conhecido jogo de avaliação da capacidade de memória. O jogador tem de descobrir pares de imagens iguais num conjunto de imagens que são apresentadas escondidas e que só se tornam visíveis quando o jogador as seleciona, conforma apresentado na Figura 10.

Para seleccionar uma determinada imagem o jogador deve movimentar-se para a direita ou esquerda e para a frente ou para trás até colocar o pequeno quadrado vermelho em cima da imagem pretendida e nessa altura levantar ambos os braços. Em momentos de tempo aleatórios surge uma pergunta dentro da categoria seleccionada (Figura 7).

Permite treinar sobretudo a memória visual e a orientação espacial. O jogo pode tornar-se fisicamente desafiante, pois em caso de muitos erros na descoberta dos pares, o jogador poderá ter de fazer muitos movimentos e assim acabar por efetuar um longo percurso.

Figura 10 – Jogo Memory Move



FONTE: produção própria

## 5 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Embora ainda numa fase inicial, os resultados preliminares já obtidos apontam para a validade do projeto. Verifica-se que a utilização de exergames na intervenção física e cognitiva em idosos proporciona uma elevada adesão, especialmente porque muitos estão a ter o primeiro contacto com novas tecnologias.

O dinamismo e a diversão proporcionada pelos exergames não só torna as atividades mais envolventes, como também cria um ambiente motivacional, incentivando os participantes a continuar a trabalhar as suas capacidades físicas e cognitivas (Antão, 2023). Esse fator inovador contribui significativamente para o aumento do interesse e da participação regular, promovendo assim benefícios mais duradouros na saúde e no bem-estar dos idosos (Rondão et al, 2022a) (Rondão et al, 2022b).

## REFERÊNCIAS

(Antão, 2023) Antão J. "Benefícios dos exergames na aptidão física da pessoa idosa – uma Revisão Sistemática", Dissertação de candidatura ao grau de Mestre em Medicina, submetida ao Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar – Universidade do Porto, 2023

(CE, 2021) Livro Verde sobre o envelhecimento, Comissão Europeia, Bruxelas, 27.1.2021 COM(2021)

(Derryberry, 2007) Anne Derryberry, "Serious games: online games for learning", 2007.

(Falstein, 2024) Falstein N., Natural funativity.

<https://www.gamedeveloper.com/design/natural-funativity> (consultado em 2024-09-06)

(INE, 2024) Projeções de População Residente em Portugal, [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_destaques&DESTAQUES\\_dest\\_boui=406534255&DESTAQUESmodo=2&xlang=pt](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUES_dest_boui=406534255&DESTAQUESmodo=2&xlang=pt) (consultado em 2024-09-06)

(Memo\_Move, 2024) Site do Memo\_move, Câmara Municipal do Fundão <https://memomove.wixsite.com/memomove>

(Ribeiro & Paúl, 2011) Ribeiro, O., Paúl, C. (2011). Manual de Envelhecimento Activo. Lidel-Edições Técnicas, Lda

(Rondão et al, 2022a) Rondão, C. A. D. M., Mota, M., Oliveira, M., Peixoto, F., & Esteves, D. (2022). Multicomponent exercise program effects on fitness and cognitive function of elderlies with mild cognitive impairment: involvement of oxidative stress and BDNF. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 965. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.950937>.

(Rondão et al, 2022b) Rondão, C. A. D. M., Mota, M. P. G., & Esteves, D. (2022). Development of a Combined Exercise and Cognitive Stimulation Intervention for People with Mild Cognitive Impairment—Designing the MEMO\_MOVE PROGRAM. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10221. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610221>.

(Stanmorea et al, 2017) Stanmorea E., Stubbs B., Vancampford D., Bruinf E., Firth J. "The effect of active video games on cognitive functioning in clinical and non-clinical populations: A meta-analysis of randomized controlled trials", *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Elsevier 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.011>

(WHO, 2015) Relatório Mundial sobre Envelhecimento e Saúde, Organização Mundial de Saúde, 2015 (disponível em [World report on ageing and health \(who.int\)](http://www.who.int))





**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING



## DESIGN OPTIMIZATION OF THE ROTOR OF A NEW BRUSHLESS GENERATOR

MARTINS DELGADO, PEDRO E. (1); B. FONSECA, D. S. (2); KOPTYAEV,  
EVGENIJ (3); MARQUES CARDOSO, A. J. (4)

(1) CISE - ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS RESEARCH CENTRE, E-MAIL:  
[PEDRO.DELGADO@UBI.PT](mailto:PEDRO.DELGADO@UBI.PT)

(2) CISE - ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS RESEARCH CENTRE, E-MAIL:  
[DAVIDE.FONSECA@IEEE.ORG](mailto:DAVIDE.FONSECA@IEEE.ORG)

(3) CISE - ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS RESEARCH CENTRE, E-MAIL:  
[EVGENIJKOPTYAEV@IEEE.ORG](mailto:EVGENIJKOPTYAEV@IEEE.ORG)

(4) CISE - ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS RESEARCH CENTRE, E-MAIL:  
[AJM Cardoso@IEEE.ORG](mailto:AJM Cardoso@IEEE.ORG)

### ABSTRACT

*At present, there is a growing global need for a transition to renewable energy sources. Traditionally, generators used in wind turbines employ two different techniques to create an excitation flux: placing excitation windings on the rotor or using permanent magnets. This article presents a detailed computational analysis of a new brushless generator design, aimed at addressing issues related to maintenance and the high operational costs associated with Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSGs), which are widely used in wind turbines. The primary goal of this study is to perform simulations for different widths of the rotor teeth body, thereby exploring how these variations influence the performance of the generator. Through advanced computational modelling, the study seeks to identify design configurations that maximize efficiency, thereby contributing to more sustainable and economical operation. Furthermore, the study aims to provide insights on how changes in the dimensions of the teeth can affect the magnetic flux distribution and, consequently, the generation of electrical energy. These analyses are vital for the development of more robust and efficient generators. The expected results of this study have the potential to positively influence the design of new generators, enhance their reliability, and reduce the operational costs of wind turbines.*

**Keywords:** Wind Generator Variable Reluctance, computational analysis.

### RESUMO

Atualmente, existe uma necessidade crescente, à escala global, de uma transição para fontes de energia renováveis. Para gerar energia elétrica em turbinas eólicas são utilizados, tradicionalmente, geradores que adotam uma de duas técnicas diferentes para criar um fluxo de

excitação: a colocação de enrolamentos no rotor ou a utilização de ímanes permanentes. Este artigo apresenta uma análise computacional detalhada de uma nova topologia de gerador sem escovas, previamente proposta, que busca resolver questões relacionadas com a manutenção e os elevados custos operacionais associados aos geradores síncronos de ímanes permanentes (PSMGs), amplamente usados em turbinas eólicas. Com este estudo pretende-se analisar o modo como diferentes larguras do corpo dos dentes do rotor influenciam o desempenho do gerador. Através de uma análise computacional avançada, busca-se identificar configurações de design que maximizem a eficiência e assim, contribuir para uma operação mais sustentável e económica. Além disso, pretende-se perceber de que modo a modificação das dimensões dos dentes pode afetar a distribuição do fluxo magnético e, conseqüentemente, a geração de energia elétrica, de modo a potenciar o desenvolvimento de geradores mais robustos e eficientes. Os resultados esperados deste estudo têm o potencial de influenciar positivamente a conceção de novos geradores, aumentar a fiabilidade dos mesmos, e reduzir os custos operacionais de turbinas eólicas.

**Keywords:** *Gerador eólico, Relutância Variável, análise computacional.*

## 1 INTRODUCTION

Electric generators are crucial not only in the industrial production of electrical energy but also for powering isolated electrical grids, such as those on ships, airplanes, etc, ( HOSSAIN, 2021; MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009). Besides their efficiency and dimensions, the reliability of these devices is equally important. Among other aspects, the concept of generator reliability also includes the mean time between maintenance actions ( CARDOSO e KOPTJAEV, 2022). The need for periodic maintenance to replace brushes and slip rings is a typical disadvantage of all classical synchronous generators, as such interventions are associated with temporary downtime of the equipment and additional costs, ( SARMA, 1979).

Generators with permanent magnets do not have brushes. However, they do not allow for output voltage adjustment over a wide range when the rotational speed or load power changes, ( ALSHIBANI, AGELIDIS e DUTTA, 2014). This limitation makes it impractical to directly connect permanent magnet generators to the power grid without using power electronic converters, ( ARENDT, 2011).

To address these challenges, this work proposes an optimization of an innovative brushless electric generator with salient poles. In this design, the rotor is free of magnets or windings, and the variation in magnetic reluctance between the rotor poles and the stator generates flux changes. This is characteristic of a variable reluctance machine, where the magnetic reluctance fluctuates as the rotor turns, changing the magnetic field through the stator windings, ( FITZGERALD, 2003). Similarly,

a Variable Reluctance Vernier Generator (VRVG) operates by employing magnetic gearing and reluctance modulation, utilizing multiple magnetic poles on the rotor to enhance the modulation of the stator's magnetic field, ( WU e EL-REFAIE, 2019).

In contrast, a homopolar generator offers distinct advantages. Due to its constant magnetic flux direction, it eliminates the need for complex magnetic gearing or multiple pole interactions, resulting in a simplified construction and lower maintenance. The absence of magnets or field reversals reduces mechanical wear and vibrations, improving long-term reliability, ( BOLDEA e TUTELEA, 2018; S. JIA, 2015). Additionally, since the magnetic flux direction does not change, power regulation and control are more straightforward, making homopolar generators ideal for applications that require steady and consistent power output with minimal control complexity.

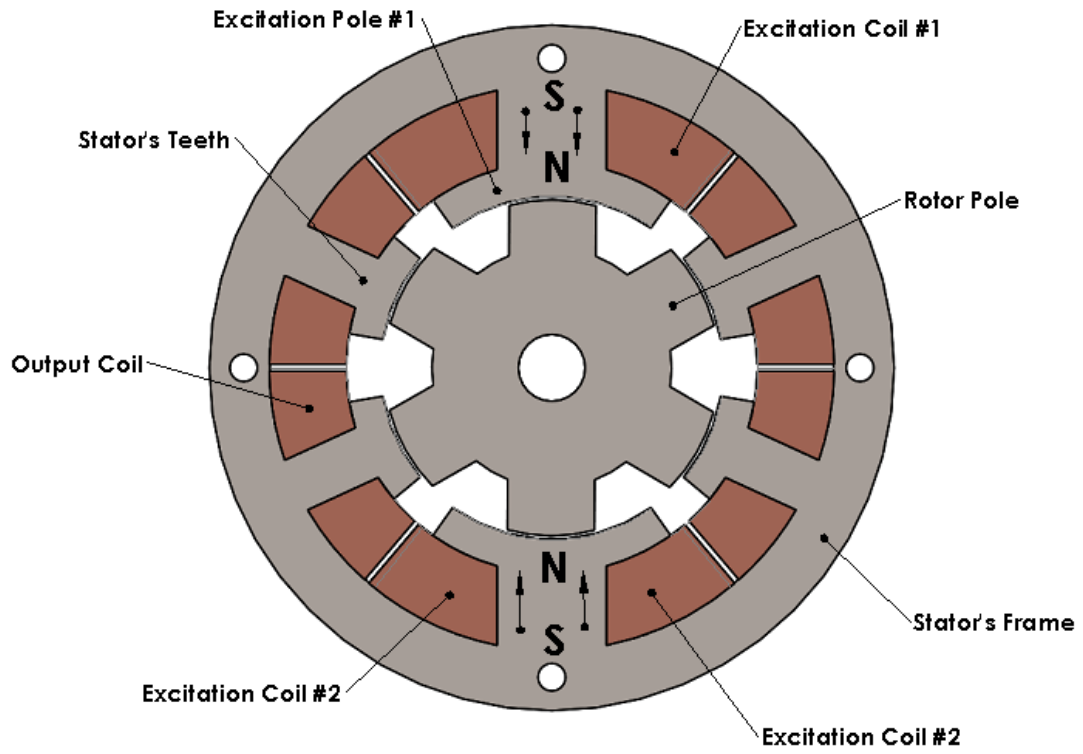
The innovative brushless generator design, in Figure 1, proposed by CARDOSO e KOPTJAEV, 2022 presented the external dimensions of 200 mm x 200 mm and was analysed at a speed of 3000 rpm. Although the stator dimensions remained constant, this study focuses on evaluating the generator's performance with varying rotor pole widths.

As can be seen in both Figure 1 and Figure 2, the magnetic fields of the excitation poles are aimed in opposite directions and result in a homopolar generator in which the magnetic flux linked by the output winding coils present the same direction at all time; however changing its value according to the reluctance path. This means it has twice the effect of traditional generators, as also shown by its larger frequency on the output.

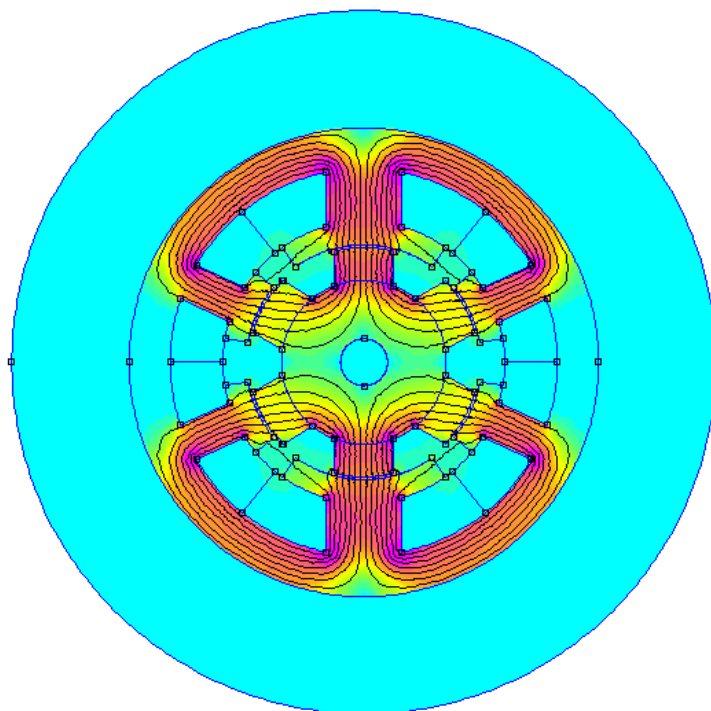
Moreover, the homopolar characteristic of these generators can lead to reduced complexity in the construction and control of the system, as there is no variation in the direction of the magnetic flux. This simplifies the generation and regulation of the produced energy.

Apart from all the above features, the design of the stator in such generators is aimed to achieve a reduction in the reluctance and magnetic losses. A high magnetic permeable material should be used to enhance the effectiveness of magnetic flux. The reluctance of the stator is maintained properly so that the magnetic field generated by the excitation coil is high enough to produce the maximum magnetic flux in the output coil. This design feature increases the efficiency and overall performance of the generator, enabling it to perform better in its electric generator mode.

**Fig. 1. Model depiction.**



**Fig. 2. Model flux lines.**



## 2 GEOMETRIC DESIGN

Table 1 summarizes the key dimensions of the generator. In this work the refinement of the rotor tooth width is performed keeping other parameters consistent, through the analysis of the performance of the generator for rotor tooth widths ranging from 22 to 34 mm.

**Table 1 – Main Dimensions.**

Parameter	Stator	Rotor
Outer Diameter	200 mm	98 mm
Inner Diameter	100 mm	-
Length	200 mm	200 mm
Frame Weight	17,5 mm	-
Number of Poles	2	6
Number of Teethes	4	-
Pole Arc Length	61,76 mm	
Teeth Arc Length	26,3 mm	
Pole Body Width	32 mm	Variable
Teeth Body Width	16 mm	
Pole Embrace	-	0,5

Simulations are carried out using both Matlab and the FEMM software, in a master/slave configuration where FEMM is controlled through Matlab to analyse the no load output voltage of the generator, considering the different designs being studied. Since the stator dimension are the same for all analyses, it only became necessary to formulate a strategy to automatically draw the rotor of each simulation.

Considering the rotor structure presented in Figure 3, the coordinates of the most significant points are established as a function of both rotor position and rotor dimensions as:

$$A = \left[ r \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\alpha}{2}\right), r \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\alpha}{2}\right) \right] \quad (2.1)$$

$$B = \left[ r \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\alpha}{2}\right), r \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\alpha}{2}\right) - b \right] \quad (2.2)$$

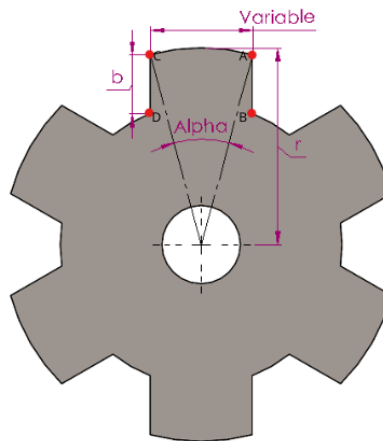
$$C = \left[ -r \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\alpha}{2}\right), r \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\alpha}{2}\right) \right] \quad (2.3)$$

$$D = \left[ -r \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\alpha}{2}\right), r \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\alpha}{2}\right) - b \right] \quad (2.4)$$

These relationships allow to create a Matlab script to draw the rotor in FEMM automatically, and perform several FEMM simulations without human intervention.

**Fig. 3. Geometric Parameters of Rotor.**

r=radius  
 b=pole body height  
 a=arc angle



Once the generator design is set up and ready to go it is crucial to pick the material for it. The chosen magnetic material plays an important role in how the generator's performs. Apart from the most obvious magnetic properties, properties like, electrical conductivity, thermal stability and mechanical strength all need to be considered.

When reviewing the data obtained from other comparative study ( CARDOSO e KOPTJAEV), the choice for the magnetic steel was narrowed to the list presented in Table 2. Although it is not the material with the highest power density, it was decided to use M36\_29G, considering all other significant properties.

These include the material's availability, cost-effectiveness, and excellent magnetic properties that ensure low core losses. Additionally, M36\_29G offers a good balance between mechanical strength and thermal stability, making it a reliable choice for a wide range of applications. Its established use in the industry also reduces the risk associated with adopting a new material, providing a tested and trusted solution for these specific needs.

**Table 2 – Electrical Steels Rated Power Density.**

Eletrical Steel	Power density, W/mm <sup>2</sup>	
	50 Hz	400 Hz
M43_29G	0.0319	0.2233
DW310_35	0.0331	0.2299
M36_29G	0.0325	0.2222
D23_50	0.031	0.2142
10JNEX900	0.0317	0.2309
20JNHF1300	0.0291	0.1998

It was decided to use the same number of turns for the excitation and output windings as in CARDOSO e KOPTJAEV, 2022; 100 turns in the excitation coils and 1000 turns in the output coils, in order to obtain comparable data. Nonetheless, it was needed to make sure that the space allocated could support the cooper coils. Considering the empirical value of a maximum current density of 5 A/mm<sup>2</sup> and a maximum field current of 10 A one obtains:

$$D_{cu} = \sqrt{\frac{I_f \times 4}{5\pi}} \quad (2.5)$$

$$\Leftrightarrow D_{cu} = \sqrt{\frac{10 \times 4}{5\pi}} \simeq 1.6mm \quad (2.6)$$

where  $D_{cu}$  is the cooper wire diameter.

Considering a fill factor of 0.5, the needed sectional area for the coil becomes,

$$A_{cu} = 2 \times N \times \frac{\pi \times D_{cu}^2}{4} \quad (2.7)$$

$$\Leftrightarrow A_{cu} = 2 \times 100 \times \frac{\pi \times 1.6^2}{4} \simeq 400mm^2 \quad (2.8)$$

where  $A_{cu}$  is the sectional area required to accommodate the cooper coil.

This allows one to verify that an excitation current of 10 A can be used with 100 turns for the given area. Considering 1000 turns in the output windings, the available area allows a windings' wire diameter of 0.5 mm, thus a rated current of 1 A:

$$A_{cu} = 2 \times N \times \frac{\pi \times D_{cu}^2}{4} \quad (2.7)$$

$$\Leftrightarrow D_{cu} = \sqrt{\frac{A_{cu} \times 4}{2 \times N \times \pi}} = \sqrt{\frac{400 \times 4}{2 \times 1000 \times \pi}} = 0.5mm \quad (2.9)$$

In summary, considering the output winding, it is expected a generator producing power with high voltage value, due to the 1000 turns, and low current value.

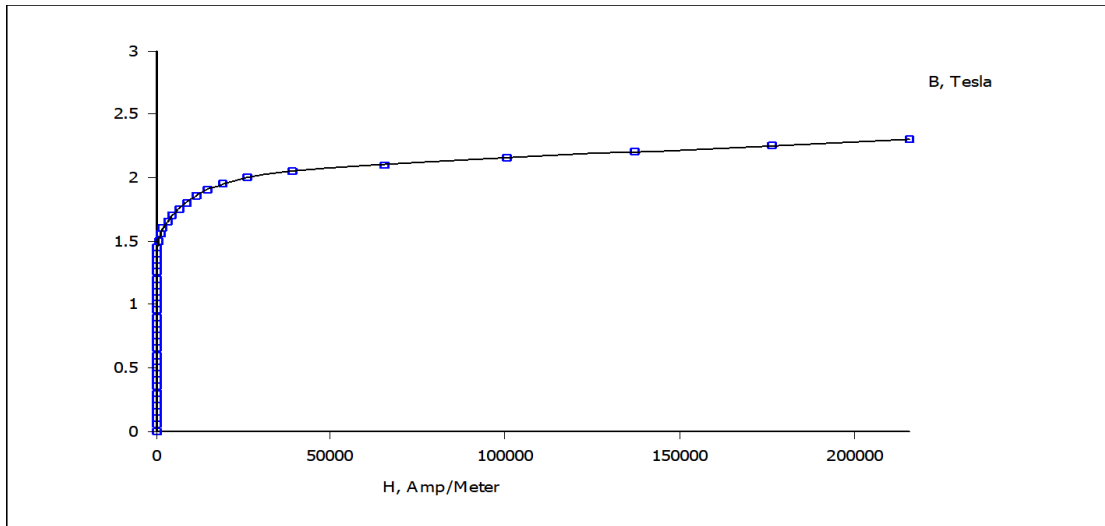
### 3 SIMULATION OF THE BRUSHLESS GENERATOR

In electric machines the magnetic saturation of the iron core plays an important role in the machines' performance. The magnetisation curve of M36 steel, presented in Figure 4, indicates that saturation starts at about 1.5 Tesla.

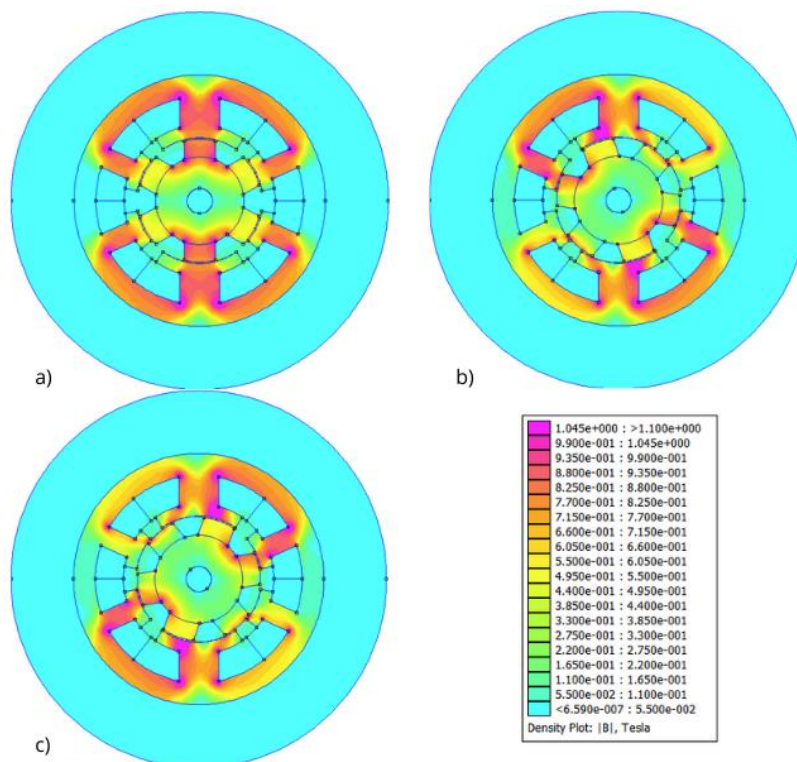


The generator's magnetic flux distribution, under no-load conditions and the maximum field current, obtained from magneto-static simulation considering different rotor positions, for various arc values is shown in Figures 5-7. Such results demonstrate that the magnetic flux density in these configurations stays securely below 1.1 Tesla. This guarantees that the generator works within the limitations of the material, preserving efficiency and minimizing the magnetic losses.

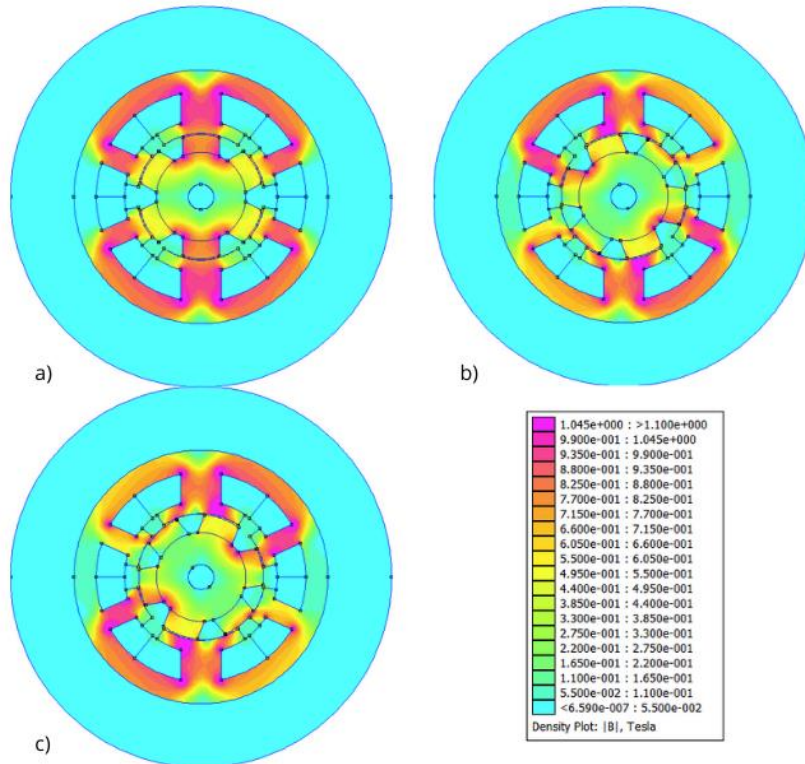
**Fig. 4. Magnetisation Curve (B-H Curve) for M36 Steel.**



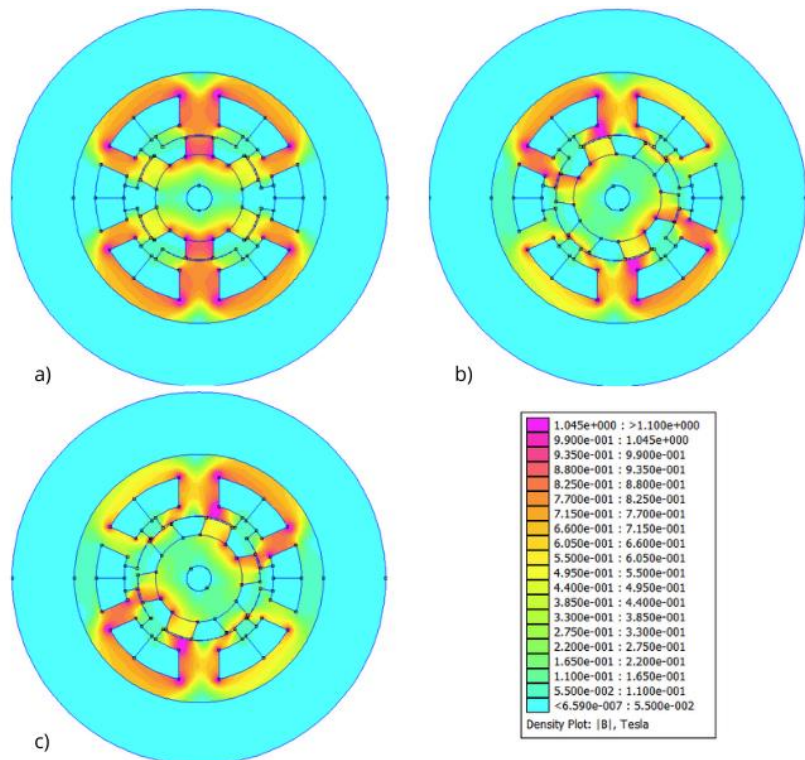
**Fig. 5. Induction distribution for a 24 mm pole body width, under no-load conditions and a field current of 10 A: a) Position 0°; b) Position 20°; c) Position 40°.**



**Fig. 6. Induction distribution for a 30 mm pole body width, under no-load conditions and a field current of 10 A: a) Position 0°; b) Position 20°; c) Position 40°.**



**Fig. 7. Induction distribution for a 34 mm pole body width, under no-load conditions and a field current of 10 A: a) Position 0°; b) Position 20°; c) Position 40°.**



The voltage induced in a coil is governed by the mathematical expression:

$$U = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\varphi}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{d\varphi}{d\theta} \quad (3.1)$$

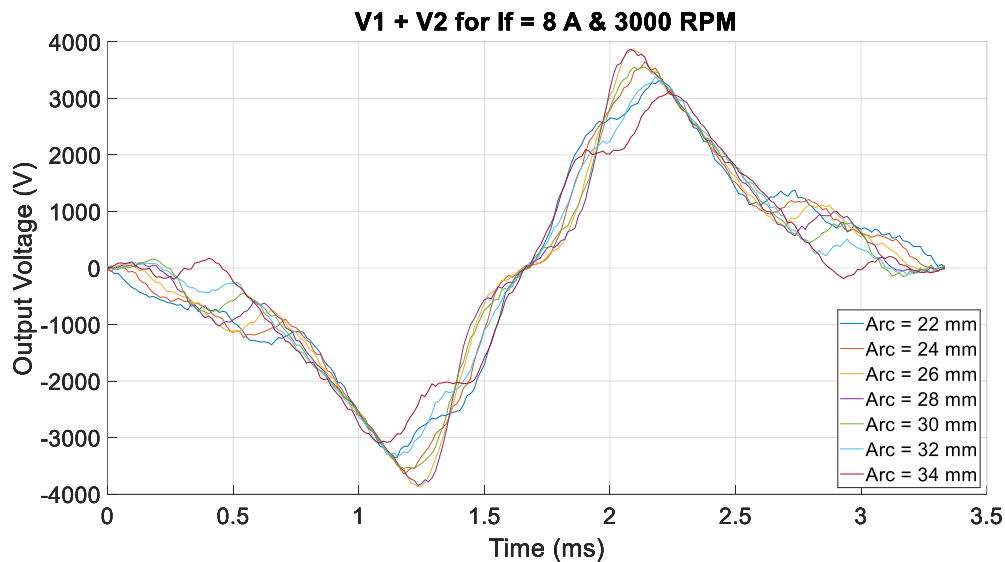
Considering discrete signals, the central difference method provides a second-order approximation for the derivative, meaning that the error decreases more rapidly as  $\Delta\theta$  (step size) becomes smaller compared to other methods. That is why it was used the Central Difference Formula. This method computes the derivative by averaging the changes in the parameter ( $\varphi$ ) over two steps: forward ( $\varphi_{n+2}$ ) and backward ( $\varphi_n$ ). It approximates the slope at the midpoint of these two points.

Overall, the central difference method is generally more accurate for approximating derivatives, especially when small step sizes are used:

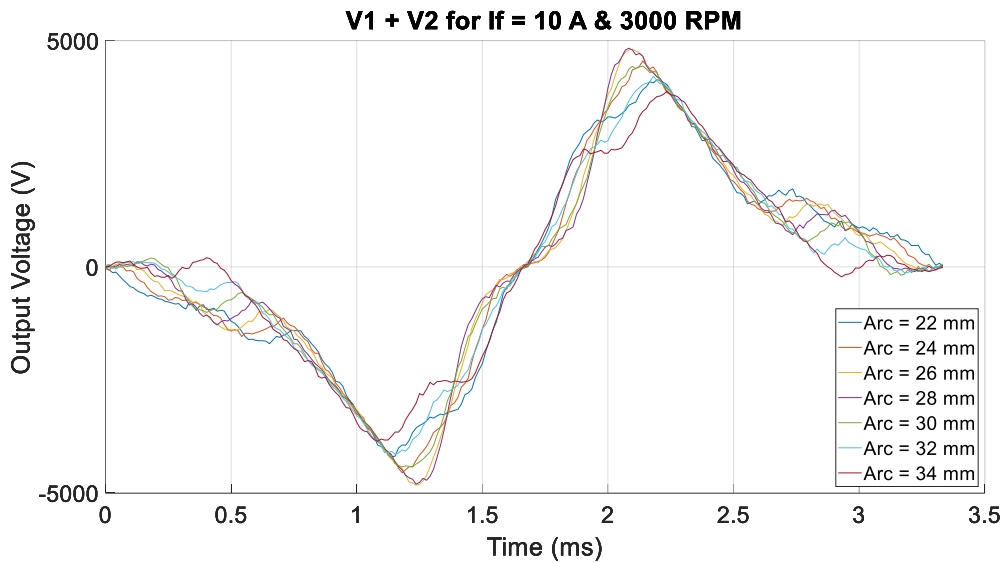
$$U = \omega \frac{\varphi_{n+2} - \varphi_n}{2\Delta\theta} \quad (3.2)$$

Figures 8 to 10 present the no-load generated voltage curves over a complete revolution. These curves show the relationship between the various rotor pole arc dimensions and five different values of field current ( $I_f$ ). Higher  $I_f$  values result in stronger magnetic fields, which directly influence the induced voltage amplitude. This relationship is captured by the curves, showing how changes in the excitation affect the generator's performance.

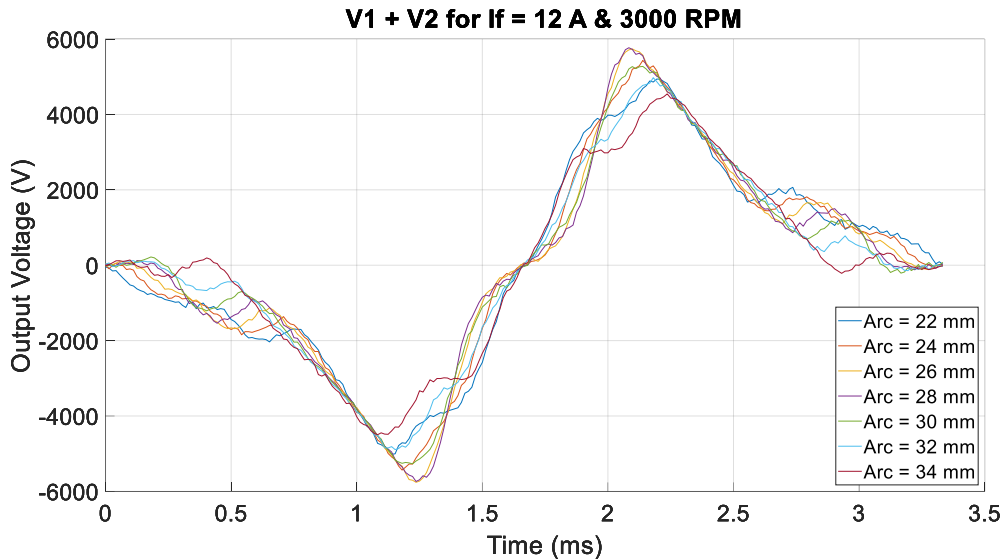
**Fig. 8. Output voltage (V) for an excitation current of 8 A at 3000 rpm.**



**Fig. 9. Output voltage (V) for an excitation current of 10 A at 3000 rpm.**



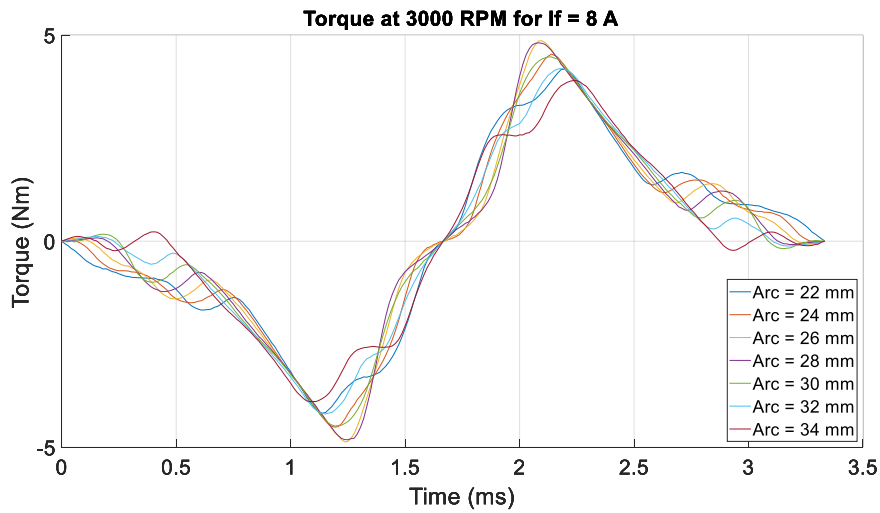
**Fig. 10. Output voltage (V) for an excitation current of 12 A and 3000 rpm.**



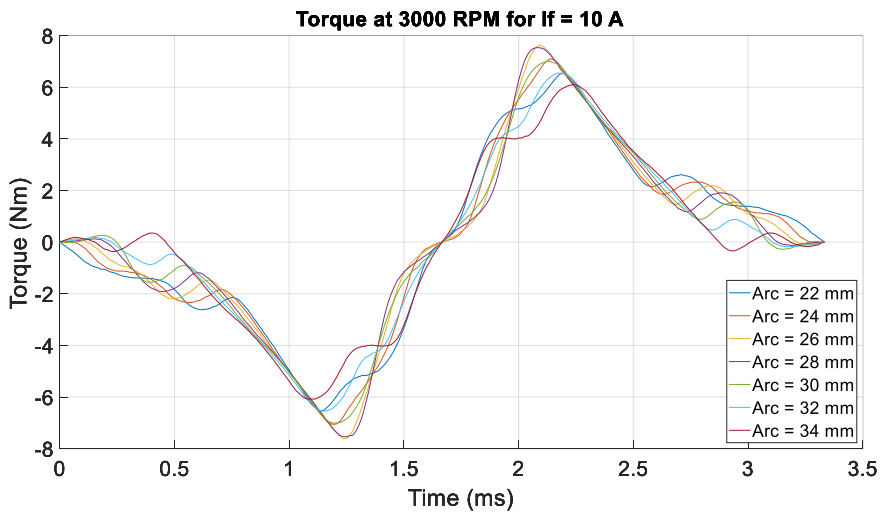
A lower cogging torque, present due to the variable reluctance, can have significant advantages in the startup of the generator, especially in systems where smooth and efficient startup is essential. With a lower starting torque (the cogging torque under no-load conditions), the generator requires less force to start rotating, which results in easier startup and reduces mechanical wear on components such as bearings and the rotor shaft. This is particularly advantageous in situations where the generator is frequently started or in renewable energy applications, such as wind turbines, where the initial rotation may be driven by light winds.

However, it is important to balance this lower cogging torque with the need to generate induced voltages in the output windings. Figures 11 to 13 present the evolution of the no-load torque in the shaft of the generator with time, thus with rotor position.

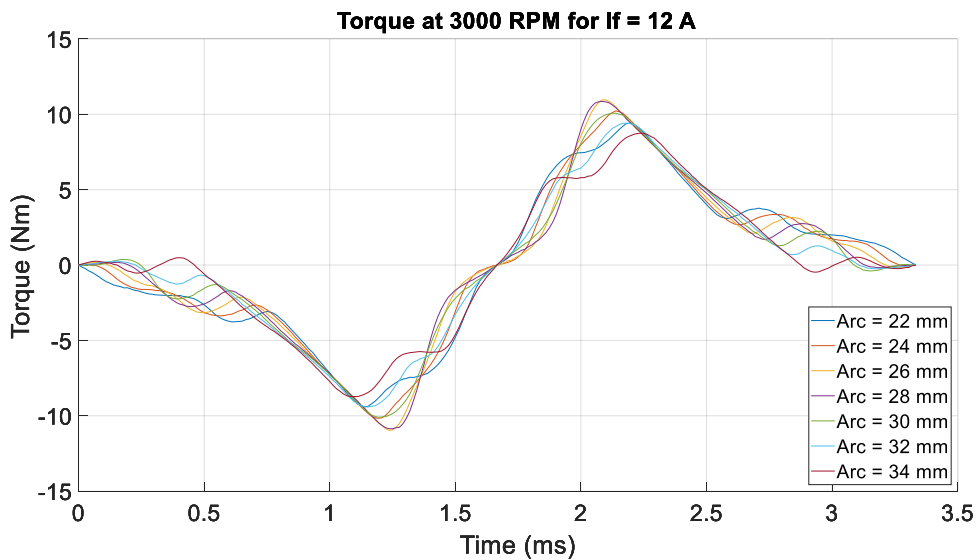
**Fig. 11. No-load torque (N.m) assuming a constant excitation current of 8 A.**



**Fig. 12. No-load torque (N.m) assuming a constant excitation current of 10 A**

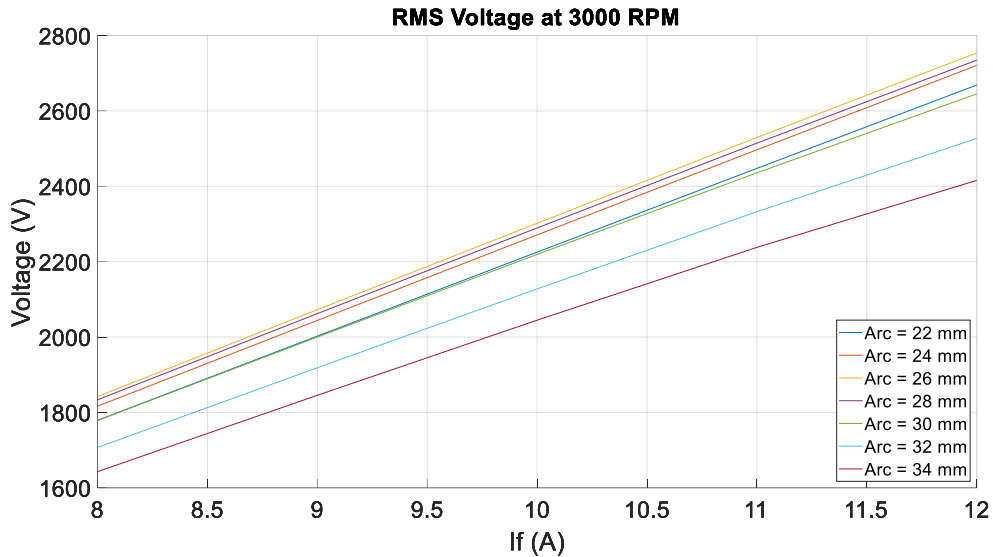


**Fig. 13. No-load torque (N.m) assuming a constant excitation current of 12 A.**



In figure 14, it can be seen that the generator with 26 mm arc presents the highest RMS voltage, and it can be also observed that the arc size is not linearly related to the increase in the induced voltage. However, Figure 15 shows that the same generator presents the highest cogging torque. Thus, a balance between the voltage and cogging torque must be established.

**Fig. 14. RMS value of the output Voltage (V) for each Arc and  $I_f$ .**



**Fig. 15. Maximum cogging Torque (N.m) for each Arc and  $I_f$ .**

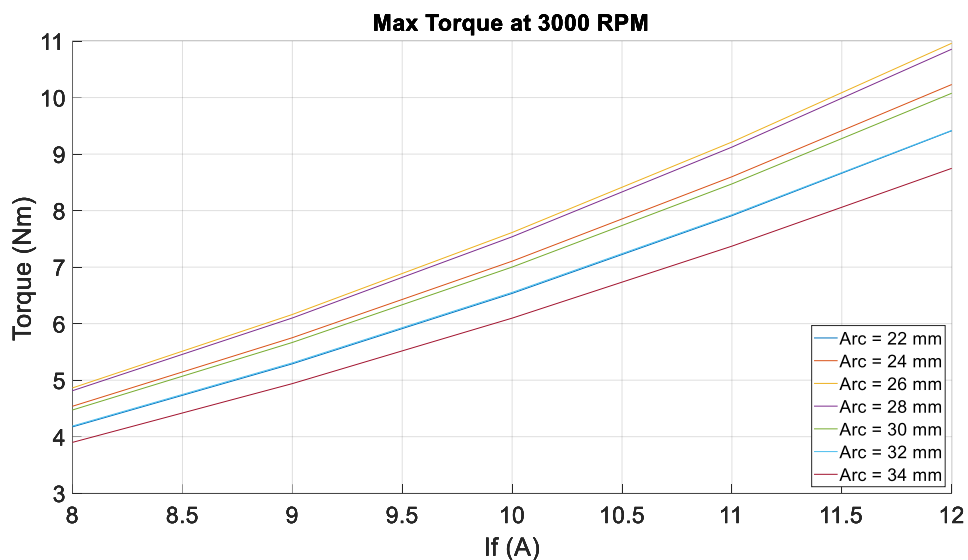
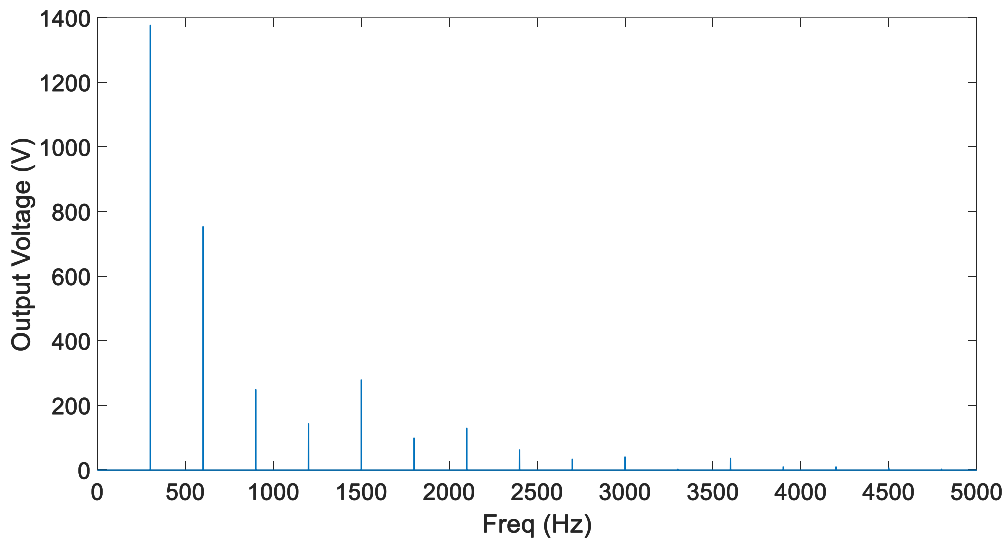


Fig. 16 show the output voltage spectrum under no load conditions and a rotational speed of 3000 rpm for a 26 mm arc.

**Fig. 16. Frequency Spectrum of the output voltage.**



Another important point to mention is that, based on the simulations performed, there is no magnetic saturation yet, even when using an excitation current of 12 A, thus indicating that a more suitable balance between the number of turns in the excitation coils and the number of turns in the output coils must be analysed in future works.

#### **4 CONCLUSIONS**

This study demonstrates that the selection of a 26 mm pole arc is the most suitable option, as it prioritizes the maximization of the open-circuit voltage, a key performance criterion. Although maximum cogging torque is an important factor in generator operation, its potential impact can be minimized by delaying the connection of the generator to the turbine until the turbine reaches sufficient speed. This ensures that the generator's starting torque does not hinder system performance, allowing the generator to operate efficiently while maintaining a high open-circuit voltage.

In addition to optimizing the generator's electrical performance, this work addresses broader concerns in this new generator's design. The proposed brushless generator design offers a brushless rear-earth free solution by eliminating brushes, slip rings, and permanent magnets, reducing maintenance needs while maintaining a reliable operation and voltage adjustability.

This design improvement aligns with the broader trend of increasing efficiency in electrical machines. The proposed brushless generator addresses the need for high-efficiency, maintenance-free operation in critical applications, such as in wind turbines and marine environments, where long-term reliability is essential.

## REFERENCES

- ALSHIBANI, S.; AGELIDIS, V. G.; DUTTA, R. Lifetime Cost Assessment of Permanent Magnet Synchronous Generators for MW Level Wind Turbines. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 5, n. 1, p. 10-17, Jan 2014.
- ARENDRT, R. Simulation investigations of ship power systems. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Rome, Italy: [s.n.]. 2011.
- BOLDEA, I.; TUTELEA, L. Reluctance Electric Machines: Design and Control. 1. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1201/9780429458316>>.
- CARDOSO, A. J. M.; KOPTJAEV, E. The new type brushless generator. 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). [S.l.]: [s.n.]. 2022. p. 1-9.
- CARDOSO, A. J. M.; KOPTJAEV, E. A Comparative Study of Brushless Non-salient Pole.
- FITZGERALD, A. E. . K. C. . &. U. S. D. Electric Machinery. [S.l.]: McGraw-Hill, v. 6th Edition, 2003.
- HOSSAIN, J. Introduction to wind turbine technology. New Delhi: TERI Press, 2021. 503-540 p.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design, and Application. 2. ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009.
- S. JIA, R. Q. J. L. A. Y. C. Comparison of stator DC-excited vernier reluctance machines with synchronous reluctance machines. 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene, ID, USA, 2015. 649-655.
- SARMA, M. S. Synchronous machines, their theory, stability, and excitation systems. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1979.
- WU, F.; EL-REFAIE, A. Permanent magnet vernier machine: a review. *IET Electric Power Applications*, v. 13, p. 127-137, 2019. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5474>>.





## **DIAGNÓSTICO NÃO INVASIVO DE AVARIAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ALIMENTADOS A PARTIR DE VARIADORES DE FREQUÊNCIA**

BARRENO, JUAN (1); BENTO, FERNANDO (2); MARQUES CARDOSO, ANTONIO J. (3)

CISE – Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, P – 6201-001 Covilhã, Portugal,

E-mail: [juan.angel.barreno@ubi.pt](mailto:juan.angel.barreno@ubi.pt) (1); [fjfbento@ieee.org](mailto:fjfbento@ieee.org) (2); [ajmcardoso@ieee.org](mailto:ajmcardoso@ieee.org) (3)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [juan.angel.barreno@ubi.pt](mailto:juan.angel.barreno@ubi.pt)

### **RESUMO**

O motor de indução, também conhecido como motor assíncrono, destaca-se a nível industrial pelas suas múltiplas características, tanto construtivas como operacionais, razão pela qual tem uma presença transversal na indústria. A preponderância destes equipamentos no seio da indústria levou ao desenvolvimento de boas práticas de manutenção e à investigação de técnicas de monitorização para a deteção de avarias precoces nestes motores. Este artigo centra-se especificamente no estudo e análise das avarias mecânicas mais comuns nestes motores, ou seja, as avarias nos rolamentos, utilizando técnicas de processamento do sinal das correntes estatóricas. Mais concretamente, o método Short-Time Fourier Transform (STFT) e o método Extended Park's Vector Approach (EPVA) são aplicadas às correntes estatóricas, tendo em vista a identificação de assinaturas de avaria. Para otimizar os resultados do diagnóstico, os dois métodos são combinados através de uma proposta híbrida que reúne as vantagens de ambos, ou seja, uma avaliação adequada dos fenómenos variáveis no tempo e a capacidade de distinguir o tipo de avaria que afeta o rolamento. Para demonstrar a viabilidade desta abordagem, são efetuadas comparações entre a técnica híbrida proposta e os métodos STFT e EPVA. A validação das soluções propostas é efetuada através de ensaios laboratoriais baseados num motor de indução trifásico de 2.2 kW, alimentado a partir de um variador de frequência, onde são montados rolamentos com estrias e crateras, permitindo assim simular, experimentalmente, as avarias mais representativas. Os resultados obtidos permitem identificar aumentos de energia nas frequências associadas a avarias em rolamentos. Por outro lado, esta técnica de análise contribui para um diagnóstico não invasivo, simples e de baixo custo, quando comparado com métodos convencionais.

**Palavras-chave:** Avarias em rolamentos, Motor de indução trifásico, Short-Time Fourier Transform (STFT), Extended Park's Vector Approach (EPVA), Correntes estatóricas.

## ABSTRACT

*The induction motor, also known as asynchronous motor, stands out in the industrial sector due to its multiple constructive and operational characteristics, reason why it has a widespread presence in the industry. The prominence of these machines within the industry has led to the development of good maintenance practices and the investigation of monitoring techniques for early fault detection in these motors. This paper specifically focuses on the study and analysis of the most common mechanical faults in these motors, namely bearing faults, employing signal processing techniques to the stator current. More specifically, the Short-Time Fourier Transform (STFT) method and the Extended Park's Vector Approach (EPVA) method are applied to the stator currents to identify meaningful fault signatures. To optimize the diagnostic results, the two methods are combined through a hybrid approach that leverages the advantages of both, namely, an adequate assessment of time-varying phenomena and the ability to distinguish the type of fault affecting the bearing. To demonstrate the feasibility of this approach, comparisons are made between the proposed hybrid technique, the STFT and EPVA methods. The proposed solutions are validated through laboratory tests based on a 2.2 kW three-phase induction motor, powered by a variable frequency drive, where bearings with grooves and pits are installed, thereby emulating experimentally the most representative faults. The obtained results allow for the identification of increase of energy at frequencies typically associated with bearing faults. Furthermore, this analysis technique contributes to a non-invasive, simple, and low-cost diagnosis compared to conventional methods.*

**Keywords:** Bearing faults, Three-phase Induction Motor, Short Time Fourier Transform (STFT), Extended Park's Vector Approach (EPVA), Stator Currents.

## 1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos (MIs) são amplamente utilizados na indústria, devido à sua robustez, baixo custo e eficiência energética (WILDI, 2006). Estes motores desempenham um papel crucial em aplicações industriais variadas, desde grandes geradores, motores industriais de vários MW, até dispositivos de frações de kW e aplicações aeroespaciais sofisticadas que exigem uma fiabilidade rigorosa no seu funcionamento (KOTHARI; NAGRATH, 2010). No entanto, como qualquer equipamento eletromecânico, estão sujeitos a diferentes tipos de avarias ao longo do seu ciclo de vida, das quais as avarias nas chumaceiras são

uma das mais comuns e significativas, sendo a manutenção inadequada e os defeitos de fabricação os principais fatores que influenciam a ocorrência de avarias (CARDOSO, 1991). Em (CARDOSO, 2018), apresenta-se a distribuição das avarias nas máquinas elétricas (chumaceiras, estator, rotor, outras), onde as chumaceiras têm uma taxa de avaria de 75%, 41% e 13% para máquinas de baixa, média e alta potência, respectivamente. Estes dados mostram que as avarias nas chumaceiras são as mais frequentes em máquinas de baixa e média potência.

Recentemente, o uso de variadores de frequência (*Variable Frequency Drives* - VFDs) para alimentar motores de indução tem aumentado significativamente na indústria, devido às suas vantagens, como a poupança de energia e o controle preciso da velocidade e do binário. No entanto, a utilização de VFDs introduz componentes harmônicos adicionais nas correntes do estator e nas tensões de modo comum, o que pode induzir avarias nas chumaceiras devido a descargas elétricas (*Electric Discharges* - EDs) e oscilações de binário. Assim, torna-se essencial desenvolver técnicas que considerem estas particularidades para o diagnóstico precoce das avarias (ARAÚJO et al., 2013; SINGH; ANIL KUMAR; NAIKAN, 2018).

O diagnóstico de avarias em MIs pode ser efetuado através da análise de variáveis mensuradas nos motores, como por exemplo vibrações, emissões acústicas, correntes e tensões elétricas do motor, temperatura, velocidade, fluxo magnético e imagens térmicas (CARDOSO, 1991; TOMA; KIM; KIM, 2021). Apesar da eficácia da análise de vibrações no diagnóstico de avarias em rolamentos, esta abordagem tem associado um custo elevado e exige contato direto com o motor, o que limita a sua aplicação prática (CHEN et al., 2020; GUO et al., 2019). Estas restrições impulsionaram o desenvolvimento de métodos alternativos de diagnóstico, especialmente em cenários em que os métodos convencionais não são viáveis.

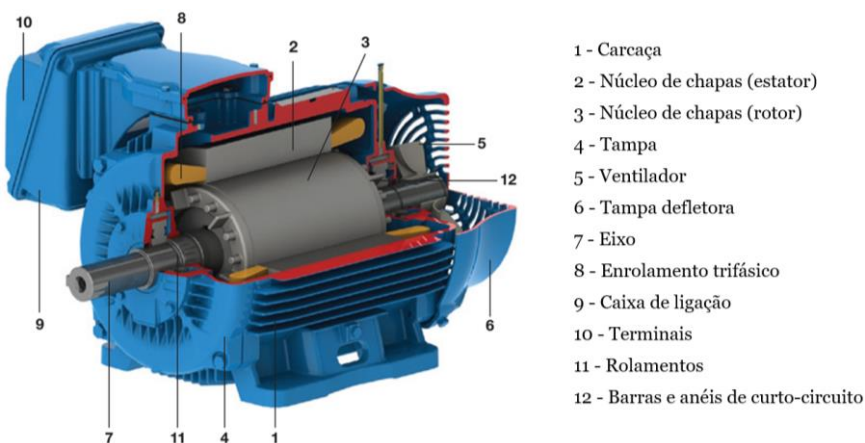
Os métodos de diagnóstico de avarias em rolamentos são geralmente agrupados em métodos convencionais (análise de vibrações, corrente, tensão, etc.), métodos estatísticos (valores RMS, variância, curtose) e métodos baseados em inteligência artificial (algoritmos de *machine learning* e *deep learning*). Embora populares, os métodos de inteligência artificial (IA) têm implementação complexa e interesse prático limitado (KHAN et al., 2022). Este estudo foca-se na análise não invasiva de avarias em rolamentos de MIs, destacando a análise da corrente do estator como método eficaz devido à informação valiosa que oferece. As correntes são medidas diretamente junto ao inversor, permitindo a aquisição de dados na maioria dos ambientes industriais.

## **1.1 Motor de indução**

Estima-se que mais de 90 % da potência mecânica na indústria seja fornecida por MIs trifásicos, compostos principalmente pelo estator - a parte fixa que gera o campo magnético - e o rotor - a parte móvel onde o binário é desenvolvido. Para além destes elementos principais, o motor

inclui ainda chumaceiras, veio, caixa e ventilador, que garantem o seu funcionamento adequado (MORA, 2008; SAHDEV, 2018). As partes constituintes do MI trifásico com rotor em gaiola de esquilo são apresentadas na Figura 1.

**Figura 1 – Partes Constitutivas do Motor de Indução Trifásico**



Fonte: Adaptado de (WEG, 2023)

## 1.2 Rolamentos

Enquanto forma mais comum de chumaceira, os rolamentos desempenham um papel fundamental nas máquinas elétricas rotativas, ao assegurar o correto alinhamento e posicionamento do rotor em relação ao estator, permitindo a rotação (CARDOSO, 2018). São projetados para suportar cargas radiais, axiais ou combinadas. Tipicamente, consistem em dois anéis concêntricos, um externo e outro interno, com esferas ou rolos entre eles, separados uniformemente por uma gaiola que impede o contacto direto (BONNARDOT et al., 2011; DÍAZ-SALDAÑA et al., 2024).

### 1.2.1 Frequências características dos rolamentos

Na maioria dos casos, uma avaria afeta apenas um componente do rolamento, como a pista interna, a pista externa, a gaiola ou as esferas, mas pode propagar-se para outros à medida que esta progride. Cada componente possui uma frequência característica, cuja energia aumenta em caso de dano. Estas frequências aparecerão nas assinaturas espectrais e podem ser determinadas através das seguintes equações (HARRIS; KOTZALAS, 2006; SILVA; CARDOSO, 2005).

- Frequência característica de vibração do anel externo [Hz]: 
$$f_{bor} = \frac{N_{cr} \cdot n}{2} * \left( 1 - \frac{D_{cr}}{D_p} * \cos\beta \right) \quad (1)$$

- Frequência característica de vibração do anel interno [Hz]: 
$$f_{bir} = \frac{N_{cr} \cdot n}{2} * \left( 1 + \frac{D_{cr}}{D_p} * \cos\beta \right) \quad (2)$$

- Frequência característica de vibração dos corpos rolantes [Hz]: 
$$f_{bs} = \frac{D_p \cdot n}{2 * D_{cr}} * \left( 1 - \left( \frac{D_{cr}}{D_p} * \cos\beta \right)^2 \right) \quad (3)$$

- Frequência característica de vibração da gaiola [Hz]:

$$f_{ft} = \frac{n}{2} * \left( 1 - \frac{D_{cr}}{D_p} * \cos\beta \right) \quad (4)$$

onde:

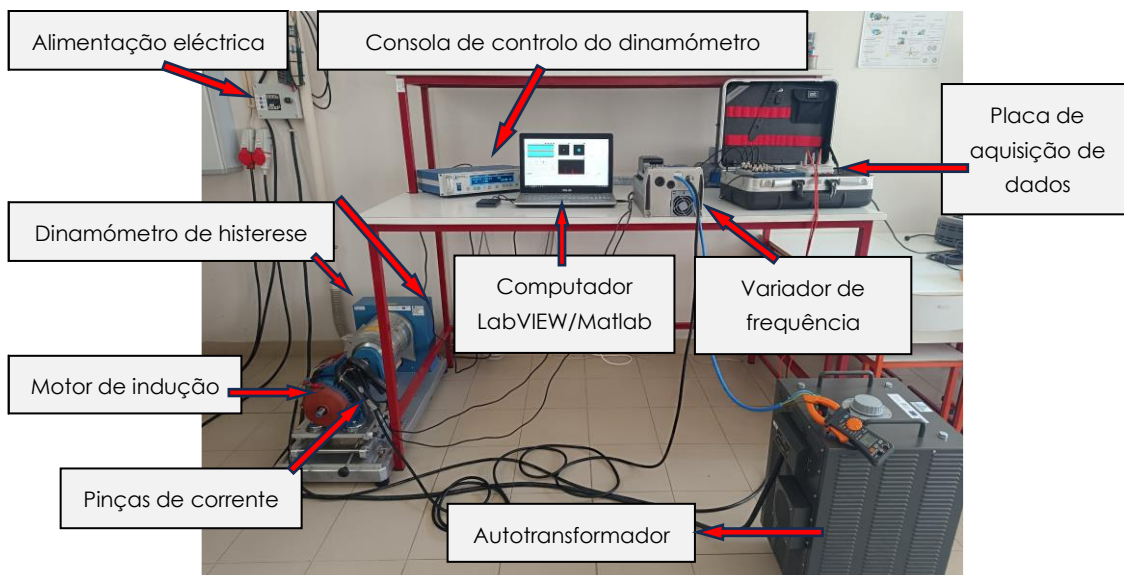
- $N_{cr}$  = Número de corpos rolantes;
- $D_p$  = Diâmetro primitivo [mm];
- $D_{cr}$  = Diâmetro do corpo rolante [mm];
- $n$  = Velocidade de rotação do veio [Hz];
- $\beta$  = Ângulo de contacto [°].

## 2 MATERIAIS

### 2.1 Equipamento e banco de ensaios

O banco de ensaios inclui componentes essenciais como uma fonte de alimentação trifásica; um autotransformador, que alimenta o variador de frequência; um MI trifásico WEG de 2,2 kW, com uma velocidade nominal de 1435 rpm e tensão nominal de 400 V, a 50 Hz; e o conjunto de rolamentos com as avarias a serem analisadas. Este motor está acoplado mecanicamente a um dinamómetro de histerese, permitindo variação do binário de carga. Para além disso, o banco está equipado com a instrumentação necessária para a recolha de dados, como pinças de corrente, multímetros, uma placa de aquisição de dados e um computador para aquisição e processamento de dados. A Figura 2 mostra o banco de ensaios completo, utilizado na recolha e análise de dados da corrente do estator.

**Figura 2 – Partes Constitutivas do Banco de Ensaio**



### 2.2 Caracterização das avarias dos rolamentos

O motor descrito anteriormente utiliza dois tipos de rolamentos: SKF 6205-2Z, no lado não acionado; e SKF 6206-2Z, no lado de ataque. As respetivas características são apresentadas no Quadro 1.

Os modos de avaria dos rolamentos incluem fadiga, desgaste, lubrificação inadequada, desalinhamento e correntes induzidas por inversores, também conhecidas como *Electric Discharge Machining* (EDM), que causam *pitting* e *fluting* nas superfícies das pistas dos rolamentos (SINGH; ANIL KUMAR; NAIKAN, 2018). Neste estudo, foram preparados dois rolamentos como mostra a Figura 3: o primeiro com um furo de Ø2 mm na pista externa do rolamento do lado de ataque; outro com danos localizados causados por ED, simulando o *pitting*.

**Quadro 1 – Características dos rolamentos SKF 6205-2Z e SKF 6206-2Z**

Características geométricas	SKF 6205-2Z	SKF 6206-2Z
Diâmetro primitivo (Dp) [mm]	39.04 mm	46 mm
Diâmetro do corpo rolante (Dcr) [mm]	7.94 mm	9.52 mm
Número de esferas (n)	9	9
Ângulo de contacto (β) [°]	0°	0°

**Figura 3 – Rolamentos com avarias: (a) Furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF6206-2Z; (b) ED no rolamento SKF6205-2Z**



### 3 MÉTODOS

#### 3.1 Short-Time Fourier Transform - STFT

A STFT é uma extensão da Transformada de Fourier para a análise de sinais não estacionários. O sinal é dividido em pequenas janelas temporais, sendo cada uma analisada através da transformada de Fourier de uma função  $s(\tau)$  sobre uma função janela  $w(\tau)$  real e simétrica, conforme a Equação (5) (COHEN, 1995; SATPATHI et al., 2018):

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t - \tau) s(\tau) e^{-j\omega\tau} . d\tau \quad (5)$$

onde  $S$  é o sinal,  $w$  é a função de janela, e  $t$  e  $\omega$  são os parâmetros de tempo e frequência, respectivamente. O espectrograma, baseado na STFT, é um gráfico 3D que representa a energia da frequência do sinal ao longo do tempo conforme expresso pela Equação (6) (PIETRZAK; WOLKIEWICZ, 2022). O eixo x indica o tempo, o eixo y as variações de frequência, e as cores mostram a amplitude da frequência.

$$spectrogram(t, \omega) = |S(t, \omega)|^2 \quad (6)$$

Os espectros de corrente resultantes de avarias nos rolamentos evidenciam os deslocamentos mecânicos causados pelas avarias, que produzem movimento radial entre o rotor e o estator, alterando a folga do motor (BENBOUZID; KLIMAN, 2003). Conforme mostrado em (BOUDINAR et al., 2016; SILVA; CARDOSO, 2005), estas variações geram

componentes espectrais na corrente de linha do estator, conforme derivado da Equação (7):

$$f_{STFT} = |f_s \pm kf_n| \quad (7)$$

onde  $f_s$  é a frequência fundamental de alimentação do motor;  $f_n$  são as frequências naturais dos componentes do rolamento, que são função das equações (1), (2), (3) e (4); e  $k$  assume os valores inteiros de 1, 2, 3, ...

### 3.2 Extended Park's Vector Approach (EPVA)

O método EPVA baseia-se na abordagem do vetor de Park (PVA), que identifica um padrão específico nas correntes elétricas através da transformação das correntes trifásicas do estator ( $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ ) em correntes equivalentes no referencial d-q ( $i_D$ ,  $i_Q$ ). As componentes do vetor de Park ( $i_D$ ,  $i_Q$ ) são calculados em relação às variáveis de fase ( $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ ), utilizando as seguintes equações (CARDOSO, 1991):

$$i_D = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}i_A - \frac{1}{\sqrt{6}}i_B - \frac{1}{\sqrt{6}}i_C \quad (8)$$

$$i_Q = \frac{1}{\sqrt{2}}i_B - \frac{1}{\sqrt{2}}i_C \quad (9)$$

Em condições ideais, as correntes trifásicas produzem um vetor de Park com as seguintes componentes:

$$i_D = \frac{\sqrt{6}}{2}i_{Max} * \cos(\omega t) \quad (10)$$

$$i_Q = \frac{\sqrt{6}}{2}i_{Max} * \sin(\omega t) \quad (11)$$

com  $i_{Max}$  a indicar o valor máximo da corrente de fase de alimentação [A],  $\omega$  a referir-se à frequência angular de alimentação [rad/s] e  $t$  a indicar a variável tempo [s]. Em condições anormais, surgem novas frequências na corrente do motor. O método EPVA analisa essas variações no vetor de Park, oferecendo uma visão detalhada do espectro da corrente. Considerando essas variações nas correntes de alimentação, as componentes do vetor de Park adotam uma nova estrutura, como indicado nas equações (12) e (13) (CRUZ; CARDOSO, 2001; SILVA; CARDOSO, 2005):

$$i_D = \sqrt{\frac{3}{2}}I_f \cdot \cos(\omega_s t - \alpha) + \sqrt{\frac{3}{2}}I_{al} \cdot \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + \sqrt{\frac{3}{2}}I_{dr} \cdot \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r) \quad (12)$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{3}{2}}I_f \cdot \sin(\omega_s t - \alpha) + \sqrt{\frac{3}{2}}I_{al} \cdot \sin(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + \sqrt{\frac{3}{2}}I_{dr} \cdot \sin(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r) \quad (13)$$

em que  $I_f$  é o valor máximo do termo fundamental da corrente de alimentação do motor quando existe um defeito no rolamento [A],  $I_{al}$  é o valor máximo da componente espectral da corrente de alimentação do motor associada à frequência  $|f_s - kf_n|$  [A],  $I_{dr}$  é o valor máximo da componente espectral da corrente de alimentação do motor associada à frequência  $|f_s + kf_n|$  [A],  $\alpha$  é a fase inicial do termo fundamental da

corrente de alimentação do motor [rad];  $\beta_l$  é a fase inicial da componente espectral da corrente de alimentação do motor associada à frequência  $|f_s - kf_n|$  [rad];  $\beta_r$  é a fase inicial da componente espectral da corrente de alimentação do motor associada à frequência  $|f_s + kf_n|$  [rad], e  $\omega_n$  é a frequência angular natural [rad/s].

Assim, o módulo do vetor de Park da corrente do estator é definido por:

$$|i_D + ji_Q|^2 = \frac{3}{2}(I_f^2 + I_{al}^2 + I_{ar}^2) + 3I_f I_{al} \cos(\omega_n t - \alpha + \beta_l) + 3I_f I_{ar} \cos(\omega_n t + \alpha - \beta_r) + 3I_{al} I_{ar} \cos(2\omega_n t - \beta_r + \beta_l) \quad (14)$$

A expressão do quadrado da magnitude do vetor de Park tem quatro termos: o primeiro é o termo constante dominante, os dois seguintes estão associados a  $f_n$  (produto da amplitude da componente fundamental e das componentes espectrais do defeito), e o último depende das amplitudes das correntes induzidas pela avaria. Na análise espectral do vetor de Park, as componentes espectrais associadas a avarias nos rolamentos são visualizadas usando a expressão seguinte:

$$f_{EPVA} = k * f_n \quad (15)$$

onde  $f_n$  são as frequências naturais dos componentes do rolamento, que são calculadas utilizando as equações (1), (2), (3) e (4); e  $k = 1, 2, 3, \dots$

#### 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para o ensaio experimental, foram obtidos os sinais das correntes do estator no estado saudável do motor alimentado diretamente da rede, que serão comparados com os sinais das avarias introduzidas nos rolamentos, tanto com ligação direta à rede, como através de um VFD. Os ensaios foram realizados em três níveis de carga (sem carga, meia carga e plena carga), para cada condição de avaria. As principais frequências características do rolamento SKF 6205-2Z estão listadas no Quadro 2, e as do rolamento SKF 6206-2Z no Quadro 3, ambas associadas ao funcionamento do motor com meia carga.

**Quadro 2 – Componentes de frequência do rolamento SKF 6205-2Z.**

	$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1474 \text{ rpm e } f_n = f_{bor} = 88.072 \text{ Hz}$	
$f_{STFT} =  f_s \pm kf_n $ Frequência [Hz]	K=1	K=2
	138.072	226.144

**Quadro 3 – Componentes de frequência do rolamento SKF 6206-2Z.**

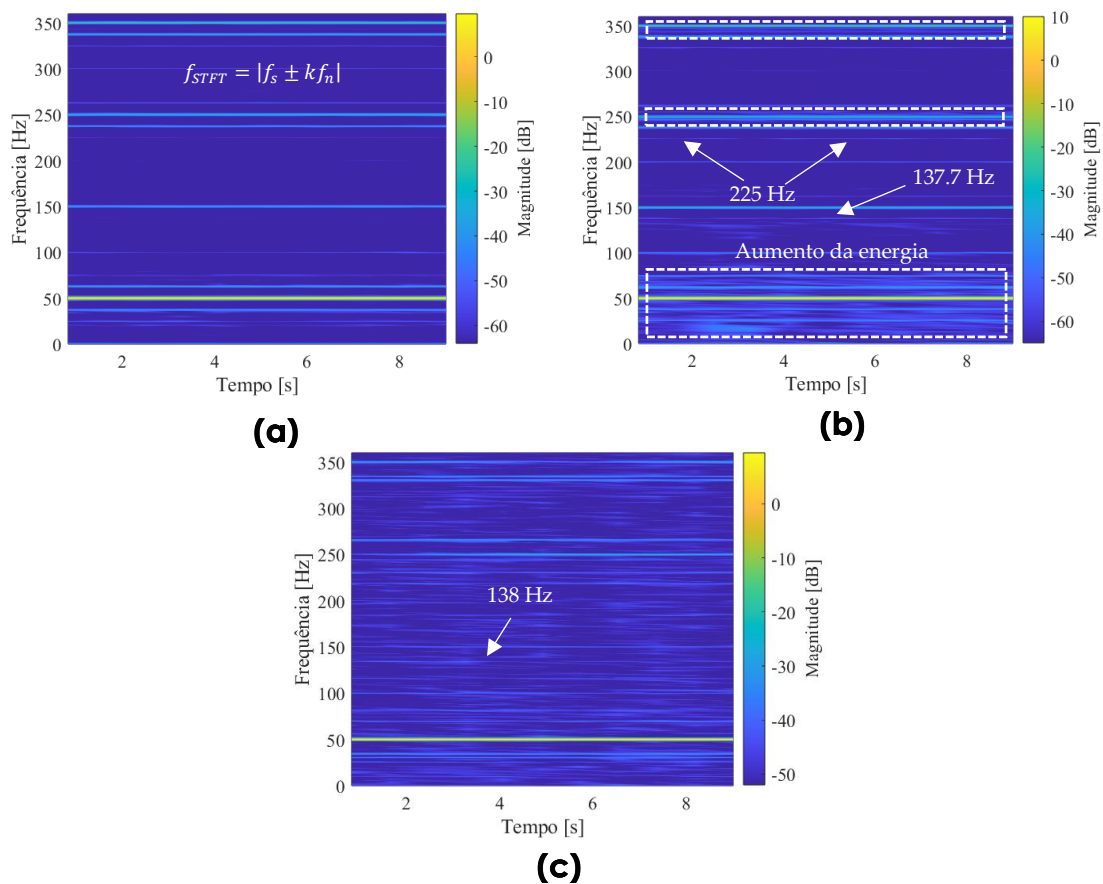
	$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1474 \text{ rpm e } f_n = f_{bor} = 87.659 \text{ Hz}$	
$f_{STFT} =  f_s \pm kf_n $ Frequência [Hz]	K=1	K=2
	137.7	225.4

Na figura 4 (a), observa-se um espectrograma isento de assinaturas de avaria, onde apenas se identifica a frequência da rede (50 Hz) e os seus harmônicos. Para além disso, surgem bandas laterais em torno dessas



frequências, devido à condição de carga, que se replicam em cada harmónico. No caso de avaria sem o uso do VFD, figura 4 (b), já se observam características relacionadas com a avaria, destacando-se o aumento da largura de banda dos harmónicos de 250 Hz e 350 Hz, além da presença visível da frequência de 137,7 Hz, associada à avaria na pista exterior do rolamento.

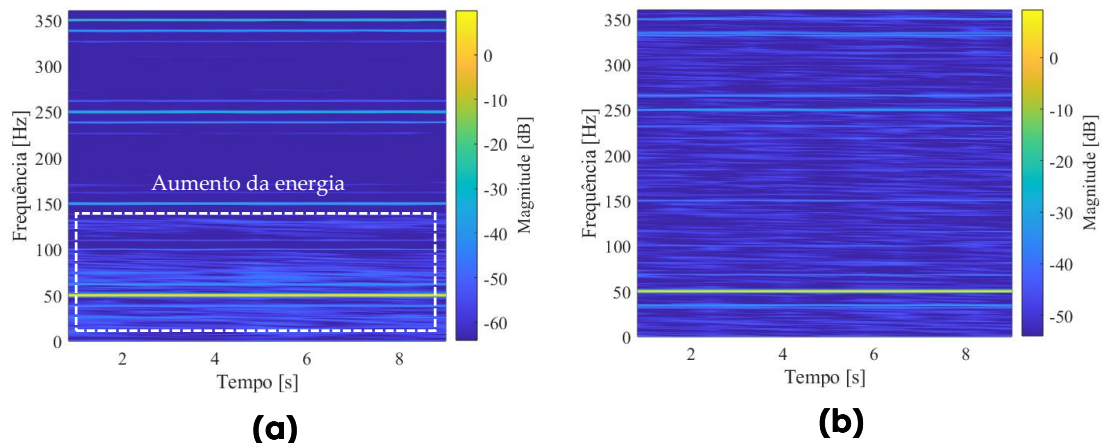
**Figura 4 – Espetrograma (STFT) da corrente do estator a meia carga: (a) Condição saudável, sem aplicação de VFD; (b) Furo de Ø2 mm na pista exterior do SKF 6206-2Z, sem VFD; (c) Avaria com VFD.**



Na figura 4 (c), onde a análise é feita com o uso do VFD, o espectrograma apresenta diferenças. Devido aos harmónicos de alta frequência gerados pelo VFD, que neste caso se situam em torno de 4 kHz, é gerado um elevado nível de ruído no sinal, o que oculta as frequências associadas à avaria entre os picos de ruído, dificultando o diagnóstico.

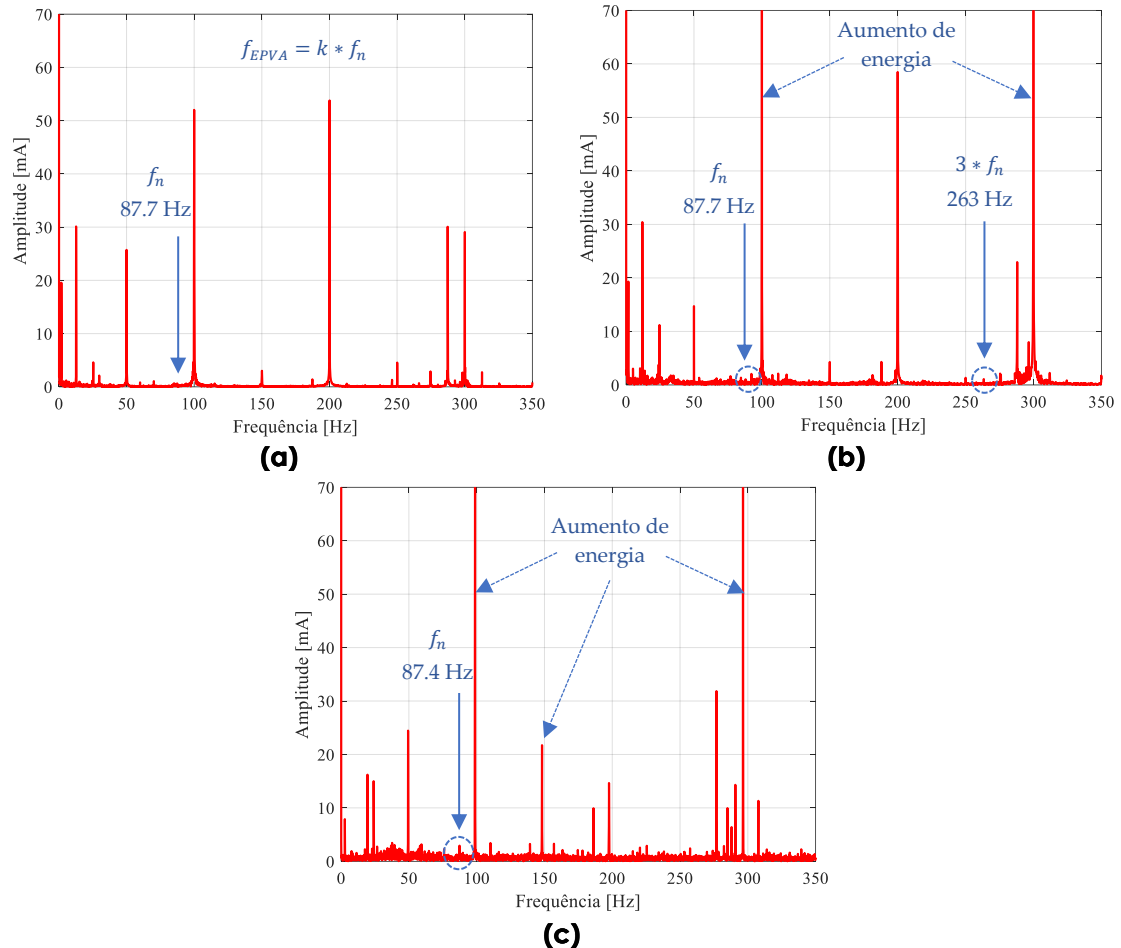
A figura 5 apresenta os espectrogramas da avaria de *pitting* causada por descargas eléctricas, distribuídas de forma não uniforme ao longo das pistas externa e interna do rolamento. No primeiro espectrograma – Figura 5 (a) - obtido com a medição da corrente quando o motor foi alimentado diretamente pela rede, observa-se, ao contrário do estado saudável e da avaria anterior, um aumento notável da energia nas baixas frequências. No entanto, não é possível identificar frequências específicas associadas à avaria nas pistas externa ou interna do rolamento.

**Figura 5 – Espectrograma (STFT) da corrente do estator a meia carga: (a) Avaria ED – SKF6205-2Z, sem VFD; (b) Avaria com VFD.**



Na figura 5 (b), apresenta-se o espectrograma obtido quando o MI é alimentado através de um VFD. De forma semelhante à análise da primeira avaria, e pelas razões já mencionadas relativas aos harmónicos, constata-se um aumento generalizado da energia em várias componentes espectrais (onde se inclui as componentes indicativas de avarias no rolamento).

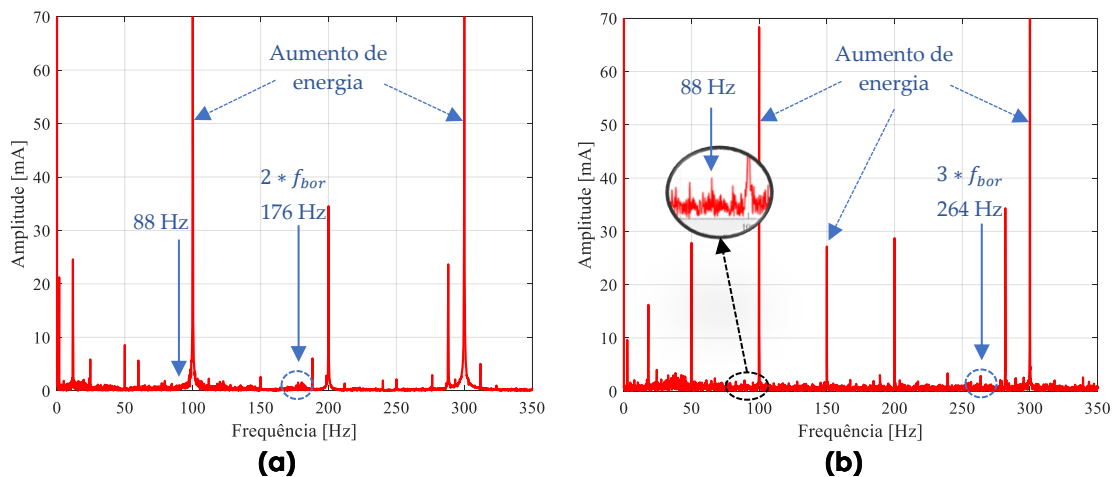
**Figura 6 – Análise EPVA a meia carga: (a) Saudável sem VFD; (b) Furo de Ø2 mm na pista exterior do SKF 6206-2Z sem VFD; (c) Avaria com VFD.**



A figura 6 apresenta os espectrogramas obtidos através da análise EPVA. A figura 6 (a) e figura 6 (b) referem-se aos espectros sem o uso do VFD, sendo que em (b) são observados pequenos aumentos de energia em torno da frequência característica da pista externa, conforme indicado na figura. Na figura 6 (c), que apresenta o espectro do sinal obtido com o uso do VFD, é mais evidente a presença de várias frequências, distribuídas ao longo de todo o espectrograma. De facto, é possível observar um aumento de energia em torno dos 87 Hz, semelhante ao caso sem o uso do VFD. A energia associada a essas frequências está relacionada com a severidade da avaria, que, neste caso, corresponde a um furo de 2 mm, representando uma avaria de severidade moderada a média (SILVA; CARDOSO, 2005). Por outro lado, o aumento da energia dos harmônicos de 100 Hz e 300 Hz é evidente, como indicado em cada espectrograma.

A figura 7 apresenta o espectrograma da segunda avaria, referente ao *pitting* causado por descargas elétricas (ED). Na figura 7 (a), observa-se apenas um ligeiro aumento geral de energia nas baixas frequências. No caso da figura 7 (b), com o uso do VFD, verifica-se um aumento geral do ruído em todo o espectrograma, mas ainda se podem distinguir picos de frequência relativos à avaria (88 Hz e 264 Hz), como indicado no espectrograma.

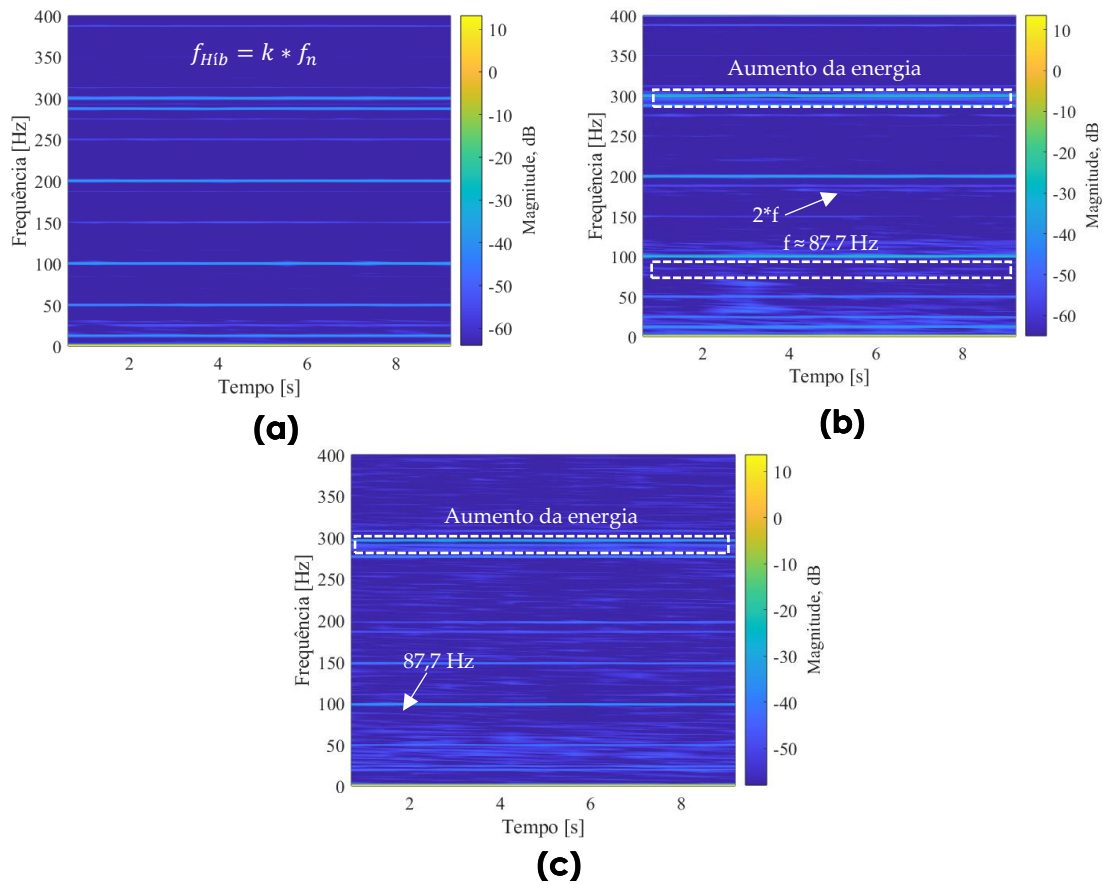
**Figura 7 – Análise EPVA a meia carga: (a) Avaria ED – SKF6205-2Z, sem VFD; (b) Avaria com VFD.**



Finalmente, foi realizada a combinação destes dois métodos, mostrando o espectrograma da magnitude da componente do vetor de Park. A Figura 8 (a) apresenta o espectrograma numa condição saudável, onde as componentes harmónicas esperadas são evidentes. Na Figura 8 (b), verifica-se um aumento de energia em torno dos 300 Hz, assim como ligeiros aumentos de energia na frequência característica da pista exterior. Na figura (c), é apresentado espectrograma obtido para a avaria por descargas elétricas (ED). Neste caso, é possível observar de forma mais clara um ligeiro aumento de energia na banda em torno dos 300 Hz.

Para além disso, a frequência de 87,7 Hz, mostrada na análise EPVA, apresenta variância temporal.

**Figura 8 – Espetrograma da análise híbrida a meia carga: (a) Condição saudável sem VFD; (b) Furo de Ø2 mm no anel exterior do SKF 6206-2Z sem VFD; (c) Avaria com VFD.**



## 5 CONCLUSÕES

Este estudo contribui para o diagnóstico de avarias em rolamentos de MIs através de uma abordagem não invasiva, superando as limitações dos métodos tradicionais para determinadas aplicações. O diagnóstico de avarias baseado no sinal de corrente do estator foi realizado aplicando as técnicas STFT e EPVA, que se baseiam na análise no domínio da frequência (no caso do EPVA), e na análise tempo-frequência (no caso da STFT). Para combinar as vantagens de ambas as técnicas, este estudo propõe uma abordagem híbrida, que aproveita a informação completa das três correntes de alimentação fornecida pelo EPVA, juntamente com uma análise tempo-frequência pela STFT.

Os métodos aplicados mostraram melhores resultados no diagnóstico da avaria correspondente ao furo na pista externa do rolamento, evidenciando um aumento de energia na frequência natural da pista, que neste caso é de 88 Hz, assim como aumentos de energia nas baixas

frequências e um aumento da energia em torno dos harmónicos de 250 Hz e 350 Hz. O método híbrido revelou-se eficaz quando o EPVA fornece informações detalhadas sobre as frequências.

As técnicas aplicadas demonstraram ser mais eficazes no diagnóstico de avarias quando o motor é alimentado diretamente pela rede elétrica. No caso da utilização de VFDs, estas técnicas não são tão fiáveis, sobretudo em avarias de severidade baixa a moderada ou incipientes, devido ao ruído gerado pelos harmónicos introduzidos pelos VFDs. Por esta razão, é pertinente implementar técnicas complementares que ajudem a minimizar o ruído, proporcionando uma análise mais precisa do sinal.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R. S. et al. Premature wear and recurring bearing failures in an inverter driven induction motor - Part I: Investigation of the problem. **Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)**, 2013.

BENBOUZID, M. E. H.; KLIMAN, G. B. What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis? **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 18, n. 2, p. 238–244, jun. 2003.

BONNARDOT, F. et al. Detection of Bearing Damage Using Stator Current, and Voltage to Cancel Electrical Noise. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2011 2011:1**, v. 2011, n. 1, p. 1–14, 22 fev. 2011.

BOUDINAR, A. H. et al. Induction motor bearing fault analysis using a root-MUSIC method. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 5, p. 3851–3860, 1 set. 2016.

CARDOSO, A. J. M. **Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos**. Coimbra - Portugal: Coimbra Editora, 1991.

CARDOSO, A. J. M. (ED.). **Diagnosis and Fault Tolerance of Electrical Machines, Power Electronics and Drives**. [s.l.] UK: IET - The Institution of Engineering and Technology, 2018.

CHEN, X. et al. Bearing Corrosion Failure Diagnosis of Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbines Based on Stator Current Analysis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 67, n. 5, p. 3419–3430, 1 maio 2020.

COHEN, L. **Time-Frequency Analysis**. New Jersey - United States of America: Prentice Hall PTR, 1995.

CRUZ, S. M. A.; CARDOSO, A. J. M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended park's vector approach. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 37, n. 5, p. 1227–1233, set. 2001.

DÍAZ-SALDAÑA, G. et al. Methodology for the Detection of Contamination and Gradual Outer Race Faults in Bearings by Fusion of Statistical Vibration–Current Features and SVM Classifier. **Applied Sciences 2024, Vol. 14, Page 5310**, v. 14, n. 12, p. 5310, 19 jun. 2024.

GUO, L. et al. Deep Convolutional Transfer Learning Network: A New Method for Intelligent Fault Diagnosis of Machines with Unlabeled Data. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 66, n. 9, p. 7316–7325, 1 set. 2019.

HARRIS, T. A.; KOTZALAS, M. N. **Rolling Bearing Analysis: Advanced concepts of bearing technology**. 5th. ed. London - New York: CRC/Taylor & Francis, 2006.

KHAN, M. A. et al. The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines—The State of the Art. **Energies 2023, Vol. 16, Page 296**, v. 16, n. 1, p. 296, 27 dez. 2022.

KOTHARI, D. P.; NAGRATH, I. J. **Electric Machines**. 4th. ed. New Delhi - India: Tata McGraw-Hill, 2010.

MORA, J. F. **Máquinas Eléctricas**. 5th. ed. Madrid - Espanha: Mc-GRAW-HILL, 2008.

PIETRZAK, P.; WOLKIEWICZ, M. Stator Phase Current STFT analysis for the PMSM Stator Winding Fault Diagnosis. **2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2022**, p. 808–813, 2022.

SAHDEV, S. K. **Electrical Machines**. India: Cambridge University Press, 2018.

SATPATHI, K. et al. Short-Time Fourier Transform Based Transient Analysis of VSC Interfaced Point-to-Point DC System. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 5, p. 4080–4091, 1 maio 2018.

SILVA, J. L. H.; CARDOSO, A. J. M. **Diagnóstico e análise de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos**. Coimbra – Portugal: Universidade de Coimbra, 2005.

SILVA, J. L. H.; CARDOSO, A. J. M. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's Vector approach. **IECON**

**Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, v. 2005, p. 2591–2596, 2005.

SINGH, G.; ANIL KUMAR, T. C.; NAIKAN, V. N. A. A non intrusive methodology for bearing current detection in PWM inverter fed induction motor drive. **Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing, PICC 2018**, p. 1–6, 13 jun. 2018.

SUN, M. et al. A Novel Data-Driven Mechanical Fault Diagnosis Method for Induction Motors Using Stator Current Signals. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 9, n. 1, p. 347–358, 1 mar. 2023.

TOMA, R. N.; KIM, C. H.; KIM, J. M. Bearing Fault Classification Using Ensemble Empirical Mode Decomposition and Convolutional Neural Network. **Electronics 2021, Vol. 10, Page 1248**, v. 10, n. 11, p. 1248, 24 maio 2021.

WEG. **Guia de especificação motores elétricos.** , jun. 2023. Disponível em: <[www.weg.net](http://www.weg.net)>. Acesso em: 5 set. 2024

WILDI, T. **Electrical machines, drives, and power systems.** 6th. ed. New Jersey: Pearson Education, 2006.



## COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLID-STATE DC PROTECTION DEVICES

SAMPAIO FONSECA, LUÍS JORGE (1); FIGUEIREDO BENTO, ANA RAFAELA (2); BENTO, FERNANDO (3); MARQUES CARDOSO, ANTONIO J. (4)

(1) CISE - Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, P – 6201-001 Covilhã, Portugal  
E-mail: [luis.sampaio.fonseca@ubi.pt](mailto:luis.sampaio.fonseca@ubi.pt)

(2) CISE - Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, P – 6201-001 Covilhã, Portugal  
E-mail: [anarafaelabento@ieee.org](mailto:anarafaelabento@ieee.org)

(3) CISE - Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, P – 6201-001 Covilhã, Portugal  
E-mail: [fjfbento@ieee.org](mailto:fjfbento@ieee.org)

(4) CISE - Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, P – 6201-001 Covilhã, Portugal  
E-mail: [ajmcardoso@ieee.org](mailto:ajmcardoso@ieee.org)

### ABSTRACT

Protection of direct current (DC) microgrids against short-circuit (SC) faults remains as a remarkable challenge, namely because of the absence of natural zero current crossing points. To cope with the requirements of selectivity and fast fault isolation, a series of DC protection devices and architectures have been recently proposed by the scientific community, allowing the safe commutation of the fault current. To make an enlightened decision regarding the selection of the best DC protection devices for low-voltage DC microgrids, this study presents a comprehensive analysis of three distinctive configurations for solid-state circuit breakers (SSCBs) commonly described in the literature as solutions of excellence for protecting low-voltage DC microgrids. A new performance evaluation paradigm is introduced, meticulously examining each SSCBs configuration for its dynamic response capability, energy dissipation requirements, behaviour in face of voltage and current surges, and the specific components ratings. Finally, the challenges and prospective trends in the protection of DC microgrids against SC faults are addressed.

**Keywords:** DC Protection, Solid-State Circuit Breaker (SSCB), Semiconductors, Surge Arresters, Performance Evaluation.



## RESUMO

A protecção de microrredes de corrente contínua (DC) contra curto-circuitos (CC) afigura-se um desafio notório, nomeadamente devido à ausência de passagem da corrente eléctrica por zero. Para fazer face aos requisitos de selectividade e isolamento rápido de avarias, foram recentemente propostos, pela comunidade científica, vários dispositivos para a protecção de microrredes DC, capazes de assegurar a comutação e interrupção segura da corrente de falha. Para tomar uma decisão esclarecida relativamente à selecção dos melhores dispositivos de protecção para microrredes DC de baixa tensão, este artigo apresenta uma análise abrangente de três configurações distintas de disjuntores de estado sólido (SSCBs) frequentemente descritas na literatura científica e referidas como soluções de excelência para a protecção de microrredes DC de baixa tensão. É introduzido um novo paradigma de avaliação do desempenho, que examina meticulosamente cada configuração de SSCB quanto à sua capacidade de resposta dinâmica, requisitos de dissipação de energia, comportamento face a picos de tensão e corrente, e valores nominais dos componentes. Por fim, são abordados os desafios e as tendências futuras relativamente à protecção de microrredes DC contra falhas de CC.

**Palavras-chave:** Protecção DC, Disjuntor de Estado Sólido (SSCB), Semicondutores, Protectores contra Sobretensões, Análise de Desempenho.

## 1 INTRODUCTION

A microgrid can be defined as an energy distribution system that interconnects Distributed Energy Resources (DERs) consisting of renewable or low-carbon-based energy generation; energy storage systems; and loads (such as electric vehicles). Microgrids are operated in a controlled and coordinated manner, either connected to the main grid or operating in islanded mode [1].

The occurrence of short-circuits in these energy distribution networks can result in high transient currents due to the low impedance of the conductors and high capacitance. Protection devices applied in DC power systems must adhere to four principles: selectivity, sensitivity, safety, and speed. In that regard, the main short-circuit current protection devices can be classified as:

- Solid-state DC circuit breakers (SSCBs);
- Hybrid DC circuit breakers;
- Mechanical DC circuit breakers;
- Fuses.

Table 1, adapted from [2], presents a summary of the advantages and disadvantages associated with each type of protection device.

**Table 1 – Advantages and disadvantages of protection devices used in DC microgrids.**

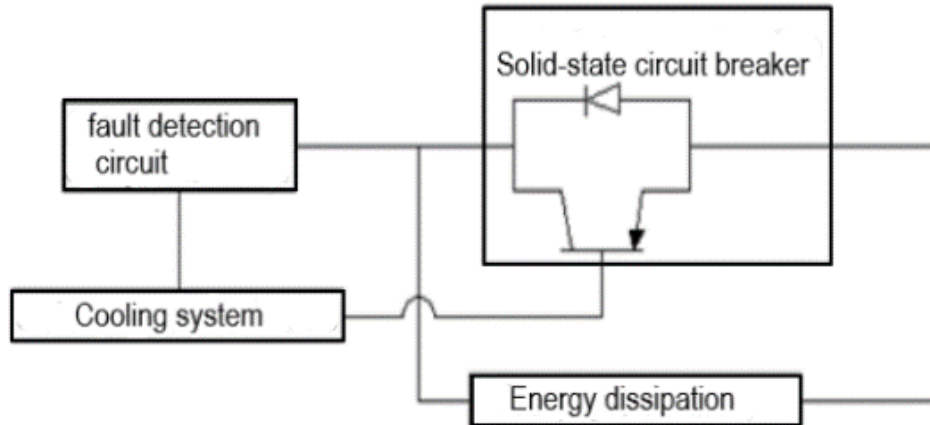
Protection devices	Advantages	Disadvantages
Fuse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ease of application</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Single use</li> </ul>
Mechanical circuit breaker	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low contact resistance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low response speed</li> </ul>
Solid-state circuit breaker	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ultrafast operation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High conduction losses</li> </ul>
Conventional hybrid circuit breaker	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low conduction losses</li> <li>• Reasonable speed operation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Current switching requires the occurrence of an electrical arc</li> </ul>
Proactive or Active Switching Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceptable efficiency</li> <li>• Fast operation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considerable losses in switch operation</li> </ul>
Hybrid with Switching Auxiliary	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operation is faster with a higher rate of fault current rise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Significant losses in the coupled coil</li> </ul>
Hybrid with Current Limiting Superconductors	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduced losses</li> <li>• Intrinsic ability to limit fault current</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Need to associate a resonant circuit with the mechanical circuit breaker</li> <li>• Need to incorporate cooling systems</li> </ul>

This paper solely addresses solid-state protection devices because, when compared to conventional mechanical circuit breakers and other topologies, SSCBs provide faster and more accurate switching operations to handle transients or faults, making them appealing for DC microgrids [3]. Reaction times are extremely short, making them ideal for DC protection. These devices potentially increase the reliability of the distribution system, reduce downtime from power outages, and minimize potential damage to utilities or end-user equipment [4]. However, their main disadvantage is the high conduction losses, especially in normal operating mode, which can account for up to 30 % of the total losses recorded in voltage-source converters (VSCs) [2]. To minimize these losses, wide-bandgap semiconductors can be used instead of traditional silicon semiconductors.

As main switching device, SSCBs usually employ semiconductor devices such as metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs), insulated gate bipolar transistors (IGBTs), integrated gate-commutated thyristors (IGCTs), or junction field-effect transistors (JFETs) [5]. The basic configuration of a SSCB consists of a solid-state switch in the main path, a

snubber, and an energy-absorbing branch to handle the switching transient and residual energy of the system, respectively. The overall structure of a SSCB is presented in Figure 1 [6].

**Figure 1 – Overall structure of a SSCB.**



**Source:** [2]

Other unfavourable aspects of using semiconductor-based protection devices include their high price, considerable dimensions, and high sensitivity to overvoltages and overcurrents, which can lead to damage to the protection components. For this reason, the use of SSCBs is often limited to applications with a low rate of current rise in fault mode, where fast operation is a key criterion. Unlike semiconductors used in power electronic converters, semiconductors used in SSCBs only perform occasional switching operations, which means that the switching losses can be neglected [6].

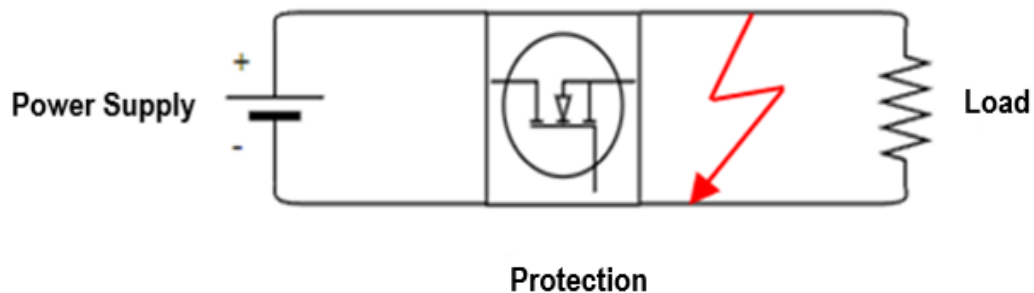
SSCBs have fairly simple operation principles. During normal operation of the DC microgrid, electrical current flows through the semiconductors of the main branch. When a fault occurs, the current increases rapidly, allowing to flag the fault condition. At that time, a command is sent to the semiconductors of the main branch, turning them off. Once the semiconductors are turned off, the voltage at their terminals undergo an increase due to the energy stored in the line inductance. If components that limit the voltage increase are not used, the voltage can reach hundreds of kV, values not supported by the semiconductors. For this reason, snubber circuits are sometimes employed, to control potential voltage spikes [7]. In addition to varistors, the energy dissipation branch may also include capacitors. This branch also aims to limit the fault current, meaning that components adjacent to the protection systems will be subject to lower thermal and magnetic stress [6]. Other methods can be used to limit fault current [6], such as those based on the thermal effect of superconductors. Materials with this property become extremely good conductors (with no electrical resistance) when cooled below a certain temperature. At this temperature, electrons can move freely. When a fault occurs, the temperature increases due to the excess

current passing through the superconductor, causing it to have properties of a common conductor with higher electrical resistance, thus limiting the fault current [8]. Considering the operating principles of superconductors, using them to limit current becomes impractical and expensive, as a bulky and complex cooling system is required. Another alternative for limiting current involves using a pulse-by-pulse control strategy, in which the semiconductors' gating signals are controlled to restrict the fault current to a certain range of values [2].

To meet the requirements of selectivity and fast fault isolation, various SSCB configurations have recently been proposed by the scientific community. They are capable of ensuring safe switching and interruption of the fault current in DC microgrids. In order to make an informed decision regarding the selection of the best protection devices for low-voltage DC microgrids, it is important to understand which SSCB configurations have the most favourable characteristics. This paper aims to assess the effectiveness of different SSCBs configurations.

For the evaluation, the circuit presented in Figure 2 was considered. It consists of a DC voltage source supplying a resistive load. A SSCB is integrated between the two elements, aiming the protection against a short-circuit fault at the load side.

**Figure 2 – Circuit used to test the SSCBs, in the presence of pole-to-pole short-circuit fault.**



A pole-to-pole short-circuit was simulated. It occurs when there is a contact failure in insulation between the positive and negative poles of the DC system, as illustrated in Figure 2. This type of failure is generally of low impedance. Thus, the amplitude of the fault current is typically high. These failures can occur either in the DC bus or in the microgrid loads [1].

Table 2 summarises the parameters of the circuit tested in simulation.

**Table 2 – Simulation parameters.**

Parameter	Nomenclature	Value
$V_{in}$	Supply voltage	100 V
$V_{ref}$	Varistor clamping voltage	150 V, 200 V, 450 V, 600 V
$R_c$	Load resistance	{20, 30} $\Omega$
$R_{cc}$	Short-circuit resistance	0.01 $\Omega$
$L$	Line inductance	5 mH

## 2 ANALYSED SSCB CONFIGURATIONS

The SSCB topologies evaluated in this study are those described more frequently in the scientific literature. For a fair comparison, all three SSCB topologies are evaluated for the variables listed in Table 3.

**Table 3 - Nomenclature and Parameters to Analyse**

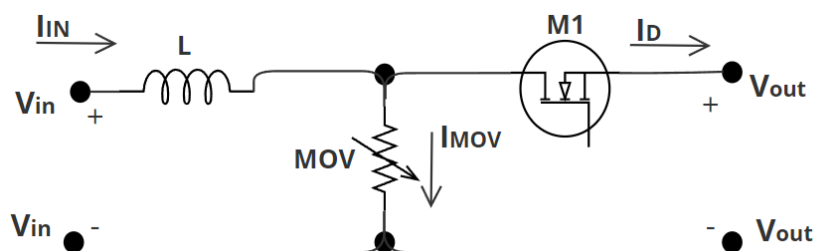
Parameter	Nomenclature
$I_{MOV_{max}}$	Maximum current at the varistor
$I_{S_{max}}$	Maximum current at the snubber
$I_{D_{max}}$	Maximum current at the main semiconductor
$V_{M1_{max}}$	Maximum voltage at the main semiconductor
$V_{protec_{max}}$	Maximum voltage at the SSCB terminals
$V_{M2_{max}}$	Maximum voltage at the snubber semiconductor
$E_{MOV}$	Energy dissipated at the varistor
$E_s$	Energy dissipated at the snubber
$P_{MOV_{max}}$	Maximum power at the varistor
$P_{S_{max}}$	Maximum power at the snubber

The following subsections detail the three distinctive topologies addressed in this study.

### 2.1 Current limiting SSCB configuration without resistor

This configuration, shown in Figure 3, is one of the simplest SSCBs, comprising just one semiconductor at the main branch and a varistor, whose terminals are connected between the two poles of the DC system.

**Figure 3 – Current limiting SSCB without resistor.**



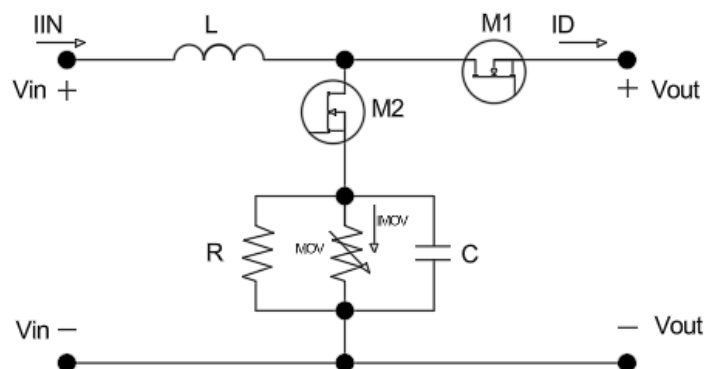
This configuration was analyzed for three distinct conditions, each with a different clamping voltage of the varistor ( $V_{ref}$ ): 1)  $V_{ref} = 200\text{ V}$ ; 2)  $V_{ref} = 450\text{ V}$ ; and 3)  $V_{ref} = 600\text{ V}$ .

## 2.2 Current limiting SSCB configuration with RC snubber

Like the current limiting SSCB without resistor, this SSCB also has the varistor terminals connected to both poles of the DC network. In addition to the varistor, a RC circuit is used in parallel with the varistor. An auxiliary semiconductor is usually introduced in series with the energy dissipation branch, to mitigate the risk of leakage currents. This configuration is shown in Figure 4.

To evaluate the impact of the energy dissipation elements and its sizing, this configuration was analysed for two different supply voltages, each with different resistance and capacitance values, and a constant clamping voltage of the varistor ( $V_{ref} = 200\text{ V}$ ). In the first case, a SSCB integrating a MOV with  $V_{ref} = 200\text{ V}$ ,  $R = 30\ \Omega$  and  $C = 50 \times 10^{-6}\text{ F}$  was considered. In the second case, a SSCB integrating a MOV with  $V_{ref} = 200\text{ V}$ ,  $R = 20\ \Omega$  and  $C = 10 \times 10^{-6}\text{ F}$  was simulated.

**Figure 4 – Current limiting SSCB with RC snubber.**

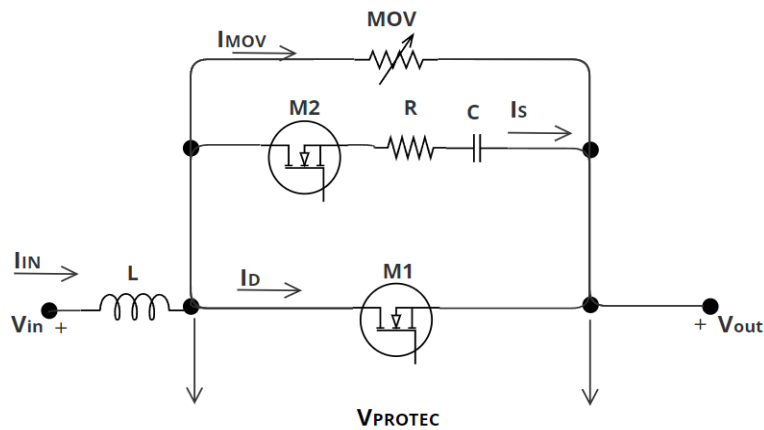


## 2.3 Current interruption SSCB with RC snubber

This SSCB configuration is also comprised of a varistor and a RC circuit. Unlike the current limiting configuration, the current interrupting SSCB employs the energy dissipation components in parallel with the main semiconductor.

Figure 5 depicts the current interruption SSCB with RC snubber.

**Figure 5 – Current interruption SSCB with RC snubber.**



Like in the previous case, the current interruption configuration was tested for two scenarios. In the first scenario,  $R = 30 \Omega$ ,  $C = 50 \times 10^{-6} \text{ F}$  and  $V_c = 200 \text{ V}$ , while in the second scenario,  $R = 20 \Omega$ ,  $C = 10 \times 10^{-6} \text{ F}$  and  $V_c = 200 \text{ V}$ .

### 3 RESULTS

#### 3.1 Current limiting SSCB configuration without resistor

Table 4 compiles the simulation results obtained when simulating the current limiting SSCB without resistor, as a function of the varistor clamping voltage.

**Table 4 – Simulation results for the current limiting SSCB without resistor.**

Variables	Results		
	Vref = 200 V	Vref = 450 V	Vref = 600 V
$I_{MOV_{max}}$	<b>11.94 A</b>	11.68 A	11.52 A
$I_{D_{max}}$	<b>12.06 A</b>	12.06 A	12.06 A
$V_{M1_{max}}$	<b>284.0 V</b>	630.8 V	835.0 V
$E_{MOV}$	<b>0.625 J</b>	0.453 J	0.427 J
$P_{MOV_{max}}$	<b>3387 W</b>	7364 W	9619 W

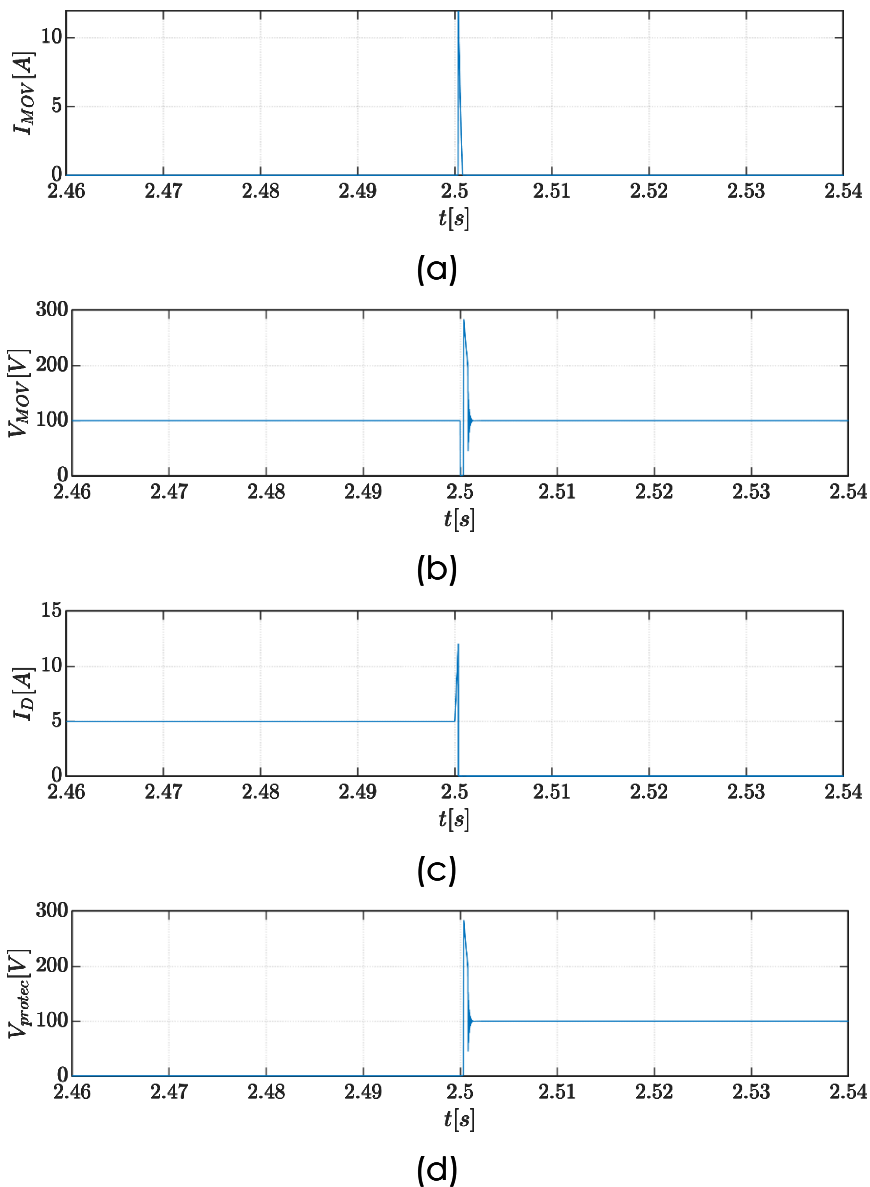
The circuit of the current limiting SSCB without resistor is very simple, which can lead to ease of implementation and lower production costs. Despite this advantage, the components may experience higher stress due to the lack of control over voltage and current spikes.

The results show that the increase in the varistor clamping voltage leads to a corresponding increase in the peak voltages and powers observed on the main semiconductor and varistor. Repeated activation of this type of protection is, therefore, not recommended.

Despite its simplicity, this topology presents the risk of leakage currents through the commutation branch, particularly when the DC system is healthy. If such leakage currents persist over time, they induce accelerated degradation of the varistor due to overheating.

The results shown in Figure 6 are based on the scenario highlighted in bold in Table 4.

**Figure 6 – Waveforms of the voltages and currents observed at the SSCB components: (a) varistor current; (b) varistor voltage; (c) main semiconductor current; (d) main semiconductor voltage.**



### 3.2 Current limiting SSCB configuration with RC snubber

Table 5 compiles the simulation results obtained when simulating the current limiting SSCB with RC snubber, considering a constant clamping voltage  $V_{ref}$  of 200 V.



**Table 5 – Simulation results for the current limiting SSCB with RC snubber.**

Variables	Results	
	R = 30 $\Omega$ , C = 50 $\mu$ F Vref = 200 V	R = 20 $\Omega$ , C = 10 $\mu$ F Vref = 200 V
$I_{MOV_{max}}$	0.316 A	<b>0.170 A</b>
$I_{D_{max}}$	11.91 A	<b>11.97 A</b>
$V_{M1_{max}}$	196.9 V	<b>191.9 V</b>
$E_{MOV}$	0.022 J	<b>0.005 J</b>
$E_s$	1.90 J	<b>1.17 J</b>
$P_{MOV_{max}}$	61.93 W	<b>32.56 W</b>
$P_{S_{max}}$	2253 W	<b>2072 W</b>

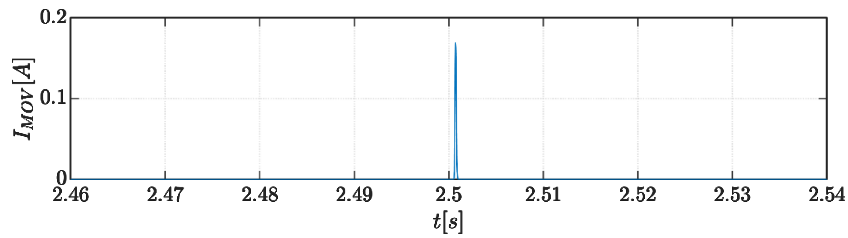
The circuit of the current limiting SSCB with a RC snubber is more complex, given the additional components required for its implementation. Also, its control is more elaborated, but enables additional flexibility to handle voltage peaks, resulting in a more stable operation of the SSCB.

The results presented in Table 5 reveal reduced energy dissipation requirements in both the varistor and the snubber, when compared to the configuration without snubber.

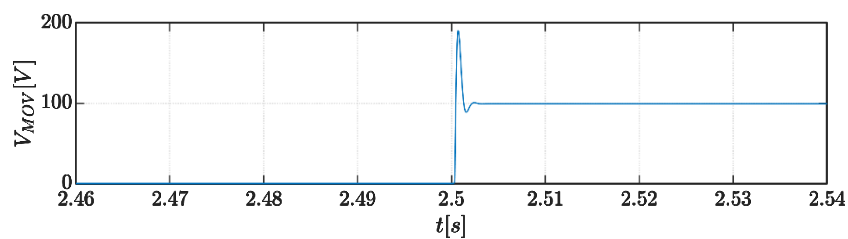
Another interesting effect of the snubber is the reduction in the maximum voltage applied to the main semiconductor, which in this case does not exceed the varistor's clamping voltage. This confirms the superiority of the current limiting SSCB with RC snubber over the one without snubber, particularly in terms of stress imposed on the varistor. Despite integrating additional components, this topology mitigates the risk of leakage currents through the switching branch, for operation without a fault in the DC microgrid.

The results shown in Figure 7 are based on the scenario highlighted in bold in Table 5.

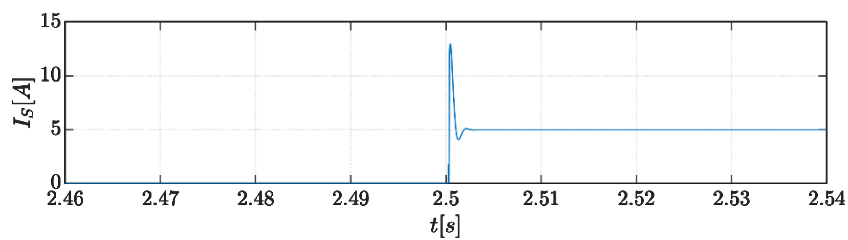
**Figure 7 – Waveforms of the voltages and currents observed at the SSCB components: (a) varistor current; (b) varistor voltage; (c) snubber current; (d) main semiconductor current; (e) main semiconductor voltage; (f) snubber voltage.**



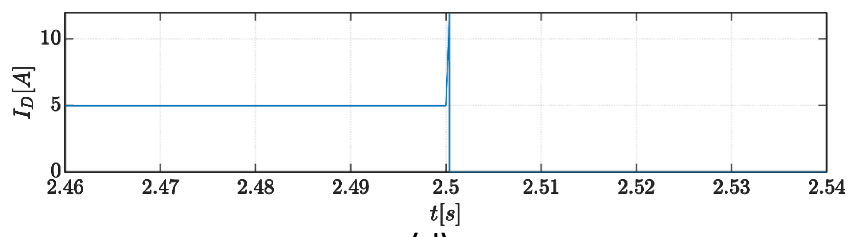
(a)



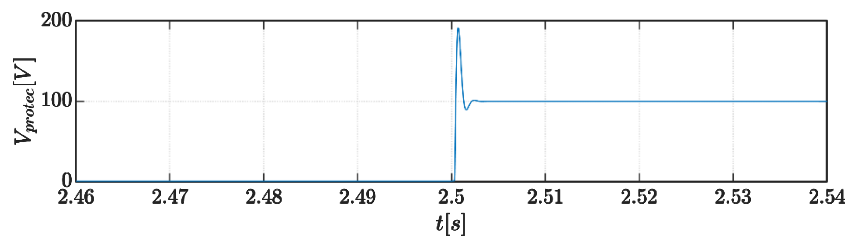
(b)



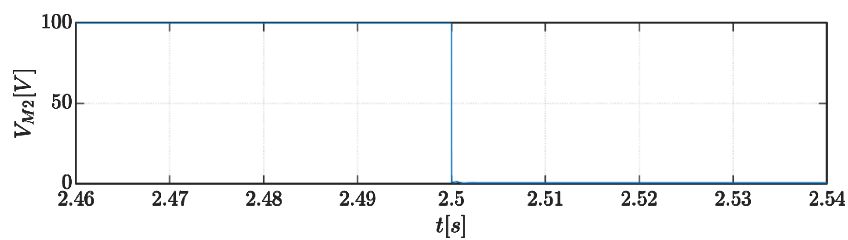
(c)



(d)



(e)



(f)

### 3.3 Current interruption SSCB with RC snubber

Table 6 compiles the simulation results obtained when simulating the current interruption SSCB with RC snubber, considering a constant clamping voltage  $V_{ref}$  of 200 V.

**Table 6 – Simulation results for the current interruption SSCB with RC snubber.**

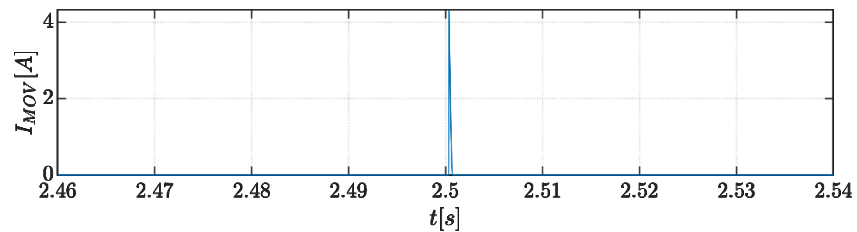
Variables	Results	
	R = 30 $\Omega$ , C = 50 $\mu$ F Vref = 200 V	R = 20 $\Omega$ , C = 10 $\mu$ F Vref = 200 V
$I_{MOV_{max}}$	<b>4.32 A</b>	3.16 A
$I_{S_{max}}$	<b>7.66 A</b>	10.41 A
$I_{D_{max}}$	<b>12.04 A</b>	12.03 A
$V_{M1_{max}}$	<b>231.3 V</b>	223.8 V
$V_{protec_{max}}$	<b>231.3 V</b>	228.8 V
$V_{M2_{max}}$	<b>5.62 V</b>	0.51 V
$E_{MOV}$	<b>0.147 J</b>	0.247 J
$E_S$	<b>0.785 J</b>	0.426 J
$P_{MOV_{max}}$	<b>997 W</b>	708.6 W
$P_{S_{max}}$	<b>1771 W</b>	2215 W

The data shows that the configuration with  $R = 20 \Omega$  and  $C = 10 \mu F$  results in lower peak currents in the varistor, but much higher peak voltages and powers, when compared to the case where a snubber with  $R = 30 \Omega$  and  $C = 50 \mu F$  is used. This suggests that this configuration imposes greater stress on the protection components, especially the varistor and the semiconductors. For the case where  $R = 30 \Omega$  and  $C = 50 \mu F$ , higher currents are observed in the protection, but lower voltages and powers, indicating a more balanced and less aggressive behaviour during the fault.

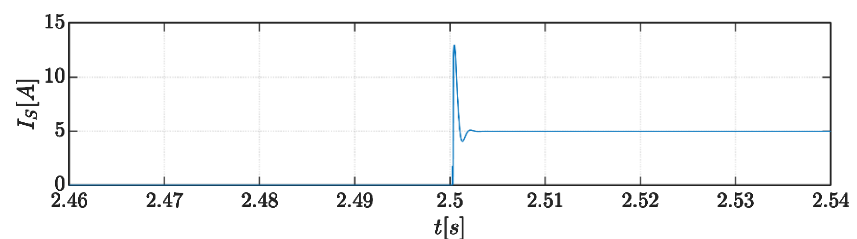
A more careful comparison between the current interruption and the current limiting topologies reveals that there are reductions in the energy dissipated in the varistor of around 85 %. On the other hand, the energy dissipated in the snubber increases by approximately 49 %. This increase is not particularly significant, given that varistors are the elements most susceptible to degradation due to the amount of energy to be dissipated.

The results shown in Figure 8 are based on the scenario highlighted in bold in Table 6.

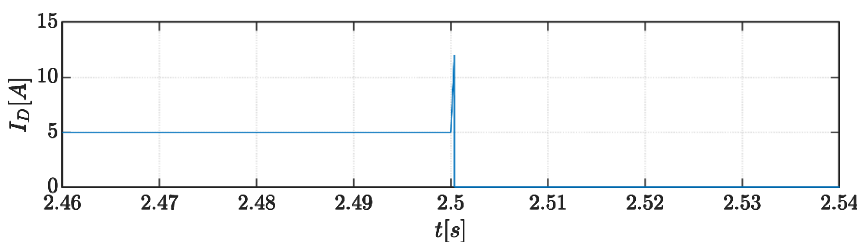
**Figure 8 – Waveforms of the voltages and currents observed at the SSCB components: (a) varistor current; (b) snubber current; (c) main semiconductor current; (d) main semiconductor voltage; (e) snubber voltage.**



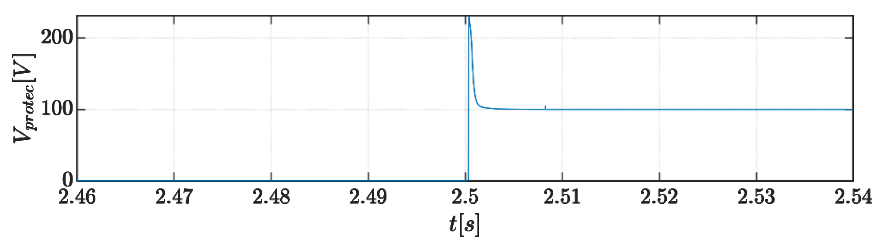
(a)



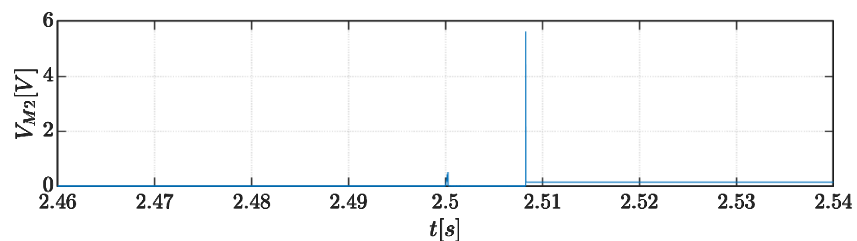
(b)



(c)



(d)



(e)

#### 4 CONCLUSION

This paper establishes a parametric comparison between three of the most relevant SSCB topologies.

The results suggest that selecting the appropriate circuit configuration involves balancing factors such as response time, capability to control of voltage peaks, stress imposed to the protection components and surrounding components, and cost considerations, with the ultimate goal of ensuring optimal performance of the DC protection system. The summary of these characteristics for each configuration is seen in Table 7.

**Table 7 - DC Circuit Breaker Topologies**

Topology	Features
Current limiting SSCB without resistor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Very simple circuit;</li> <li>• Low production cost.</li> </ul>
Current limiting SSCB with RC snubber	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faster response when the snubber resistance is lower;</li> <li>• Better control of voltage peaks;</li> <li>• Lower stress on the protection components;</li> <li>• Less variation in voltage and current.</li> </ul>
Current interruption SSCB with RC snubber	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quick response when the snubber resistance is lower;</li> <li>• Better control over voltage peaks;</li> <li>• Lower stress on the protection components;</li> <li>• Less variation in voltage and current.</li> </ul>

## 5 REFERENCES

- [1] F. P. F. G. Duarte, «Operação de Micro-redes híbridas AC/DC», MSc thesis, Sep. 2022. Accessed: Jun. 1, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/145700>.
- [2] A. R. F. Bento, «Análise e Desenvolvimento de Dispositivos de Proteção Aplicados a Micro-Redes de Corrente Contínua», MSc thesis, Out. 2021. Accessed: Mar. 17, 2023. [Online]. Available: <https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/11812>
- [3] M. M. Walter, «Switching arcs in passive resonance HVDC circuit breakers», PhD Thesis, 2013. Accessed: Jun. 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/130211/eth-8416-01.pdf>.
- [4] R. P. Barcelos, «Solid-state circuit breaker electrical and thermal modeling», MSc thesis, 2020. Accessed: Mar. 17, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/219463>.
- [5] K. M. António, «Desenvolvimento e Implementação de Sistemas de Proteção Aplicados a Micro-Redes de Corrente Contínua», MSc thesis, Out. 2021. Accessed: Mar. 17, 2023. [Online]. Available: <https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/11995>
- [6] S. J. K. Berg, «Solid State Circuit Breakers In Medium Voltage Direct Current Systems», MSc Thesis, 2018. Accessed: Mar. 17, 2023.

[Online]. Available: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2558923>.

- [7] A. Giannakis and D. Peftitsis, «Electro-thermal Design of a Solid-State MVDC Circuit Breaker», in *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia)*, May 2019, pp. 1–8. doi: 10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8797031.
- [8] D. Keshavarzi, T. Ghanbari, and E. Farjah, «A Z-Source-Based Bidirectional DC Circuit Breaker With Fault Current Limitation and Interruption Capabilities», *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, n.º 9, pp. 6813–6822, set. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2624147.



## REDE ELÉTRICA DO DEPARTAMENTO DE FÍSICA

REIS, ANTONIO D. (1); ROCHA, JOSÉ F. (2); GAMEIRO, ATÍLIO S. (3)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [adreis@ubi.pt](mailto:adreis@ubi.pt)

(2) Universidade de Aveiro, E-mail: [frocha@ua.pt](mailto:frocha@ua.pt)

(3) Universidade de Aveiro, E-mail: [amg@ua.pt](mailto:amg@ua.pt)

### RESUMO

O estudo aprofundado de uma rede elétrica local, como é o caso da rede que serve o Departamento de Física da UBI, constitui um excelente caso de estudo para enquadrar um conjunto de conceitos fundamentais no ensino da Engenharia Eletrotécnica. Nomeadamente, permitindo que os alunos percebam a organização da rede de distribuição dentro e fora do departamento, o que inclui o ramal e Posto de Transformação (PT), assim como os restantes quadros de serviço e disjuntores. Destaca-se o papel e as diferentes topologias de transformadores e das fontes de alimentação. Desta forma, relacionam-se conceitos como, os diferentes tipos de fontes de produção, os níveis de tensões a que a energia é produzida, transportada e distribuída, cargas e o triângulo de potências resultante, padrões de qualidade da energia fornecida, ruídos e interferências eletromagnéticas, proteções, sensibilidades e os limites teóricos da corrente no corpo humano. Para além disso permite familiarizar os alunos com a representação polar de grandezas e relação entre tensões alternadas simples e compostas.

A rede elétrica do departamento é servida pelo PT, que está junto ao bar principal, constituído por 2 transformadores, cada um de 630 kVA. O segundo transformador só entra em ação se for necessário. O ramal da E-REDES é trifásico com 8,66kV por fase simples e sem neutro, que alimenta um transformador do tipo triângulo - estrela com saída trifásica de 230V por fase simples e com neutro. Assim as tensões de entrada por fase composta são de  $\sqrt{3} \cdot 8,66\text{kV} = 15\text{kV}$  e as de saída por fase composta são de  $\sqrt{3} \cdot 230\text{V} = 400\text{V}$ . Este PT serve os departamentos Serviços Académicos (1ª fase de construção), Comunicação e Parada (2ª fase), Têxtil (3ª fase), Física (4ª fase) e Química (5ª fase).

O estudo também revelou que, a melhoria da ligação à terra melhora a performance dos equipamentos laboratoriais. O objetivo deste trabalho é, portanto, complementar as matérias elétricas das aulas teóricas, com implementações práticas reais, de um departamento numa instituição.

**Palavras-chave:** Instalações elétricas, Transformadores, Sistemas e dispositivos de potência.

## ABSTRACT

The in-depth study of a local electrical network, such as the network that serves the Department of Physics at UBI, constitutes an excellent case study to frame a set of fundamental concepts in the teaching of Electrical Engineering. Namely, allowing students to understand the organization of the distribution network inside and outside the department, which includes the branch and Transformer Station (PT), as well as the remaining service panels and circuit breakers. The role and different topologies of transformers and power supplies are highlighted. In this way, are relate, concepts such as different types of production sources, voltage levels at which energy is produced, transported and distributed, loads and the resulting power triangle, quality standards of the energy supplied, noise, Electromagnetic interference, protections, sensitivities and the theoretical limits of current in the human body. Furthermore, it allows students to become familiar with the polar representation of quantities and the relationship between simple and compound alternating voltages.

The department's electrical network is served by the PT which is next to the main bar, consisting of 2 transformers, each one with 630 kVA. The second transformer only comes into action if necessary. The E-REDES branch is three-phase with 8.66kV per single phase and without neutral, which feeds a delta-star type transformer with three-phase output of 230V per single phase and with neutral. Thus, the input voltages per composite phase are  $\sqrt{3} \cdot 8.66\text{kV} = 15\text{kV}$  and the output voltages per composite phase are  $\sqrt{3} \cdot 230\text{V} = 400\text{V}$ . This PT serves the departments Academic Services (1st phase of construction), Communication and Shutdown (2nd phase), Textiles (3rd phase), Physics (4th phase) and Chemistry (5th phase).

The study also revealed that improving grounding improves the performance of laboratory equipment. The objective of this work is, therefore, to complement the electrical subjects of theoretical classes, with real practical implementations, in a department of an institution.

**Keywords:** Electrical installations, Transformers, Systems and power devices.



## 1. INTRODUÇÃO

A compreensão de matérias relacionadas com as instalações elétricas, nomeadamente na perceção de como a distribuição de eletricidade chega aos locais de consumo, em particular a edifícios de carácter não residencial, com as quais os alunos, por inerência, estão menos familiarizados, reveste-se de uma forte importância, no âmbito de disciplinas como Eletrónica, Análise de Circuitos e Sistemas de Energia Elétrica.

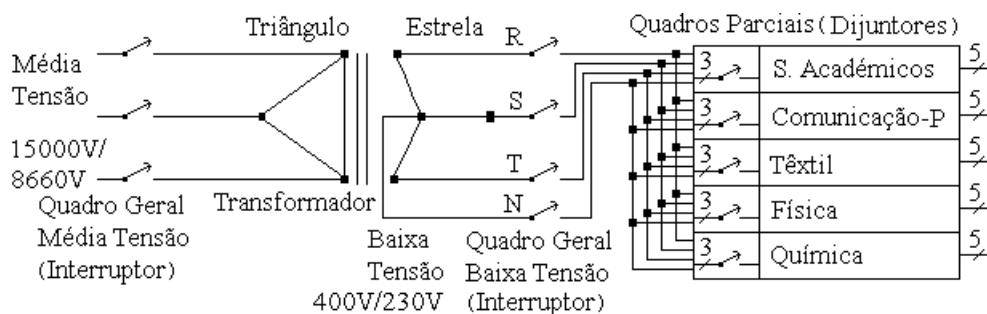
Este artigo técnico-científico apresenta, de forma simplificada, a rede elétrica do departamento de Física, que é servida pelo PT junto ao bar principal. Desta forma, o trabalho desenvolvido visa complementar as matérias teóricas, dando um exemplo significativo da realidade prática de uma instalação elétrica, aos alunos destas disciplinas. Visando assim facilitar a sua compreensão da organização e características da rede elétrica, ter contacto com conceitos subjacentes, muitas vezes mais abstratos ligados aos consumos de energia, distribuição e produção, aprofundar a terminologia técnica e a necessidade de saber aplicar leis e teoremas de cadeiras de base [1, 2, 3, 4, 5].

A tensão de fase, tensão simples (fase simples) e tensão fase-neutro são sinónimos, tal como tensão de linha, tensão composta (fase composta), tensão fase-fase, tensão interfases e tensão interlinhas. A tensão de linha  $T_l$  e de fase  $T_f$  relacionam-se pela fórmula  $T_l = \sqrt{3} \cdot T_f$ . Até 2003, os ramais elétricos de empresas eram trifásicos com tensões de linha de entrada  $3 \times 6000 \text{ V}$  para transformadores com tensões de linha de saída  $3 \times 380 \text{ V}$ . Depois, as tensões de linha de entrada passaram para  $3 \times 15000 \text{ V}$  para transformadores com tensões de linha de saída  $3 \times 400 \text{ V}$ . A tensão de linha internacional europeia foi fixada em  $240000 \text{ V}$ . Em Portugal a tensão passou de  $220\text{V}$  para  $230\text{V}$  e em Inglaterra de  $240\text{V}$  para  $230\text{V}$ .

Este PT tem um transformador triângulo - estrela. Ele recebe uma tensão trifásica de  $8660\text{V}$  por fase (simples) e sem neutro e fornece uma saída trifásica de  $230\text{V}$  por fase (simples) e com neutro.

As tensões de linha de entrada são  $\sqrt{3} \cdot 8660\text{V} \cong 15000\text{V}$  e as de saída são  $\sqrt{3} \cdot 230\text{V} = 400\text{V}$ . Ver a literatura [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

O PT tem 2 transformadores de  $630\text{KVA}$  em que só um está em serviço, o outro apenas entra em ação quando há picos de consumo (Figura 1).



**Figura 1 - Posto de transformação (PT), com o quadro principal e os parciais**

O quadro principal tem o quadro de média tensão com interruptor, o de baixa tensão com interruptor e 5 quadros parciais com disjuntores diferenciais para servir separadamente cada um dos 5 departamentos.

A terra de proteção é obtida junto ao PT e é reforçada em cada edifício, com varetas de aço cobreadas de 3 metros circundadas com carbono e enterradas. O neutro é a terra de serviço.

A seguir mostramos simplificada a distribuição da rede elétrica do PT pelos 5 departamentos.

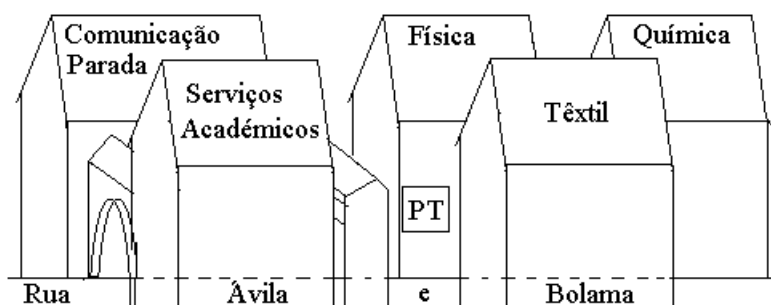
Depois mostramos a distribuição da rede elétrica do quadro de edifício pelos quadros de piso, que servem os quadros de corredor e quadros de laboratório. Estes distribuem a rede elétrica pela iluminação e tomadas. Por último, mostramos alguns testes, resultados e conclusões.

## 2. DISTRIBUIÇÃO DA REDE ELÉTRICA E ASPECTOS COMPLEMENTARES

Apresentamos a distribuição da rede elétrica pelos departamentos e em particular pelo de Física. Mostramos aspectos complementares.

### 2.1. Distribuição da rede elétrica do PT pelos vários departamentos

Do PT, para cada departamento saem 5 fios (fases R, S, T, neutro e terra), a terra é depois reforçada em cada departamento para assegurar uma boa terra. Este PT serve os Serviços Académicos (1ª fase de construção), Comunicação e Parada (2ª fase de construção), Têxtil (3ª fase de Construção), Física (4ª fase de construção) e a Química (5ª fase de construção).



**Figura 2 - Distribuição da rede elétrica do quadro principal do PT pelos 5 departamentos**

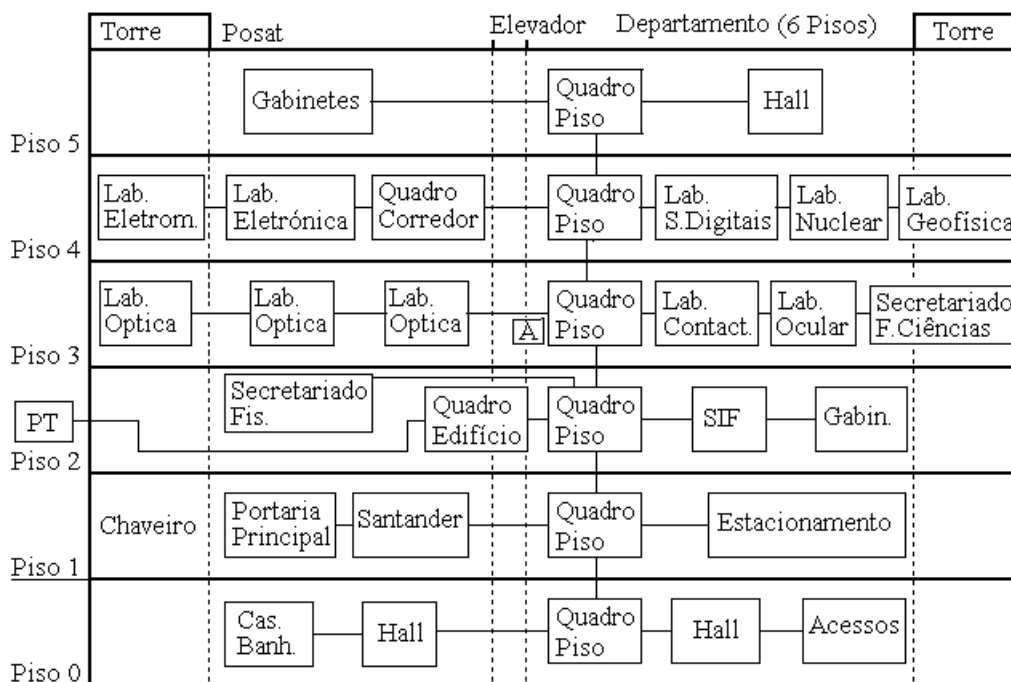
Cada departamento tem na entrada o quadro de edifício que depois distribui a rede elétrica pelos diversos pisos.

### 2.2. Distribuição da rede elétrica pelo departamento de Física

A rede elétrica do departamento serve 6 pisos: Piso 0 (Centro - óptica), Piso 1 (Portaria principal, Hall, Serviços e Estacionamento), Piso 2 (Secretariado, SIF e Gabinetes), Piso 3 (Labs óptica, passagem, lab. Contactologia, lab. Ocular e Secretariado da Faculdade de Ciências), Piso 4 (Lab. Eletromagnetismo, Lab Eletrónica e Lab S. Digitais, Lab. Nuclear, Lab. Geofísica), Piso 5 (Gabinetes e Hall).

O quadro de edifício tem disjuntores e distribui a rede elétrica pelos 6 quadros de piso. Estes têm disjuntores e distribuem a rede elétrica pelos quadros de corredor e quadros de laboratório. Os quadros de corredor distribuem a rede elétrica pelas lâmpadas e tomadas. Os quadros de laboratório têm disjuntores, servem as lâmpadas e distribuem as 3 fases equitativamente pelas bancadas.

Deve-se ter cuidado para não ligar bancadas com diferentes fases (R, S, T) ou (L1, L2, L3), umas contra as outras. Nesta situação, o choque seria duma tensão composta perigosa de 400V (Figura 3).



**Figura 3 - Distribuição da rede elétrica do quadro de edifício pelos 6 pisos do departamento de Física**

A resistência da terra de proteção é mais baixa no inverno quando a terra está húmida e tende a aumentar no verão quando a terra fica mais seca. A terra foi reforçada nos anos 1990.

### 2.3. Aspetos gerais, manutenções e certificações complementares

No quadro principal, na parte de baixa tensão, foram introduzidos condensadores de 60KVAR (reativos) por cada fase, para compensar o fator de potência de tendência indutiva.

As instalações industriais, como o departamento, devem ter uma resistência de terra inferior a 10Ω (antes era 20Ω). Nas instalações residenciais ela deve ser apenas inferior a 100Ω.

A Universidade deve enviar um relatório anual para a Direção Geral de Energia com as medições da resistência de terra no verão e inverno.

Os PTs devem ser limpos duas vezes por ano e deve ser medida a resistência de isolamento.

Os disjuntores diferenciais detetam e disparam quando há diferença significativa entre a corrente da fase e do neutro. As sensibilidades mais usadas são 300mA e 500mA e em locais húmidos (casas de banho) de 30 mA.

A manutenção, da UPS do departamento, deve ser feita de 5 em 5 anos para tratar as baterias. Também é conveniente verificar o estado dos tiristores de saída.

As baterias têm 3 parâmetros característicos que se verificam quando são novas: carga (ex. 40 AH), tensão (ex. 13.8 V) e corrente de arranque ou curto circuito (300 A). Quando ficam velhas, a tensão parece manter-se em aberto, mas não consegue armazenar carga e a corrente de arranque já não consegue arrancar o motor.

O alarme geral do departamento tem o quadro no 3º piso, atrás da porta do corredor, junto ao elevador. Tem um botão para o desligar.

### 3. CARACTERÍSTICAS, QUALIDADE E RADIAÇÕES DA REDE ELÉTRICA

Apresentamos os principais parâmetros característicos, métricas de qualidade e radiações da rede elétrica, em particular a da Física.

#### 3.1. Características das resistências de terra e tensão de ruído de terra

Nesta seção vamos falar da resistência de Terra (terra de proteção) RT, da resistência de Neutro (terra de serviço) RN, que é o ponto central do transformador e da tensão de ruído de terra/ massa TRT. Fazemos estas medidas com o terrômetro (ohmímetro sensível) e o osciloscópio [17].

A resistência da terra medida no Dep. de Física é  $8 \Omega$  e está abaixo do máximo aceite de  $20 \Omega$ . A resistência de neutro é  $6 \Omega$  e está abaixo do máximo aceite de  $10 \Omega$ . A tensão de ruído de terra é 1 mV.

#### 3.2. Qualidade da energia elétrica

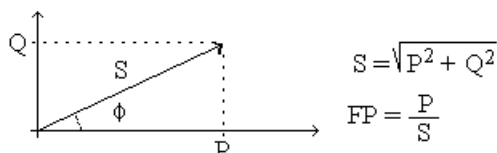
Alguns dos parâmetros mais importantes para quantificar a qualidade da energia elétrica são: Estabilidade da tensão, Estabilidade da frequência, Fator de potência, Quebras de tensão temporárias, Falhas de tensão por avarias e Percentagem de harmónicos [18].

i) A estabilidade de tensão do Dep. Física - UBI é tal que a sua flutuação não ultrapassa  $\pm 5\%$  do valor, ou seja está entre [220V, 240V]. O que fica abaixo dos máximos aceites de  $\pm 10\%$ , ou seja entre [210V, 250V].

ii) A estabilidade da frequência do Dep. Física-UBI é tal que a flutuação não ultrapassa  $\pm 0.05\text{Hz}$ , ou seja está entre [49.95Hz, 50.05Hz]. O que fica abaixo dos máximos aceites de  $\pm 0.1\text{Hz}$  ou seja entre [49.9Hz, 50.1Hz].

iii) O fator de potência deve estar entre [0.9, 1]. Os transformadores estão providos de condensadores para aumentar o fator de potência e minimizar o efeito habitual introduzido pelas bobines. Assim, o fator de potência é mantido em cerca de  $FP = \cos \Phi = P / S = 0.96$ .

A potência ativa (útil) P, a reativa Q e a aparente S relacionam-se por  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ . O fator de potência é dado por  $FP = P / S$ , o seu valor é 1 quando a potência reativa é nula (Figura 4).



**Figura 4 – Relação entre potências ativa P, reativa Q e aparente S**

Os contadores residenciais medem a potência ativa consumida, mas os industriais reagem à potência ativa e reativa. Assim, é necessário aumentar o FP. A potência reativa não produz trabalho, apenas anda na linha para cá e para lá, entre a fonte e a carga.

As unidades da potência ativa é o Watt (W), da reativa é o Volt-Ampere reativo (Var) e da aparente (total) é o volt-Ampere (VA).

iv) As quebras de tensão temporárias que as comercializadoras (EDP, Iberdrola, Galp) e distribuidora E-Redes fazem, são devido a intempéries ou outros motivos. Os serviços de média tensão são feitos em anel, para introduzir redundância na falha de um dos lados. A baixa tensão, normalmente não tem anel, pois ficaria dispendioso. O Dep. de Física tem cerca de 4 quebras por ano, ou seja abaixo das 10 aceites.

v) As falhas de tensão local por avaria, transformador ou outro dispositivo, são poucas. Ocorrem também cerca de 4 por ano, ainda assim abaixo das 10 aceites. Os transformadores são servidos em anel.

vi) A percentagem de harmónicas múltiplas tem a ver com a quantidade de frequências múltiplas da fundamental, que é 50 Hz. Normalmente, as mais problemáticas são a de 3ª, 5ª e 7ª ordem. A percentagem de harmónicas no Departamento de Física não ultrapassa os 5%. O máximo aceite é 10%. Os harmónicos múltiplos são devido a cargas não lineares e a faíscas de descarga. Para minimizar estes harmónicos múltiplos são usados filtros de elevada ordem. Pois, a 3ª harmónica de 150Hz é baixa e está próxima da fundamental.

Para realizarmos estas medidas usámos o Analisador de Rede Elétrica Chovan. Pretende-se adquirir novo software, de Analisadores de Qualidade de Energia, com passagem de dados para o computador.

### 3.3. Radiações, interferências e faíscas

As lâmpadas fluorescentes, por exemplo, quando ligam e desligam emitem radiações eletromagnéticas e interferem nos equipamentos radioelétricos. Os automáticos de escadas quando ligam e desligam causam faíscas. É preciso usar filtros, com condensador em paralelo ou bobine (ferrite) em série, nesses componentes.

## 4. CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES E TIPOS DE TRANSFORMADORES

Apresentamos a classificação das tensões e os tipos de transformadores trifásicos.

### 4.1. Classificação dos níveis de tensões elétricas

As tensões elétricas podem ser classificadas de acordo com os seus valores. Assim, de modo simplificado, temos a muito alta tensão, alta tensão, média tensão e baixa tensão (Tabela 1) [19].

**Tabela 1 - Classificação dos níveis de tensões elétricas**

Classificação	Nível de Tensão
Muito Alta Tensão	Maior que 300000 V
Alta Tensão	Entre [50000 V - 300000 V ]
Média Tensão	Entre [1000 V - 50000 V ]
Baixa Tensão	Entre [0 V - 1000 V ]

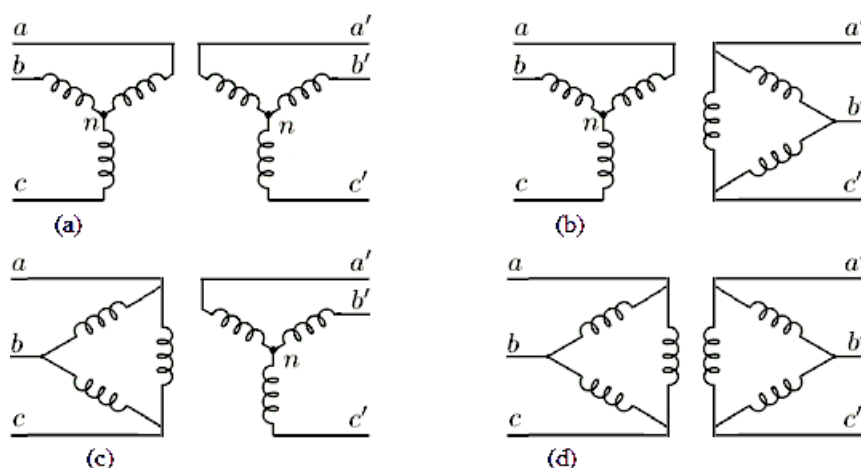
Há autores, mais minuciosos, que descortinam a Extra Baixa Tensão (abaixo de 50V), Muito Alta Tensão (300000V-500000V), Extra Alta Tensão (500000V - 750000V) e a Ultra Alta Tensão (acima de 750000V).

Há linhas de transporte de energia a 900000V, como é o caso da barragem de Itaipu no rio Paraná, um afluente do rio Prata, na fronteira de 2 países: Brasil e Paraguai.

Estes níveis na classificação das tensões, baixa, média e alta ainda variam ligeiramente, entre alguns países.

#### 4.2. Tipos de transformadores trifásicos

O transformador trifásico, do PT, podia ser um dos seguintes tipos: estrela- estrela (a), estrela- triângulo (b), triângulo- estrela (c) e triângulo- triângulo (d). A Figura 5, seguinte, mostra os 4 tipos (a, b, c, d):



**Figura 5 - Tipos de transformadores trifásicos: primário - secundário**

O PT escolhido, junto ao bar principal, é do tipo triângulo - estrela. Ele recebe um ramal triângulo de 3 fases simples 3 x (8660 V) e o secundário fornece as 3 fases simples R, S, T (230V) e neutro N.

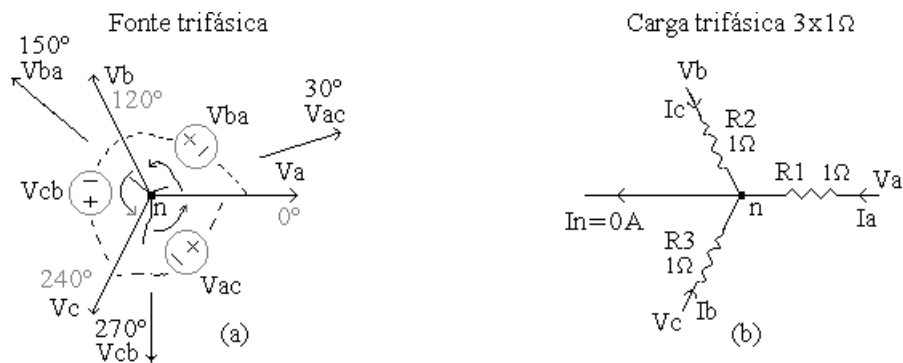
#### 5. TENSÃO DE FASE (SIMPLES) E TENSÃO DE LINHA (COMPOSTA)

Para falar com precisão, e não no ar, sobre sistemas trifásicos é preciso esclarecer os conceitos de tensão de fase (fase - neutro) e de tensão de linha (fase - fase). A tensão de fase é também chamada tensão simples e a tensão de linha é também chamada tensão composta.

A tensão é uma diferença de potencial entre dois pontos, e nem sempre um dos pontos é a terra ou o neutro.

Mostramos o sistema trifásico com tensão de linha / fase de 400V / 230V. Consideremos a representação negativa (sentido anti-horário).

Mapeamos primeiro as tensões de fase  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ , começamos por  $V_a$  com  $0^\circ$ , depois  $V_b$  com  $120^\circ$  e depois  $V_c$  com  $240^\circ$ . Calculamos depois as respectivas tensões de linha  $V_{ac}$ ,  $V_{ba}$ ,  $V_{cb}$ . Verificamos que a tensão de linha tem uma fase que está  $30^\circ$  avançada em relação à tensão de fase mais próxima (Figura 6).



**Figura 6 - Fonte trifásica de tensões de fase (setas curtas) e de tensões de linha (setas longas) e carga trifásica de 3 x 1Ω**

Tensões de fase (simples):

$$V_a = V_m \angle 0^\circ = V_m e^{j0} = V_m (\cos 0 + j \sin 0) = V_m (1 + j0)$$

$$V_b = V_m \angle 120^\circ = V_m e^{j120} = V_m (\cos 120 + j \sin 120) = V_m (-0.5 + j0.87)$$

$$V_c = V_m \angle 240^\circ = V_m e^{j240} = V_m (\cos 240 + j \sin 240) = V_m (-0.5 - j0.87)$$

Calculemos as correspondentes tensões de linha (compostas):

$$V_{ac} = V_a - V_c = V_m \angle 0^\circ - V_m \angle 240^\circ = V_m (1 + 0.5 + j0.87) = \sqrt{1.5^2 + 0.87^2} V_m = \sqrt{3} V_m \angle 30^\circ$$

$$V_{ba} = V_b - V_a = V_m \angle 120^\circ - V_m \angle 0^\circ = V_m (-0.5 + j0.87 - 1) = \sqrt{1.5^2 + 0.87^2} V_m = \sqrt{3} V_m \angle 150^\circ$$

$$V_{cb} = V_c - V_b = V_m \angle 240^\circ - V_m \angle 120^\circ = V_m (-0.5 - j0.87 + 0.5 - j0.87) = \sqrt{0^2 + 1.74^2} V_m = \sqrt{3} V_m \angle 270^\circ$$

A tensão é fornecida sob forma polifásica para garantir uma corrente de neutro nula ou lá próximo. Com uma tensão monofásica isso não é possível. Optou-se por trifásica por ter poucas fases e já ter boa estabilidade.

A título de exemplo, veja-se que a tensão trifásica  $T(V_a, V_b, V_c)$  aplicada sobre a carga trifásica normalizada de  $3 \times 1\Omega$  tem corrente de neutro nula. Logo ligar ou não ligar o neutro é indiferente.

$$I_n = V_a/1 + V_b/1 + V_c/1 = V_m (1 + 0)/1 + V_m (-0.5 + j0.87)/1 + V_m (-0.5 - j0.87) = 0 \text{ A.}$$

## 6. TENSÕES PADRÃO E PARQUES FORNECEDORES DE ENERGIA

Apresentamos as tensões padrão em baixa tensão média tensão e alta tensão. Abordamos também os parques de energia.

### 6.1. Tensões padrão disponibilizadas pela E-Redes (ou outras operadoras)

A energia é gerada na gama (6 - 25 KV) e transportada em até 1 milhão de Volts. Depois é distribuída em alta tensão (60KV), média tensão (6KV (abandonada), 10KV, 15KV, 30KV) e baixa tensão (400V /230V). Os 60KV estão quase na fronteira entre transporte e distribuição.

A E-REDES, antes EDP, Eletricidade de Portugal, Energias de Portugal, a REN (Redes Energéticas Nacionais) e a reguladora ERSE (Entidade Reguladora Serviços Energéticos) disponibilizam os padrões de tensão:

Distribuição:

1. Baixa Tensão

a) Clientes residenciais

Linha/ fase: 400V / 230V

b) Clientes especiais (potência > 41.4 KVA)

Linha/ fase: 400V / 230V

2. Média Tensão

Linha: 6 KV (descontinuada e convertida em 15KV)

10 KV

15 KV (distribuição local)

30 KV (distribuição regional)

2. Alta Tensão

Linha: 60 KV (empresas de potência instalada > 10 MVA)

A Rede de Distribuição Elétrica do Operador da Rede de Distribuição (por exemplo E-REDES) fornece diversos padrões de potência.

Transporte:

A E-Redes para seu transporte próprio tem linhas de alta tensão de 60000V, 115000V, 150000V, 220000V e a última 400000V. A tensão de linha internacional Europeia é de 240000V.

Outras considerações:

Há outras tensões relevantes que é necessário ter em atenção. As linhas dos comboios têm tensões de linha de 25000V ( $\sqrt{3} \cdot 15000V$ ).

## **6.2. Parques de geração de energia elétrica (eólica, solar, etc.)**

As principais fontes de energia elétrica são: a central nuclear, hidroelétrica, termoelétrica, de biomassa, parques eólico e solar.

Num parque eólico, a energia é produzida em AC (média tensão) com uma frequência muito irregular, fruto da intermitência do vento. Então é convertida (retificada pelos inversores) em DC. Depois é novamente convertida para AC, mas com uma frequência regular de 50 Hz, que é sincronizada com a rede. Esta tensão AC de média tensão, através dum transformador, é convertida em alta tensão. Sendo que a mesma, é normalmente transportada na tensão de fronteira entre transporte e distribuição ou seja 60KV.

Num parque solar a energia é produzida em DC. Depois, segue um processo semelhante à eólica e transportada normalmente a 60kV.

A energia eólica e solar passam por tensões DC e depois são convertidas em AC 50Hz.

A natureza dos geradores eólicos e solares não providenciam inércia ao sistema, para assim contribuir para a estabilidade necessária da frequência (50Hz). O contrário ocorria com as fontes de energia elétrica convencionais, como são os casos da hidroelétrica e da térmica, que por inerência, têm inércia rotativa. No entanto, através dos inversores, é possível estabelecer uma espécie de inércia virtual. Assim, operando num ponto abaixo do de máxima potência, com margem de ajuste em ambos os sentidos, pode-se afinar o nível de potência e corrigir um eventual desvio de frequência. Pois aumentando a potência fornecida sobe a frequência e vice-versa [20].



## 7. EFEITOS DA TENSÃO E DA CORRENTE ELÉTRICA NO CORPO HUMANO

Os efeitos da corrente elétrica, no corpo humano, dependem da sua intensidade. Uma corrente muito fraca não se sente, se for fraca causa apenas formigamentos, mas se for forte pode causar a morte.

Quando há uma diferença de potencial, entre dois pontos do corpo humano, flui uma corrente elétrica entre eles. A intensidade da corrente depende da diferença de potencial aplicada e da resistência do corpo humano. A resistência da pele seca é de cerca de 100k $\Omega$ , com a pele molhada ela cai para 1k $\Omega$ . Por isso, um choque com a pele molhada é muito mais violento do que com a pele seca.

A tabela 2 seguinte mostra a intensidade da corrente no corpo humano e os danos causados: [21]

**Tabela 2 - Efeitos da corrente elétrica no corpo humano**

Intensidade da corrente	Danos causados
Menor que 1 mA	Não se sente
Cerca de 1 mA	Causa formigamentos
Cerca de 10 mA	Os músculos contraem-se, dificulta ação
Cerca de 20 mA	Tornam a respiração difícil
Cerca de 80 mA	Causam asfixia respiratória (pode causar morte)
Cerca de 100 mA	Coração descontrolado - fibrilação (morte rápida)
Cerca de 200 mA	Paralisação do coração (morte mais lenta)
Mais de 200 mA	Desmaios e graves queimaduras (morte)

Quando se executam trabalhos elétricos de tensão elevada, deve-se manter a pele seca, usar luvas e sapatos de borracha. Se possível desligar o interruptor de proteção.

## 8. TESTES E RESULTADOS

Apresentamos seguidamente alguns testes experimentais e resultados.

### 8.1. Metodologias e Testes

As metodologias usadas para elaborar estes projetos usam a observação e a experiência de testes residenciais e institucionais anteriores. Os engenheiros e técnicos da energia elétrica utilizam a teoria, a experiência prática e o domínio dos utensílios de mercado, para realizarem estas tarefas. Depois, são seguidos os procedimentos fundamentais.

A rede elétrica da Física começou por ter um só transformador trifásico com tensões de linha de entrada de 3x6000V e de saída 3x380V, que suportava pequenas variações de carga. Depois passou para tensões de linha de entrada de 3x15000V e de saída 3x400V. Também para aumentar a eficiência em repouso, baixa carga e alta carga são usados 2 transformadores, em que um é usado em repouso e baixas cargas e o outro entra em paralelo em altas cargas.

Com a introdução de varetas melhores, a resistência de terra (terra de proteção) baixou para 8 $\Omega$ . Com os novos transformadores de 15000V x 400V a resistência de neutro (terra de serviço) baixou para 6 $\Omega$ . A tensão de ruído de terra/ massa baixou para cerca de 1 mV.

A qualidade da energia melhorou com a evolução da rede e com a introdução de filtros internos. A estabilidade da tensão está assegurada com uma flutuação inferior a 5%. A estabilidade da frequência está assegurada com flutuação inferior a 0.05 Hz. O Fator de potência de 0.96 está próximo do ideal. A percentagem de harmônicas não ultrapassa os 5%. Contudo é mais pronunciada na 5ª e 7ª harmônica. O mesmo é ilustrado nas medições experimentais da Figura 7.



**Figura 7 - Medições: Tensões trifásicas instantâneas fase- neutro, Frequência instantânea e Percentagem de harmônicas nas 3 fases (PAC 4200)**

Os dispositivos radiadores eletromagnéticos e causadores de faíscas têm filtros para minimizar os efeitos.

Os testes e o desempenho mostram que, a rede elétrica do Departamento de Física é robusta, segura e confiável.

## 8.2. Resultados e Discussão

O PT, junto ao bar principal, tem que ter uma potência capaz de abastecer os 5 departamentos. Ele tem 2 transformadores de 630KVA cada, apenas um está em serviço, o outro só entra em paralelo se for necessário.

O quadro principal tem um interruptor para corte total da alta tensão e outro da baixa tensão. Os 5 quadros parciais têm disjuntores diferenciais para desligar individualmente cada departamento.

O processo de abastecimento está sectorizado para que, quando há uma avaria, apenas a área afetada é desligada.

A substituição dos transformadores de tensão de linha de entrada / saída de 6000 V / 380 V pelos de 15000 V / 400 V diminui as perdas e conseqüentemente aumenta a eficiência do transporte.

A resistência de terra com  $8\Omega$  está abaixo do máximo permitido de  $20\Omega$  e a de neutro com  $6\Omega$  também está abaixo do máximo aceite de  $10\Omega$ .

A qualidade da energia melhorou com o progresso de computadorização da rede e com a aplicação de filtros internos.

A disciplina 'Sistemas de Potência' da Licenciatura é útil no dimensionamento dos transformadores (óleo ou seco) e dos dispositivos elétricos e luminosos a distribuir pelos departamentos.

## 9. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O PT da Física tem um transformador trifásico de 630KVA para servir os 5 departamentos. Há outro transformador adicional também de 630KVA que entra em paralelo se for necessário.

O quadro principal tem um quadro geral com um interruptor total para a média tensão e outro para a baixa tensão. Os quadros parciais têm disjuntores para desligar individualmente cada departamento.

Em cada edifício há o quadro de edifício com interruptor de corte total e disjuntores para cada piso.

Em cada piso há o quadro de piso com interruptor de corte total e disjuntores para o quadro de corredor e de laboratório.

O quadro de corredor distribui a rede elétrica pelas lâmpadas e tomadas.

O quadro de laboratório distribui a rede elétrica pelas lâmpadas e as 3 fases são distribuídas equitativamente pelas bancadas, para minimizar a corrente de neutro.

A rede elétrica deve ser sectorizada, para que numa avaria, apenas seja desligada a parte afetada.

As cargas trifásicas devem ser equilibradas para que a corrente de neutro seja baixa ou nula.

O reforço da linha de Terra melhorou bastante o desempenho do equipamento de laboratório.

A qualidade da energia melhorou com evolução da rede e com a inserção de filtros internos

Para que os transformadores e componentes auxiliares funcionem bem, é necessário fazer a sua manutenção periódica.

Os efeitos da tensão de choque no corpo humano dependem da secura da pele, com pele molhada o choque é muito mais violento.

Desta forma, a análise da rede elétrica do departamento, constitui um importante caso de estudo para os estudantes de Eletrotécnica, permitindo aplicar um conjunto de conceitos fundamentais e a familiarização com grandezas e terminologias, que de outro modo não passariam de conceitos abstratos.

A melhoria contínua da rede de distribuição, com uma monitorização periódica de métricas fundamentais, como são o caso do fator de potência e dos harmónicos e a possibilidade de usar fontes locais de autoconsumo e limpas, devem ser o alvo de trabalho futuro.

### **AGRADECIMENTOS**

O nosso agradecimento aos Serviços Técnicos da UBI. Particularmente ao Eng. Garcia Mendes, Eng. Tendeiro, Eng. Cruz, Eng. Fernando Santos, Eng. Vitor e Sr. Calmão. Ao Prof. José Pacheco, Prof. João Costa, Eng. Rui Barata e aos Revisores que ajudaram a melhorar o artigo.

### **REFERÊNCIAS**

[1] A. D. Reis, E. E. Pacheco, J. P. Pacheco, A. S. Lebres, Rui Barata, J. F. Rocha, A. S. Gameiro, "Measurements of Magnetic Fields with Interest on Human Health". Proceedings: 7<sup>th</sup> International Congress on Engineering at UBI (for Economic Development) – ICEUBI 2013, ppi 95-99 CT27-29.5 (5 Pages), Covilhã – PT, 27-29 November 2013.

- [2] António D. Reis, José F. Rocha, Afílio S. Gameiro, José P. Carvalho, J. P. Costa, R. Barata, F. Velez, "Luzímetro Digital de Medida em Percentagem de Gama 0-99% e Resolução 1%", Proc.: 7º Ciclo de Conferências da Faculdade de Ciências - Escola e Universidade, Univ. da Beira Interior, pp.34-35, Covilhã, Portugal, 24-25 Set. 2021.
- [3] R. Duit and C. Von Rhoneck, "Learning and Understanding Key Concepts of Electricity". Connecting Research in Physics Education with Teacher Education, 1, 1-6, 1997.
- [4] D. E. Saputro, S. Sarwanto, S. Sukarmin and D. Ratnasari, "Students' Conceptions Analysis on Several Electricity Concepts". In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1013, No. 1, p. 012043). IOP Publishing, May 2018.
- [5] Jose V. C. Matias, "Electricidade e Electrónica", 1ª Edição, Ensino Profissional, Editor: Didática Editora, 2009.
- [6] Domingos Leite Lima Filho, "Projecto de Instalações Eléctricas Prediais", Editor: Érica, Abril 2004.
- [7] Milton Pinto, "Energia Eléctrica - Geração, Transmissão e Sistemas Interligados", Editora: LTC, Novembro 2013.
- [8] Julio Niskier e A. J. Macintyre, "Instalações Eléctricas", Editora: LTC - Livros Técnicos e Científicos, Outubro 2013.
- [9] José Vieira Marques, "Electricista Prático", Editor: Chiado Books, Setembro 2015.
- [10] Julio Niskier, "Manual de Instalações Eléctricas", Editora: LTC, Outubro 2015.
- [11] Frank Lamb, "Automação Industrial - na Prática", 1ª Ed., Editora: McGraw-Hill, 2015.
- [12] Amaury Pessoa Gebran e Flávio Adalberto P. Rizzoto, "Instalações Eléctricas Prediais", Editora: Bookman, Outubro 2016.
- [13] Joao Mamede Filho, "Instalações Eléctricas Industriais", 9ª Edição, Editora: LTC, 2017.
- [14] Vitor Cancela Meireles, "Circuitos Eléctricos", 5ª Edição, Editora: Lidel, Fevereiro 2019.
- [15] J. Norberto Pires, "Automação e Controlo Industrial", Editora: Lidel, 2019.
- [16] J. R. Caldas Pinto, "Tecnologias de Automação na Indústria", Editora: Lidel, 2021.
- [17] Terra de proteção e serviço <https://www.mundodaeletrica.com.br/terometro-o-que-e-como-funciona/>.
- [18] Manual da Qualidade da Energia, EDP, <https://pt.scribd.com/document/399275741/Manual-Qualidade-Edp>
- [19] Tensões ao redor do mundo, <https://alugagera.com.br/noticias/tensao-frequencia-tomada-mundo>.
- [20] W. J. Farmer and A. J. Rix, "Optimising Power System Frequency Stability Using Virtual Inertia from Inverter-based Renewable Energy Generation", IET Renewable Power Generation, 14: 2820-2829, 2020.
- [21] Efeitos da electricidade no corpo humano, [http://www.lcvdata.com/arduino/Efeitos\\_Eletricidade\\_Corpo\\_Humano.pdf](http://www.lcvdata.com/arduino/Efeitos_Eletricidade_Corpo_Humano.pdf).



## CIRCUITO DE FONTE DE ALIMENTAÇÃO SIMÉTRICA

BRITO, FABIO (1); BARATA, RUI (2); REIS, ANTONIO D. (3)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [fabio.brito@ubi.pt](mailto:fabio.brito@ubi.pt)

(2) Universidade de Aveiro, E-mail: [rbarata@ubi.pt](mailto:rbarata@ubi.pt)

(3) Universidade da Beira Interior, E-mail: [adreis@ubi.pt](mailto:adreis@ubi.pt)

### RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo projetar, dimensionar e testar um circuito eletrónico de uma fonte de alimentação simétrica. Em circuitos eletrónicos muitas vezes é necessário fornecer valores de tensões positivas e negativas para que determinados componentes eletrónicos possam operar, nomeadamente amplificadores operacionais, amplamente usados em eletrónica. Em projetos de placas de circuitos impressos que necessitem de usar amplificadores operacionais, a implementação de uma fonte de alimentação simétrica garante que a tensão aplicada aos terminais dos amplificadores operacionais é a necessária, com o respetivo valor de tensão negativo. O método adotado consistiu na utilização de reguladores de tensão adequados e na técnica denominada "terra virtual" para a obtenção do valor de tensão negativo. Em função da tensão requerida aos terminais de saída da fonte de alimentação simétrica e do valor de tensão que a alimenta, foi projetado, dimensionado e testado em MULTISIM um circuito eletrónico, posteriormente foi implementado em software de desenho de placas de circuito impresso (PCB) e testado num PCB que incorpora diversos componentes, entre eles os amplificadores operacionais. Os resultados obtidos permitem verificar que em sistemas embutidos ou sistemas de maior complexidade, a implementação de uma fonte de alimentação simétrica consiste numa etapa importante para o correto funcionamento de certos componentes.

**Palavras-chave:** Fonte de Alimentação Simétrica, Placa de Circuito Impresso, Amplificador Operacional.

## **ABSTRACT**

*The present work aims to design, size and test an electronic circuit for a symmetrical power supply. In electronic circuits it is often necessary to provide positive and negative voltage values so that certain electronic components can operate, namely operational amplifiers, widely used in electronics. In printed circuit board designs that require the use of operational amplifiers, the implementation of a symmetrical power supply ensures that the voltage applied to the terminals of the operational amplifiers is that required, with the respective negative voltage value. The method adopted consisted of using suitable voltage regulators and the technique called "virtual ground" to obtain the negative voltage value. Depending on the voltage required at the output terminals of the symmetrical power supply and the voltage value that supplies it, an electronic circuit was designed, dimensioned and tested in MULTISIM, which was later implemented in printed circuit board (PCB) design software and tested on a PCB that incorporates several components, including operational amplifiers. The results obtained allow us to verify that in embedded systems or systems of greater complexity, the implementation of a symmetrical power supply is an important step for the correct functioning of certain components.*

**Keywords:** Symmetrical Power Supply, Printed Circuit Board, Operational Amplifier.

## 1 INTRODUÇÃO

No âmbito dos dispositivos eletrônicos presentes na sociedade, existem diversos componentes eletrônicos a operar em diversos níveis de tensão. Em eletrônica de sinal, os valores de tensão são muito pequenos, em dispositivos com capacidade de muito baixo consumo energético, os níveis de tensão podem ser praticamente desconsiderados. Durante o normal funcionamento dos dispositivos, uma fonte de alimentação garante o fornecimento de uma corrente contínua, ao nível de tensão admitido pelo respectivo componente, podendo no mesmo dispositivo serem projetos diversos circuitos e componentes, cujas necessidades de tensão de alimentação sejam diferentes. No entanto, existem certos componentes, como é o caso dos amplificadores operacionais, amplamente utilizados em projetos tão diversificados, tais como a eletrônica industrial, médica, automóvel ou certos casos específicos [1], que para operar de modo correto, necessitam de obter da fonte de alimentação valores de tensão simétricos, isto é, uma tensão positiva, normalmente designada por VDD, e outra tensão negativa, normalmente designada por VSS, certos fabricantes colocam como VCC+ para a tensão positiva e VCC- para a tensão negativa, e independentemente da gama de utilização do amplificador operacional, que pode ser desde precisão, potência, alta velocidade, áudio ou uma utilização geral [2] ele apenas atua quando existe uma diferença de potencial aos seus terminais. No sentido de providenciar esses valores de tensão, pode-se recorrer a várias técnicas de design. No trabalho desenvolvido, após a análise do circuito e das necessidades do projeto, procurou-se desenvolver uma fonte de alimentação simétrica a partir de apenas uma fonte de alimentação. Tipicamente, encontram-se na literatura, diversas formas de alimentar AMPOPs ligando a alimentação negativa ao *ground*, não tendo em consideração o valor de tensão negativa necessário descrito no *datasheet* do componente. Nas características elétricas dos *datasheets* é possível observar o valor de tensão a colocar para o componente operar, neste trabalho o AMPOP que se pretende utilizar é o TL062 da "Texas Instruments" que admite uma tensão de +6 V e -6 V aos seus terminais [3]. O projeto da fonte de alimentação simétrica foi efetuado com recurso a dois reguladores de tensão, o LM317 para fornecer uma tensão positiva e o regulador de tensão LM337 no lado da tensão negativa [4] tendo como alimentação uma fonte de tensão de 15 V.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Simulação em MULTISIM

O projeto do circuito da fonte de alimentação simétrica, teve que ter em linha de conta os demais sub circuitos existentes no projeto em que se insere. Já anteriormente foi mencionado que a fonte de alimentação do dispositivo são 15 V, valor esse que serve de referência para dimensionar o circuito. Foi efetuada uma simulação do comportamento do circuito no software na National Instruments, MULTISIM, tendo sido utilizada a técnica designada por “terra virtual” com recurso a um divisor de tensão. A Figura 1 ilustra a simulação efetuada:

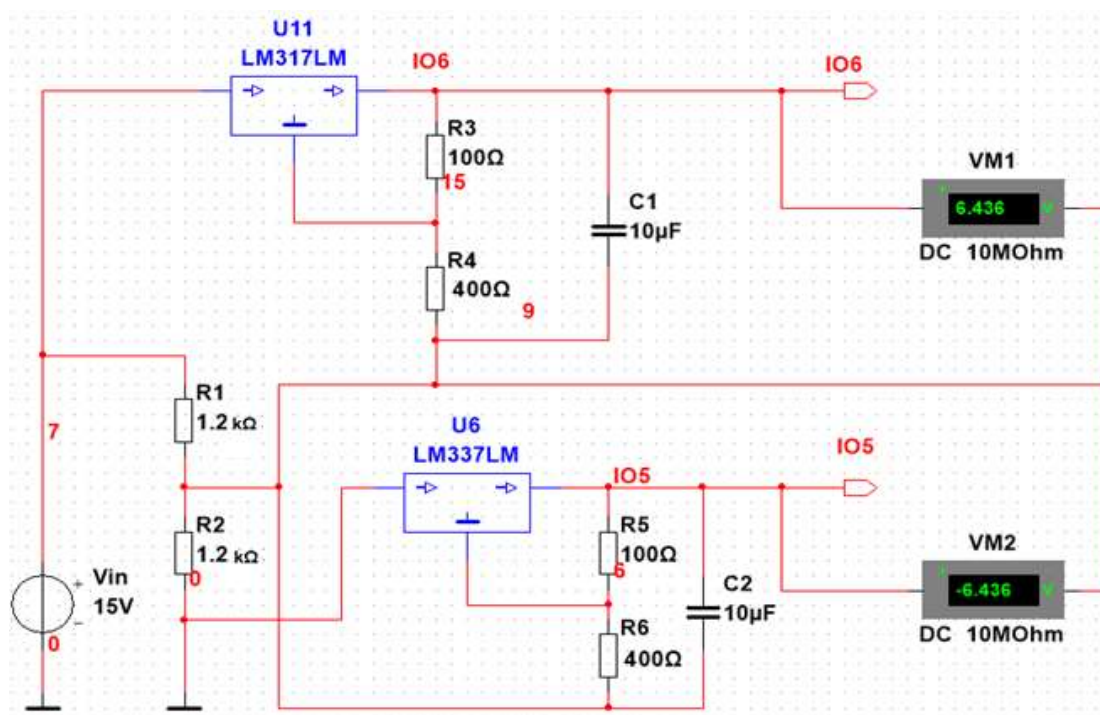


Figura 1 - Simulação em Multisim da fonte de alimentação simétrica, a partir duma fonte contínua.

O valor de tensão à saída do divisor de tensão é de 7,5 V e constitui o valor da terra virtual que é onde se permite obter uma diferença de potencial simétrica, capaz de alimentar o amplificador operacional. De salientar que o circuito da Figura 1 pode ser implementado para o design de uma fonte de alimentação de corrente contínua, capaz de fornecer valores de tensão negativos, ao efetuar a ligação do terminal negativo ao divisor de tensão.

Desenvolveu-se outra solução para uma fonte de alimentação simétrica, tendo como alimentação dois valores de tensão, um positivo e outro negativo. Dimensionaram-se os componentes do circuito de modo a obter um valor simétrico de +5 V e -5 V à saída, no entanto, com a colocação de um potenciômetro, é possível obter um ajuste ao valor da tensão de saída [4]. Na Figura 2 é possível observar o circuito em ambiente de simulação computacional:



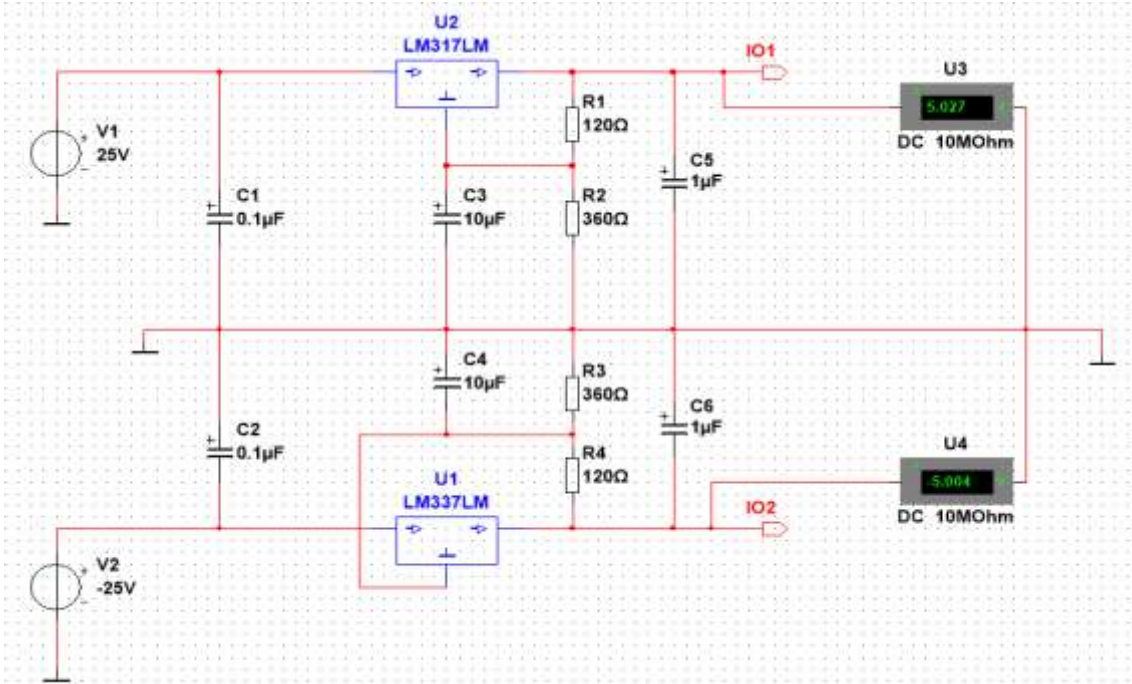


Figura 2 - Fonte de alimentação regulada simétrica fixa, a partir de duas fontes contínuas distintas.

Ao substituir R2 e R3 por potenciômetros de  $2k\ \Omega$  é possível fazer ajustes de tensão e obter uma gama de valores de tensão entre 1,2 V e 20 V para valores de tensão positivos, e -1,2 V e -20 V para valores de tensão negativos. A Figura 3 ilustra a simulação efetuada:

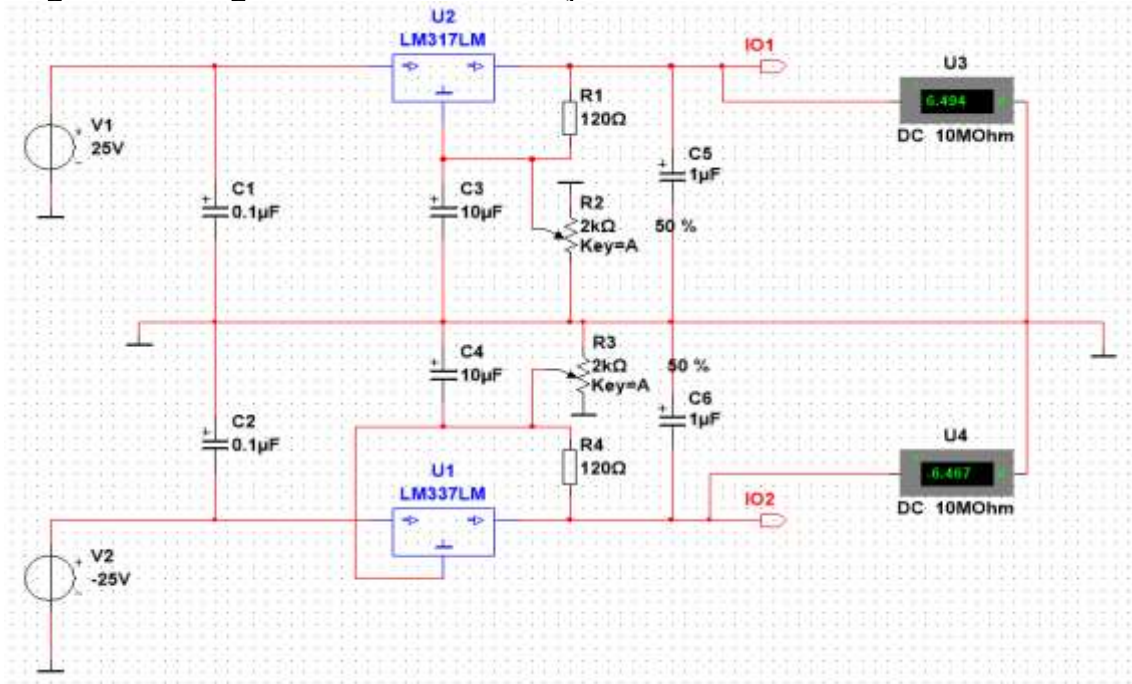


Figura 3 - Fonte de alimentação simétrica regulada ajustável [4].

Com este circuito é possível escalar o circuito e dimensionar fontes de alimentação que vão de encontro às diferentes necessidades dos projetos eletrônicos.

## 2.2 Projeto eletrônico

O seguinte passo consistiu em efetuar o esquemático do circuito em um software de automação, optou-se pelo software online EasyEDA [5] pela sua grande variedade de *footprints* dos mais diversos componentes, bem como o acesso a um universo de componentes eletrônicos e os seus respectivos datasheets. A Figura 4 ilustra o esquemático do projeto em que a fonte de alimentação se insere:

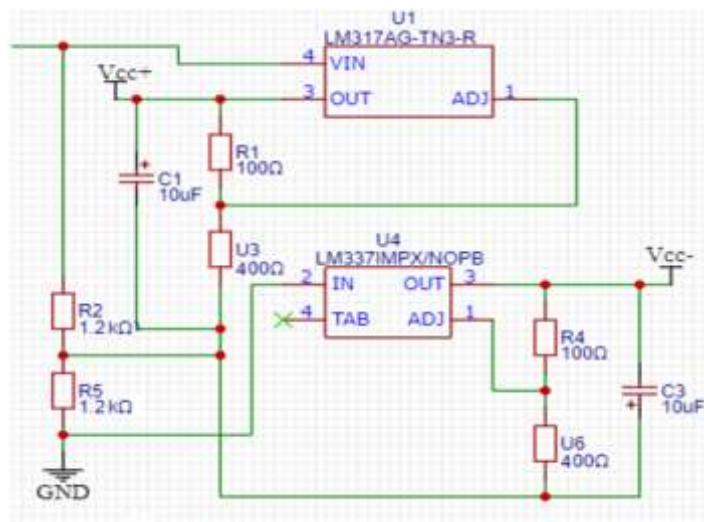


Figura 4 - Esquemático da fonte de alimentação simétrica regulada fixa.

O circuito está dimensionado para que seja possível obter +6 V em Vcc+ e -6 V em Vcc-.

Na conversão do esquemático para a placa de circuitos impressos, com o acrônimo anglo-saxônico PCB, para *printed circuit board*, as ligações entre os diferentes componentes foram efetuadas com recurso a três camadas distintas, num total de quatro camadas disponíveis, tendo a quarta camada sido utilizada unicamente para as ligações ao *ground*. Na Figura 5 é possível observar as ligações na camada superior do PCB a vermelho:

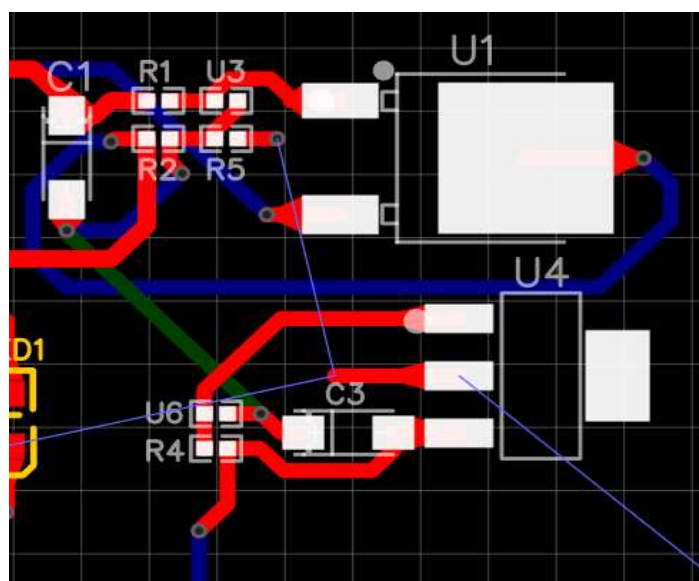
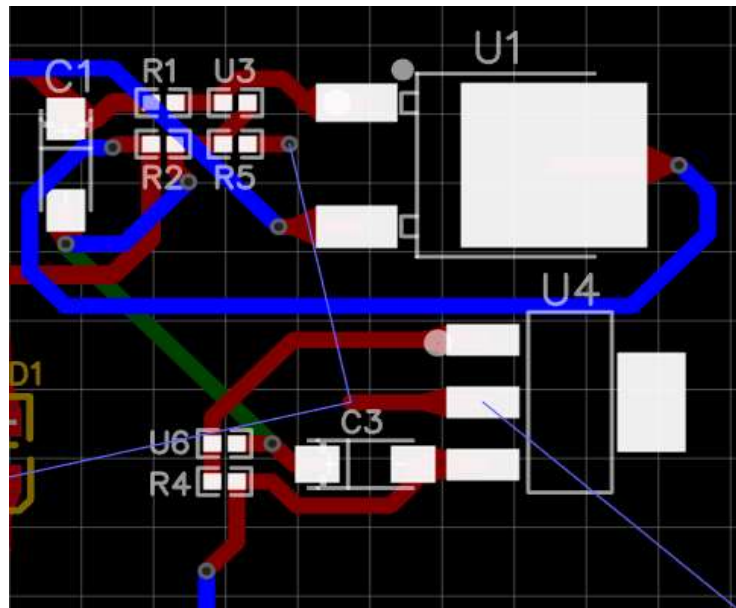


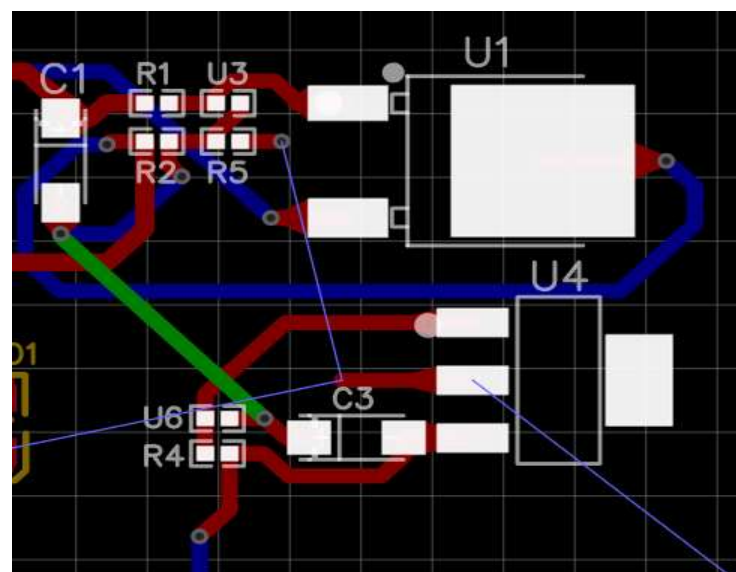
Figura 5 - Camada superior do PCB.

A Figura 6 ilustra as ligações entre componentes efetuadas na camada inferior do PCB a azul:



**Figura 6 - Camada inferior do PCB.**

A Figura 7 realça a ligação efetuada numa camada interior, que permite as ligações entre componentes sem sobrepor as ligações existentes:



**Figura 7 - Camada interior um do PCB.**

A utilização de múltiplas camadas permite reduzir o espaço entre os componentes, otimizando assim o layout da placa. O tamanho das resistências utilizadas no projeto é "0402".

### 2.3 Visualização 3D

Após a colocação de todos os componentes no *layout* do PCB e de garantir que as regras de design estão de acordo com as especificações dos componentes, todas as ligações se encontram devidamente efetuadas, a largura das vias e das ligações está de acordo com o projeto e a capacidade de produção do fabricante, pode-se extrair a lista de material utilizado, normalmente designada por “bill os materials”, com o acrónimo BOM, bem como todos os ficheiros necessários para efetuar a encomenda do PCB com a fonte de alimentação.

A Figura 8 representa uma visualização em 3D do PCB com a fonte de alimentação simétrica para alimentação de amplificadores operacionais:

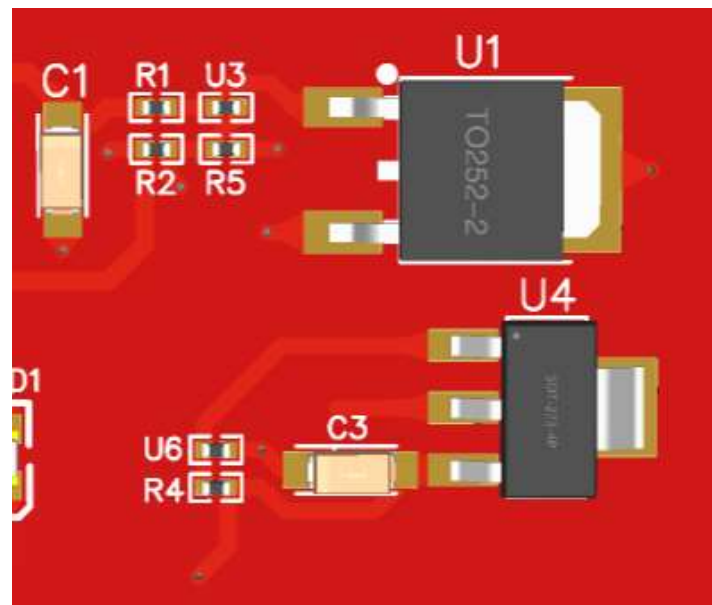


Figura 8 - Visualização 3D da fonte de alimentação simétrica.

### **3 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Conclui-se que um projeto de concepção de uma fonte de alimentação simétrica para alimentar amplificadores operacionais a partir de apenas uma fonte de alimentação de valor positivo é efetuado com recurso a reguladores de tensão, resistências e até mesmo potenciômetros, no caso de se querer ajustar os valores de tensão de alimentação em função das diferentes necessidades do circuito. Em [4] são apresentadas as equações que justificam os valores das resistências e dos condensadores utilizados. A utilização de reguladores de tensão em projetos de fontes de alimentação, em vez de simples divisores de tensão, permite otimizar a regulação, controlar melhor a dissipação de energia sob a forma de calor, permitindo assim ao circuito operar em condições mais exigentes.

## REFERÊNCIAS

- [1] Texas Instruments, Operational amplifiers (op amps). Accessed: 04 September 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/amplifier-circuit/op-amps/overview.html>
- [2] Microchip, Power Supply Requirements. Accessed: 04 September 2024. [Online]. Available: <https://developerhelp.microchip.com/xwiki/bin/view/products/amplifiers-linear/operational-amplifier-ics/introduction/Power-Supply-Requirements/>
- [3] Texas Instruments, TL06xx Low-Power JFET-Input Operational Amplifiers. Accessed: 05 September 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl062.pdf?ts=1725459476896>
- [4] Texas Instruments, LM137, LM337-N 3-Terminal Adjustable Negative Regulators. Accessed: 05 September 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm137.pdf>
- [5] JiaLiChuang (HongKong) Co., Limited, LCSC Eletronics, Accessed: 05 September 2024. [Online]. Available: <https://easyeda.com/>
- [6] R. H. R. de Lima, A. M. P. da Silva - "Análise e Projeto de Circuitos de Fonte de Alimentação Simétrica". Revista Brasileira de Eletrônica, vol. 12, pp. 45-58, 2019.
- [7] G. A. Rincón-Mora, P. P. C. Leung - "Design of Low-Voltage CMOS Switched-Capacitor DC-DC Converters". IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 51, no. 6, pp. 1123-1131, 2004.
- [8] J. Millman, C. C. Halkias - "Electronics: Devices and Circuits". McGraw-Hill, 2010.
- [9] H. J. Matta, G. P. C. Neves - "Sourcing and Loading in Symmetrical Power Supply Circuits". International Journal of Electrical Engineering Education, vol. 53, no. 3, pp. 229-243, 2016.
- [10] W. S. Liu - "Operational Amplifier Circuits". IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 35, no. 7, pp. 1033-1041, 2000.
- [11] R. A. D. Lima, J. P. D. Queiroz - "Projeto e Simulação de Fontes de Alimentação Simétricas". Anais do Congresso Brasileiro de Eletrônica, 2018.
- [12] B. C. Paul - "Switching Power Supplies A – Z". Newnes, 2007.
- [13] A. S. Sedra, K. C. Smith - "Microelectronic Circuits". Oxford University Press, 2015.
- [14] C. D. F. de Oliveira, P. A. D. Silva - "Estudo de Fontes de Alimentação Simétrica para Aplicações em Instrumentação". Revista de Tecnologia e Inovação, vol. 22, pp. 134-140, 2020.
- [15] R. W. G. B. de Souza - "Circuitos de Fonte de Alimentação: Teoria e Prática". Editora Universitária, 2021.



## **CIRCUITO DE COMPENSAÇÃO DE JUNÇÃO FRIA PARA TERMOPAR**

BRITO, FABIO (1); BARATA, RUI (2); VELEZ, FERNANDO J. (3); REIS, ANTONIO D. (4)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [fabio.brito@ubi.pt](mailto:fabio.brito@ubi.pt)

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: [rbarata@ubi.pt](mailto:rbarata@ubi.pt)

(3) Instituto de Telecomunicações e UBI, E-mail: [fjv@ubi.pt](mailto:fjv@ubi.pt)

(4) Universidade da Beira Interior, E-mail: [adreis@ubi.pt](mailto:adreis@ubi.pt)

### **RESUMO**

Este documento tem como objetivo testar a efetividade prática de um circuito de condicionamento de sinal de um sensor de temperatura, nomeadamente um termopar. Antes de adquirir o sinal de um sensor para digitalização, um dos requisitos no condicionamento de sinal, consiste na implementação de um circuito de compensação de junção fria, para a obtenção mais precisa do valor de tensão obtido. O termopar permite medir a temperatura através da diferença de potencial entre dois metais distintos. Com base neste contexto, outra tensão é gerada na conexão entre o termopar e o terminal do dispositivo de aquisição de sinal. O circuito de compensação de junção fria melhora a medição ao providenciar a temperatura nesta junção e aplica a correção necessária. Inicialmente procedeu-se ao estudo de circuitos de compensação de junção fria para dispositivos de aquisição de sinais. O circuito de compensação de junção fria do termopar depende do tipo de termopar que se pretende utilizar. A calibração do circuito, graças à utilização de potenciômetros, permite ajustar a tensão de referência do circuito de compensação de junção fria e assim obter valores muito próximos aos valores de referência da tabela do termopar. A diminuição e o aumento significativo de temperatura no sensor, permitiu analisar o comportamento do circuito de compensação de junção fria e verificar que os valores obtidos eram consistentes e coerentes com os valores de referência da tabela do termopar. Além disso, permitiu saber aproximadamente qual a temperatura da fonte de calor utilizada.

**Palavras-chave:** Termopar, Aquisição de Sinais, Circuito de Compensação de Junção Fria.

## **ABSTRACT**

*This document aims to test the practical effectiveness of a signal conditioning circuit for a temperature sensor, namely a thermocouple. Before acquiring the signal from the sensor for digitization, one of the signal conditioning requirements consists of implementing a cold junction compensation circuit, to obtain a more accurate voltage value. The thermocouple allows temperature to be measured through the potential difference between two different metals. Based on this context, another voltage is generated in the connection between the thermocouple and the signal acquisition device terminal. The cold junction compensation circuit improves the measurement by taking the temperature at this junction and applying the necessary correction. Initially, the study of cold junction compensation circuits for signal acquisition devices was carried out. The thermocouple cold junction compensation circuit depends on the type of thermocouple to be used. Calibrating the circuit, thanks to the use of potentiometers, allows adjusting the reference voltage of the cold junction compensation circuit and thus obtaining values very close to the reference values in the thermocouple table. The significant decrease and increase in temperature in the sensor made it possible to analyze the behavior of the cold junction compensation circuit and verify that the values obtained were consistent and coherent with the reference values in the thermocouple table. Furthermore, it allowed us to know approximately the temperature of the heat source used.*

**Keywords:** Thermocouple, Signal Acquisition, Cold Junction Compensation Circuit.






## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de efetuar medições estruturais ou ambientais encontra amplamente disseminada e desempenha um papel fundamental em diversas áreas da ciência e da engenharia. Diversas aplicações envolvem a medição de temperatura. Essa medição pode ser efetuada por via de diversas técnicas e métodos, mas no caso do uso de sensores de temperatura, a sua utilização requer um condicionamento ao sinal, de maneira a que o equipamento possa facultar dados de uma forma eficaz e com precisão. Condicionar o sinal consiste num dos passos mais importantes num sistema de aquisição de dados, uma vez que sem a correta otimização do sinal analógico, o mundo digital não consegue operar com a devida precisão.

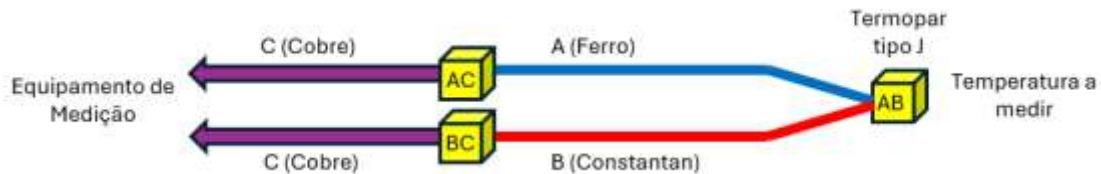
Existem alguns tipos de termopares disponíveis no mercado, no entanto, para este trabalho, optou-se pelo termopar tipo J. A escolha sobre este tipo de termopar teve em conta os seguintes fatores: é o mais barato entre todos os tipos de termopares, a 20 graus °C gera uma tensão de saída de 1 mV e possui uma gama de utilização até 760 graus C, o que é aceitável e possuiu bastante utilização em aplicações industriais. Este tipo de sensor é constituído pela união de dois metais distintos, o terminal positivo é constituído por ferro e o terminal negativo é constituído por uma liga de cobre e níquel, designada por Constantan. Deve-se evitar a sua utilização em atmosferas oxidantes e possui uma sensibilidade de aproximadamente 50 mV por grau C. Dependendo da região do globo o termopar tipo J difere na cor do isolante dos metais. Na Tabela 1 é possível observar as diferentes normas usadas para a identificação do termopar, nos EUA é utilizada a norma ANSI/MC96.1, sendo que no Japão é a JIS C 1610-1981 [1]:

**Tabela 1 – Diferentes combinações de cores dos condutores do termopar tipo J.**

Norma	IEC 5843:1989	ANSI/MC96.1	JIS C 1610-1981
Tipo de combinação do condutor - Tipo J			

Dependendo do tipo de sensor a utilizar, as necessidades de condicionamento de sinal mudam bastante, e cada tipo de sensor está normalmente associado a um tipo de condicionamento diferente. Compreender bem o circuito de condicionamento de sinal necessário, de maneira a certificar-se que a medição é precisa, consiste no passo fundamental para ser bem-sucedido [2]. Os termopares geram sinais de tensão muito baixos, logo necessitam de amplificação, filtragem e linearização. Estas tecnologias de preparação consistem em formas de condicionamento de sinal. No âmbito deste trabalho irá ser explorada a tecnologia de compensação de junção fria, utilizada em termopares.

A compensação de junção fria permite obter medições de temperatura precisas do sensor de temperatura mais vulgarmente utilizado, o termopar. A compensação de junção fria aplica uma correção na junção do terminal do termopar com o dispositivo de aquisição de dados, uma vez que esta união, gera outra tensão adicional, para além da tensão gerada entre os dois metais diferentes do termopar. Devido às suas características físicas, este tipo de sensores têm requisitos de condicionamento de sinal muito específicos. A Figura 1 ilustra o somatório de tensões adicionais quando se aplica um termopar num terminal de conexão [3]:



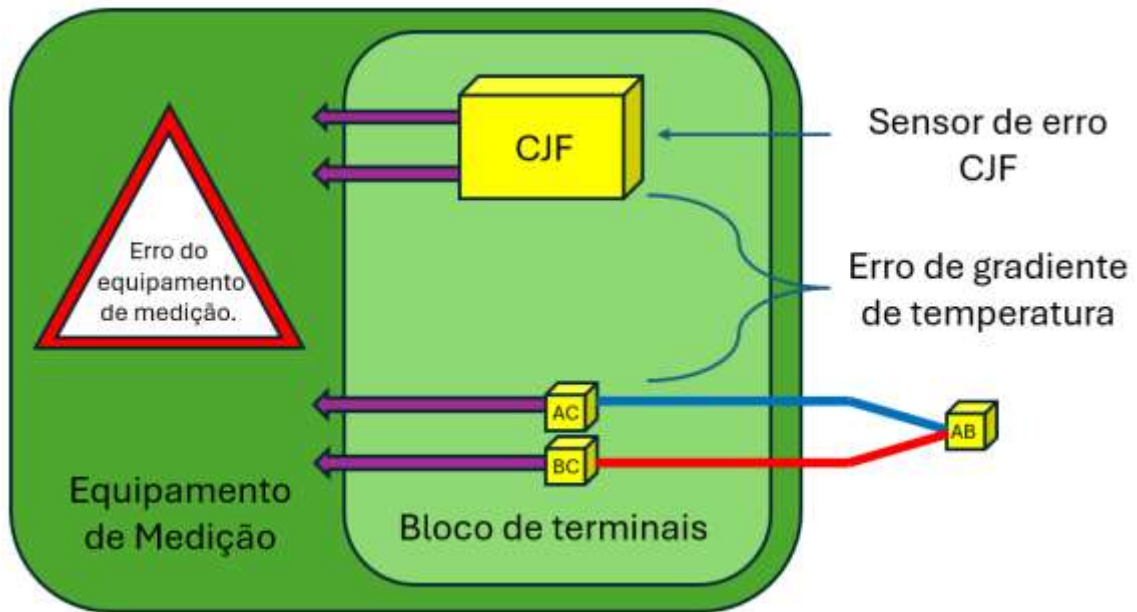
**Figura 1 - A junção fria acrescenta um erro à medição do termopar.**

Neste caso a medição desejada é AB, no entanto, o que é realmente medido é um somatório de várias tensões, ou seja,  $AB+AC+BC$ , resultando no erro das junções frias, uma vez que os terminais do equipamento de medição são constituídos por outro material diferente. O erro é eliminado ao subtrair o valor das temperaturas conhecidas em AC e BC ao resultado da medição, com o objetivo de conhecer a verdadeira temperatura em AB, esta técnica é conhecida como a compensação de junção fria. A maioria dos dispositivos de medição que usam termopares integram o referido circuito de compensação.

De salientar que a integração do circuito de compensação de junção (CFJ) fria pode causar erros. Esse erro pode advir do próprio circuito de CJF, pode advir do equipamento que mede a CJF bem como do gradiente entre o circuito de CJF e a junção fria. Uma das formas de mitigar o erro, consiste em colocar o circuito de CJF o mais próximo possível dos terminais onde está conectado o termopar.

No sentido de reduzir os erros no equipamento de medição, dimensionou-se um circuito que possui a capacidade de calibração conforme necessário. Para além disso o terminal de ligação ao dispositivo de medição serve para minimizar o erro na junção fria, uma vez que é constituído pelos mesmos materiais que o termopar. Este tipo de conectores evita a necessidade de montar diretamente o sensor, com ajuda de solda, o que ainda iria acrescentar mais fontes de erros. A ligação à terra isola a ligação entre o dispositivo de medição e o termopar melhorando significativamente o ruído, e conseqüentemente outra fonte de erro que afeta a medição [3].

A Figura 2 ilustra o que foi descrito anteriormente num sistema de medição com termopares:



**Figura 2 - Sistema de medição com termopares.**

O design do circuito de CJF tem como base o circuito LM335, que consiste num sensor de temperatura de precisão e é bastante útil para o dimensionamento da compensação de junção fria do termopar [4].

## 2 DESENVOLVIMENTO

Inicialmente procedeu-se ao estudo de circuitos de compensação de junção fria para dispositivos de aquisição de dados. No projeto de dimensionamento do circuito foi utilizado um componente da Texas Instruments para sensores de temperatura de precisão, o LM335 [4]. O circuito de compensação de junção fria do termopar depende do tipo de termopar que se pretende utilizar. Neste trabalho, como referido anteriormente, pretende-se utilizar um termopar do tipo J.

### 2.1 Dimensionamento do circuito de CJF

No sentido de testar o comportamento deste circuito em ambiente laboratorial, procedeu-se à montagem do circuito em *breadboard* e os respetivos componentes. Usou-se a tensão de referência de 15V como indica o circuito da Figura 3 [4].

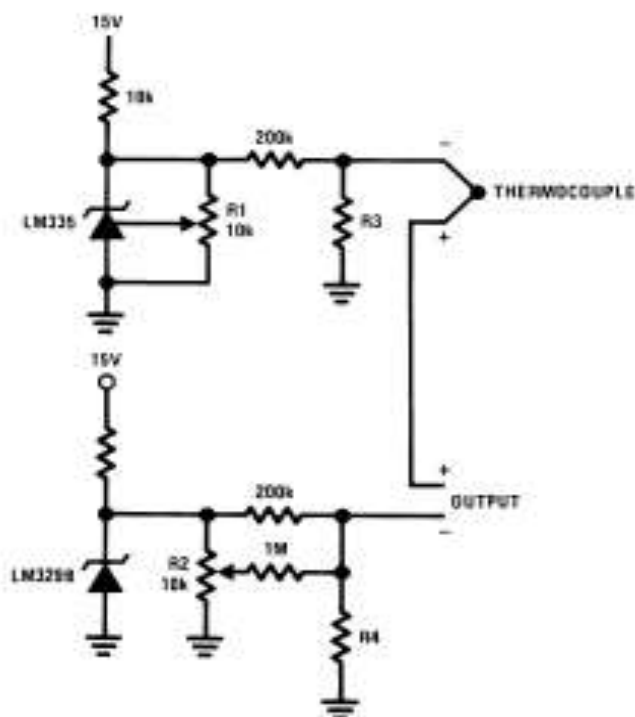


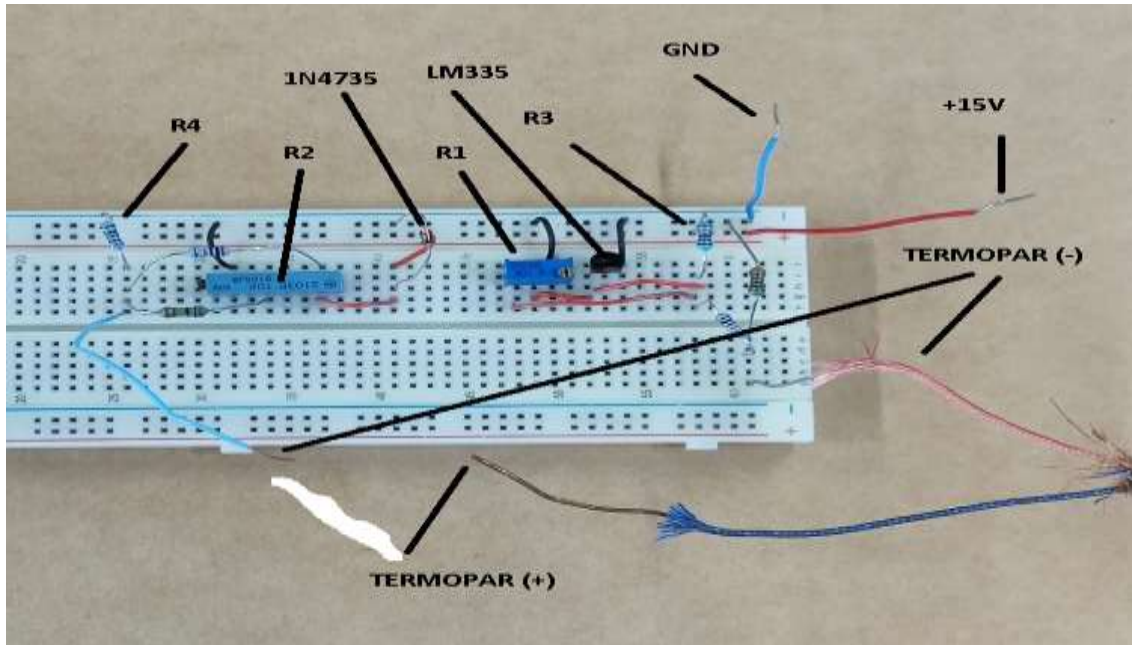
Figura 3 Circuito de compensação de junção fria [4].

Com recurso ao datasheet do LM335, dimensionou-se o valor das resistências R3 e R4 para o circuito, com base no tipo de termopar utilizado. Para isso consultou-se a tabela que consta no documento técnico onde indica o coeficiente de Seebeck para o tipo de termopar em causa. A Tabela 2 [4] auxilia no dimensionamento ao facultar os valores necessários:

Tabela 2 - Valores de referência das resistências para diferentes tipos de termopares [4].

Termopar	R3	R4	Coefficiente de Seebeck
J	1.05 K $\Omega$	385 $\Omega$	52.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
T	856 $\Omega$	315 $\Omega$	42.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
K	816 $\Omega$	300 $\Omega$	40.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
S	128 $\Omega$	46.3 $\Omega$	6.4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

A Figura 4 ilustra o resultado do circuito na placa de testes, no entanto, há que salientar que foi efetuada uma alteração face ao circuito de Figura 3, tendo-se substituído LM329B por um diodo Zener 1N4735, por motivos de disponibilidade no laboratório de eletrônica.



**Figura 4 - Montagem do circuito de compensação em placa de teste.**

Na Figura 4, os componentes R1 e R2 correspondem a potenciômetros de 10 K $\Omega$ .

## 2.2 Calibração do circuito para a temperatura ambiente

Com recurso a um termómetro digital, obteve-se a temperatura do laboratório. A temperatura indicada era de 25 graus. Nesta fase o objetivo é a calibração do circuito antes de amplificar o sinal, pelo que os resultados experimentais são apresentados em valores de tensão absolutos em milivolts. Posto isto, procedeu-se à regulação dos potenciômetros no sentido de obter o valor de tensão esperado, face aos valores tabelados para o termopar tipo J. O valor de tensão para 25 graus é de 1.277mV, como se pode verificar na Tabela 3, pelos valores numa tabela de correlação de força eletromotriz em função da temperatura para termopares tipo J [5]:

**Tabela 3 - Tabela de correlação para termopares tipo J (FEM x TEMP).**

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507	0
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.814	0.865	0.916	0.968	1.019	10
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433	1.485	1.537	20
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954	2.006	2.059	30
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480	2.532	2.585	40

No sentido de se obter no voltímetro o valor pretendido, regularam-se os potenciômetros, sendo o valor da resistência em R1 de 10k $\Omega$  e em R2 de 8.2684k $\Omega$ . O resultado obtido após a regulação pode verificar-se na Figura 6:



Figura 5 - Medição da temperatura ambiente com o termopar tipo J.

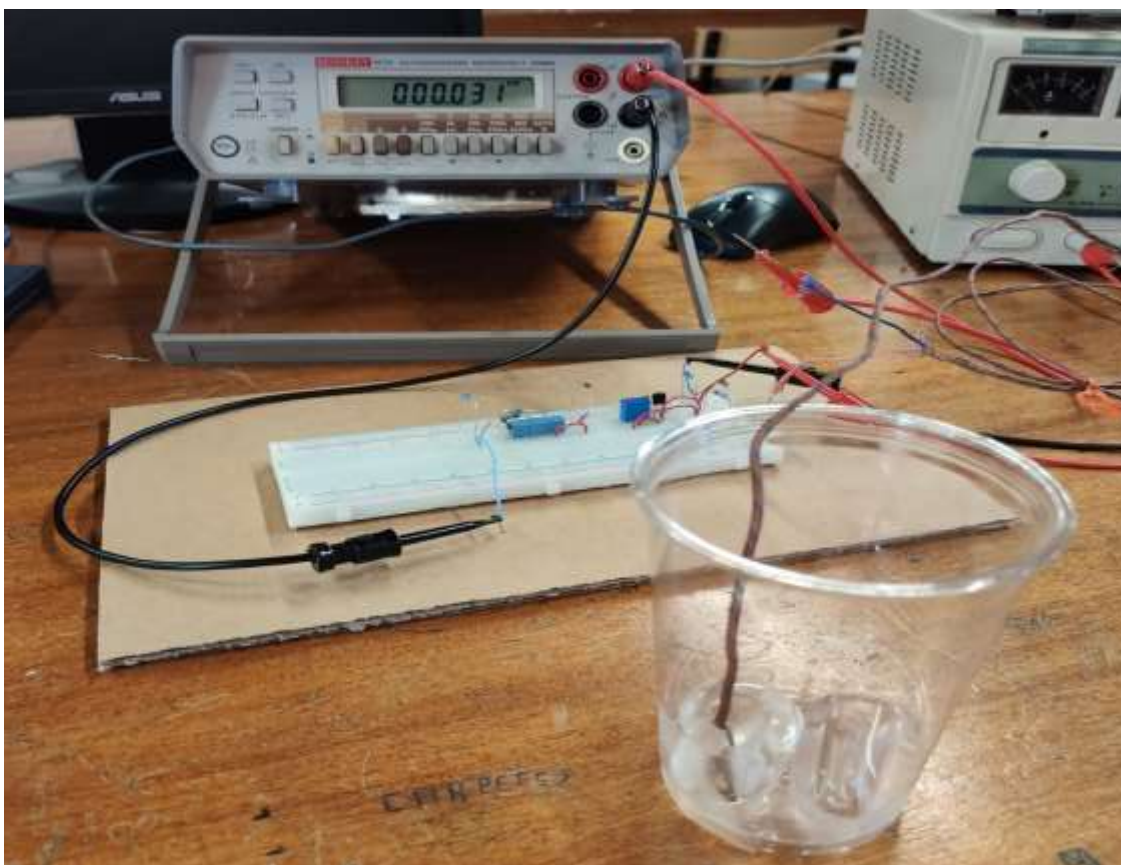
### 2.3 Calibração do circuito para 0° C

O seguinte teste tem como objetivo melhorar a calibração do circuito e testar o seu desempenho. No sentido de testar a efetividade do circuito recorreu-se a água no estado sólido, a uma temperatura em torno de zero graus centígrados e colocou-se o termopar dentro de um copo de plástico, mau condutor de calor, com alguns cubos de gelo. Segundo a tabela de correlação do termopar o valor de tensão esperado é de zero, como se pode verificar na Tabela 4:

Tabela 4 - Valor de tensão em milivolt para uma temperatura de zero graus centígrados.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507	0
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.814	0.865	0.916	0.968	1.019	10
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433	1.485	1.537	20
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954	2.006	2.059	30
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480	2.532	2.585	40

A Figura 6 mostra o sensor junto a cubos de gelo e no multímetro o respetivo valor de tensão aos terminais do circuito de compensação de junção fria:

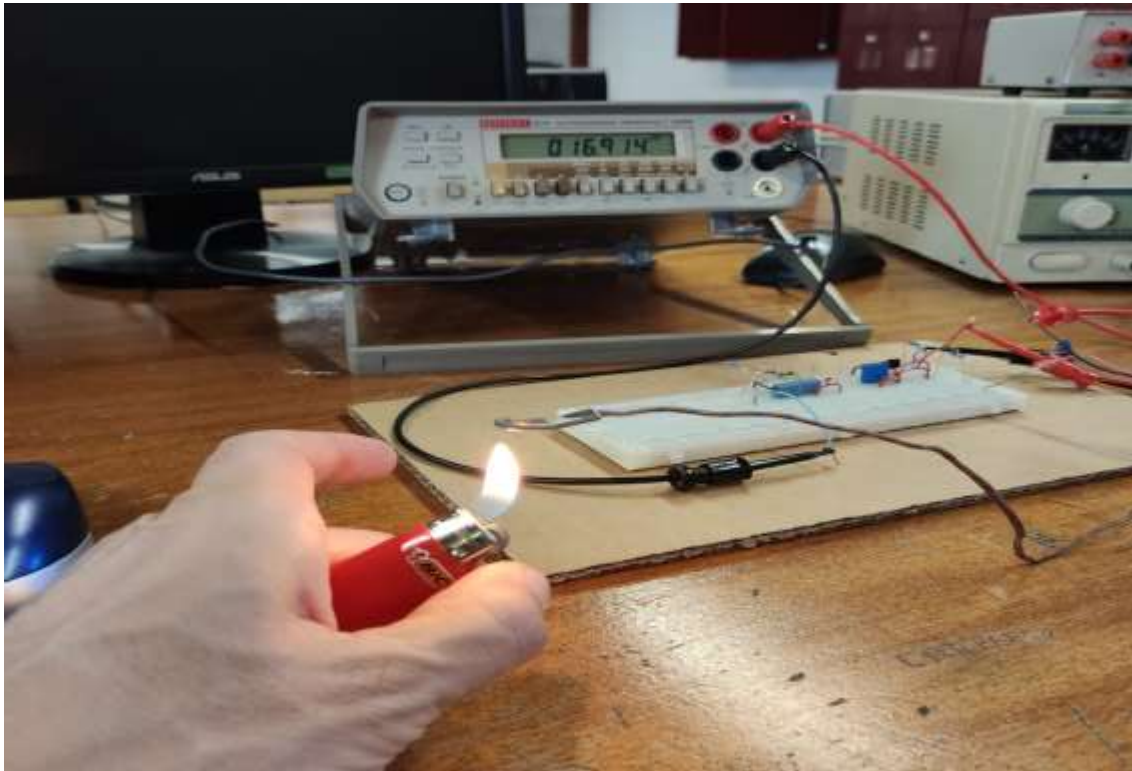


**Figura 6 - Teste do circuito com o termopar colocado em água no estado sólido.**

O valor de tensão medido foi de 0.031mV, como se pode verificar, um valor muito próximo para uma temperatura medida em torno dos zero graus centígrados, como esperado. No sentido de calibrar o circuito regulou-se R1 para 10k $\Omega$ , mantendo assim o valor anterior e R2 para 9,5815k $\Omega$ .

## **2.4 Calibração do circuito para elevadas temperaturas**

O último teste tem como objetivo verificar a resposta do circuito de compensação de junção fria a um significativo aumento de temperatura, mantendo os potenciômetros R1 e R2 ajustados na mesma configuração do teste anterior, ou seja, com o termopar colocado no gelo. Foi utilizado um isqueiro de bolso da marca "Bic", com combustível isobutano puro, para aumentar a temperatura do sensor. Na Figura 7 é possível observar o valor de tensão medido à saída do circuito de compensação de junção fria:



**Figura 7 - Aumento da temperatura do termopar.**

O sensor esteve exposto à chama do isqueiro durante algum tempo, o suficiente para se verificar os valores de tensão à saída do circuito a aumentar até estabilizar. Ao estabilizar, o multímetro mediu à saída dos terminais do circuito uma tensão em torno dos 17mV. Segundo a Tabela 5, este valor corresponde a uma temperatura de aproximadamente 312 graus:

**Tabela 5 - Valores de tensão em mV em função da temperatura.**

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
VOLTAGEM TERMOELÉTRICA EM MILIVOLTS ABSOLUTOS												
250	13.555	13.611	13.666	13.722	13.777	13.833	13.888	13.944	13.999	14.055	14.110	250
260	14.110	14.166	14.221	14.277	14.332	14.388	14.443	14.499	14.554	14.609	14.665	260
270	14.665	14.720	14.776	14.831	14.887	14.942	14.998	15.053	15.109	15.164	15.219	270
280	15.219	15.275	15.330	15.386	15.441	15.496	15.552	15.607	15.663	15.718	15.773	280
290	15.773	15.829	15.884	15.940	15.995	16.050	16.106	16.161	16.216	16.272	16.327	290
300	16.327	16.383	16.438	16.493	16.549	16.604	16.659	16.715	16.770	16.825	16.881	300
310	16.881	16.936	16.991	17.046	17.102	17.157	17.212	17.268	17.323	17.378	17.434	310
320	17.434	17.489	17.544	17.599	17.655	17.710	17.765	17.820	17.876	17.931	17.986	320
330	17.986	18.041	18.097	18.152	18.207	18.262	18.318	18.373	18.428	18.483	18.538	330
340	18.538	18.594	18.649	18.704	18.759	18.814	18.870	18.925	18.980	19.035	19.090	340

O valor da temperatura medida, encontra-se abaixo dos valores de referencia para a combustão do gás isobutano puro, que variam entre os 800°C e os 1400°C. Esse valor de temperatura é atingido na ponta interna do cone azul da chama, a parte da chama onde a temperatura é mais elevada. Neste teste o sensor foi colocado na ponta do cone da chama amarela, como se pode observar na Figura 7, onde a combustão do gás não é tão eficiente. De resto, o termopar tipo J apenas possui gama de temperatura até aos 770°C como se pode observar em [5].



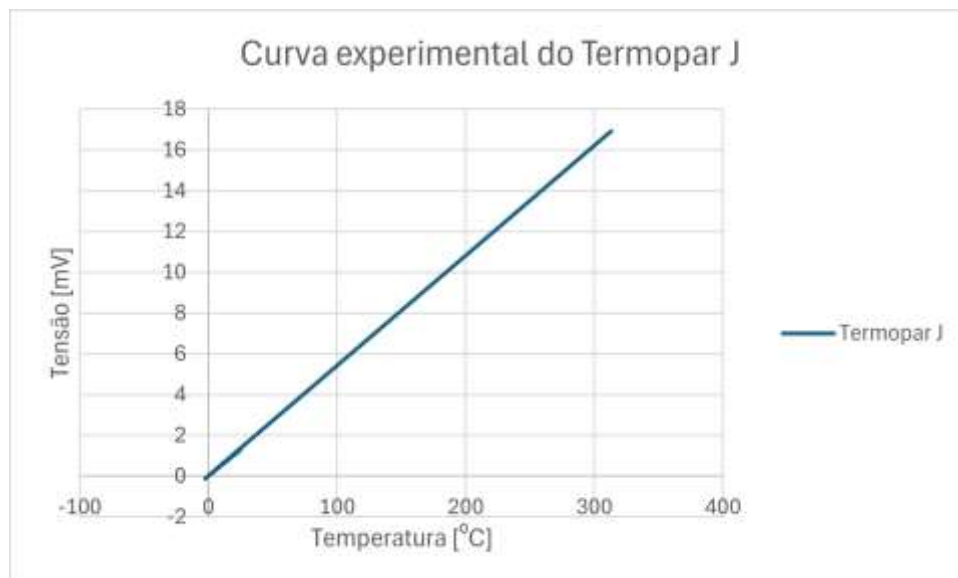
### 3 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na análise final dos dados recolhidos é necessário ter em conta a tabela de correlação, onde o fabricante indica, em função da variação de temperatura, a força electromotriz fornecida pelo termopar em valores absolutos. De entre toda a gama de temperaturas de operação do termopar, escolheram-se as temperaturas à qual foram efetuados os diversos testes. Na Tabela 6 pode-se observar um resumo dos dados obtidos, onde constam os valores dos potenciômetros R1 e R2 para os diversos tipos de testes realizados:

**Tabela 6 - Valores das resistências e da tensão registada para os diferentes cenários testados.**

	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>Tensão</b>	<b>Temperatura</b>
<b>Tmp. amb.</b>	10k $\Omega$	8.2684k $\Omega$	1.1K $\Omega$	360 $\Omega$	1.277mV	$\approx 25^{\circ}$ C
<b>Gelo</b>	10k $\Omega$	9.5815 k $\Omega$	1.1K $\Omega$	360 $\Omega$	0.003mV	$\approx 0^{\circ}$ C
<b>Chama</b>	10k $\Omega$	9.5815 k $\Omega$	1.1K $\Omega$	360 $\Omega$	16.914mV	$\approx 313^{\circ}$ C

É possível observar que, com a colocação do circuito de compensação de junção fria entre os terminais, os valores medidos, após a calibração dos potenciômetros, encontram-se próximo do esperado. Assim a gama de medição do termopar, e a sua variação dos valores de tensão em função da temperatura aumentam de modo linear, como se pode observar na Figura 8, da curva experimental dos resultados obtidos:



**Figura 8 - Curva experimental do termopar tipo J obtida com os resultados dos testes.**

No circuito de teste não foi usado um terminal fêmea para ligação dos terminais do termopar. O valor obtido para valores de temperatura mais elevados são menores do que valores de temperatura mais baixos. Com a substituição do diodo zener por um diodo com 1W de potencia e uma tensão de Zener de 6.2V obtiveram-se os valores de tensão esperados, face ao circuito dimensionado. O diodo zener quando polarizado inversamente permite manter uma tensão constante aos seus terminais, sendo por isso importante no circuito de regulação.

A calibração do circuito, graças aos potenciômetros, permite ajustar a tensão de referência do circuito de compensação de junção fria e assim obter valores próximos aos valores de referência da tabela de correlação. A colocação do sensor no gelo permitiu obter um valor de referência para os potenciômetros.

O aumento significativo de temperatura no sensor permitiu analisar o comportamento do circuito de compensação de junção fria e verificar se os valores obtidos eram consistentes e coerentes com os valores de referência da tabela do termopar tipo J, além disso, permitiu saber aproximadamente qual o valor da chama do isqueiro, não se tendo alterado o valor de calibração dos potenciômetros efetuada no teste anterior.

## REFERÊNCIAS

- [1] Tempens Instruments, Type J Thermocouple, Accessed: 06 September 2024. [Online]. Available: [https://tempens.com/pub/media/pdf/technical-articles/J\\_Type\\_1.pdf](https://tempens.com/pub/media/pdf/technical-articles/J_Type_1.pdf)
- [2] Texas Instruments, "RTD Replacement for Cold Junction Compensation Reference Design in a Temperature Sensor", 2019, Accessed: 06 September 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ug/tiduee1a/tiduee1a.pdf>
- [3] National Instruments, "The Engineer's Guide to Signal Conditioning", David Ashlock, Anjelica Warren, Accessed: 07 September 2024. [Online]. Available: [https://download.ni.com/evaluation/signal\\_conditioning/20712\\_Benefits\\_of\\_Integrated\\_SC\\_WP\\_HL.pdf](https://download.ni.com/evaluation/signal_conditioning/20712_Benefits_of_Integrated_SC_WP_HL.pdf)
- [4] Texas Instruments, "LMx35, LMx35A Precision Temperature Sensors", Accessed: 07 September 2024. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm335.pdf?ts=1725704652783&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM335](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm335.pdf?ts=1725704652783&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM335)
- [5] ECIL, Temperatura Industrial, "Tabela de correlação para termopares tipo J (ferro/constantan)", Accessed: 07 September 2024. [Online]. Available: <https://ecil.com.br/wp-content/uploads/2019/04/J.pdf>
- [6] Klein, S. A., & Beckman, W. A. (2016). "Thermocouple Compensation Techniques: Theory and Application". *Journal of Measurement Science and Technology*.
- [7] Fraden, J. (2016). "Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications". Springer.
- [8] Meyer, J. P., & Perino, J. (2012). "Cold Junction Compensation for Thermocouples: A Review." *Sensors and Actuators A: Physical*.
- [9] Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). "Random Data: Analysis and Measurement Procedures". Wiley.
- [10] Liu, D., & Xu, H. (2018). "Design of Cold Junction Compensation Circuit for Thermocouples." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [11] Benedict, R. P. (2011). "Cold Junction Compensation Techniques for Thermocouples." *Journal of Applied Physics*.
- [12] Nicolai, A., & Strauß, R. (2017). "Advances in Thermocouple Signal Conditioning." *Measurement Science Review*.
- [13] Santos, F. R., & Lima, R. B. (2019). "Thermocouple Error Analysis in Cold Junction Compensation." *International Journal of Thermophysics*.
- [14] Teymouri, A., & Coyle, E. (2020). "Thermal Response and Compensation of Thermocouple Systems." *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*.
- [15] Rao, K. S., & Rao, A. R. (2015). "Development of Low-Cost Cold Junction Compensation for Thermocouples." *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*.



## CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS ENERGIAS FOTOVOLTAICA E EÓLICA EM ANGOLA

ANTÓNIO, AFONSO; POMBO, JOSÉ; MARIANO, SÍLVIO; CALADO, ROSÁRIO

Universidade da Beira Interior e Instituto de Telecomunicações

E-mails: [d2954@ubi.pt](mailto:d2954@ubi.pt); [jose.pombo@ubi.pt](mailto:jose.pombo@ubi.pt); [sm@ubi.pt](mailto:sm@ubi.pt); [rc@ubi.pt](mailto:rc@ubi.pt)

### RESUMO

Com a introdução de tecnologias de extração de energias renováveis em Angola, espera-se reforçar a sua potência instalada até 2025 e prevê-se que a energia produzida por fontes renováveis ultrapasse 7,5% da energia produzida. Este trabalho centra-se na caracterização e avaliação do potencial solar fotovoltaico e eólico no território angolano. O objetivo é determinar as regiões de Angola com maior potencial energético para a instalação de tecnologias de energias renováveis, solar fotovoltaico e eólica. Para tal, e enquadrando o tema, aborda-se a independência energética e a descarbonização do setor elétrico angolano. A análise incluiu uma avaliação das condições climáticas, como a radiação solar, a temperatura e a velocidade do vento para mapear ou identificar as áreas com maior potencial energético. O estudo inclui uma análise pormenorizada do potencial energético especificamente para a energia solar fotovoltaica e para a energia eólica. O objetivo é contribuir para a compreensão global das regiões do território angolano em termos do seu potencial energético e identificar as regiões mais adequadas para a implementação das tecnologias de energias renováveis, como a fotovoltaica e a eólica.

**Palavra-chave:** Energias renováveis, radiação solar, temperatura, velocidade do vento, energia fotovoltaica e energia eólica.

### ABSTRACT

*With the introduction of renewable energy extraction technologies in Angola, it is expected to strengthen its installed power by 2025, and it is expected that the energy produced by renewable sources will exceed 7.5% of the total amount of produced energy. This study is focused on characterizing and assessing the solar photovoltaic and wind potential in Angola. The aim is to determine the regions of Angola with the greatest energy potential for the installation of renewable energy technologies, solar photovoltaic and wind. To do this, we first address the energy independence and the decarbonization of the Angolan electricity sector. The analysis includes an assessment of climatic conditions such as solar radiation, temperature and wind speed to map or identify the areas with the greatest energy potential. The study also provides a detailed analysis of energy potential specifically for solar photovoltaics and wind energy. The overall objective is to contribute to a global understanding of the regions of Angolan territory in terms of their energy potential and to identify the most suitable regions for the implementation of renewable energy technologies such as photovoltaics and wind.*

**Keywords:** Renewable energy, solar radiation, temperature, wind speed, photovoltaic energy, and wind energy.

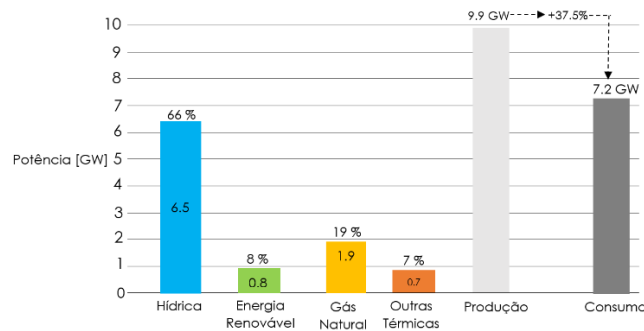
## 1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é um fator relevante na produção (Boukhelkhal, 2022) e impulsiona as atividades económicas e sociais de um país (Liu *et al.*, 2023;

Wang *et al.*, 2023). A queima de carvão e petróleo é a principal causa da mudança climática rápida (Khrbich *et al.*, 2021). As alterações ambientais são uma crise global que transcende fronteiras políticas e económicas (Oskouei *et al.*, 2022). Com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas em vigor desde 1994, diversas ações internacionais foram realizadas para promover o desenvolvimento sustentável (Hasanov *et al.*, 2021). As mais recentes são as contribuições nacionalmente determinadas, envolvendo 196 Partes no Acordo de Paris sobre as alterações climáticas de 2015 (Liobikienė and Butkus, 2017). E a Conferência das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas de 2019 (COP 25), realizada em Madrid (Castillo Esparcia and López Gómez, 2021; Asadnabizadeh, 2020). O continente africano é muito vulnerável às mudanças climáticas pela sua alta exposição e baixa resiliência (Busby *et al.*, 2014). Os governos africanos deveriam evitar a dependência de combustíveis fósseis quando adotam políticas macroeconómicas (Woody *et al.*, 2022). A busca pela neutralidade carbónica é um grande desafio para os processos energéticos intensivos (Riedel and Špaček, 2022). Desde a revolução industrial, a obtenção de energia limpa, acessível e confiável tem sido essencial. (Chu and Majumdar, 2012). Em breve, o setor industrial, os transportes e as necessidades diárias serão maioritariamente abastecidos por fontes limpas (Woody *et al.*, 2022; Neidhardt *et al.*, 2022; Halder *et al.*, 2022). Em 2022, o mundo sofreu um choque com a invasão em grande escala da Ucrânia pela Federação Russa (Dodds *et al.*, 2023), que em 2021 foi o maior exportador de gás natural, o segundo de petróleo bruto e condensado, e o terceiro de carvão, tendo os países europeus da OCDE importado 49% do petróleo bruto e 74% do gás natural da Rússia (Liu and Lee, 2024). Essa invasão aumentou significativamente a demanda por petróleo nos mercados internacionais (McKee and Murphy, 2022; Leon *et al.*, 2022). Este conflito militar provocou grandes custos económicos globais, como preços elevados dos alimentos, combustíveis, gás e eletricidade na Europa (Hryhorczuk *et al.*, 2024; Liadze *et al.*, 2022; Mbah, 2022). Países como Angola, produtor de petróleo (Inal *et al.*, 2022; Karanfil and Omgba, 2023; He *et al.*, 2023; Hegedűs, 2022), com a alta demanda por petróleo no cenário internacional, resultante do conflito militar (Rússia verso Ucrânia), Angola, tem a oportunidade de garantir a transição energética, investindo o excedente da venda de petróleo bruto em infraestruturas de energia renovável. Isso permitirá que o país cumpra o acordo regional de partilha de energia da África Austral, assinado na cimeira da SADC em 1995 e que levou à formação do Grupo de Energia da África Austral (Ndlela *et al.*, 2023; Barbieri and Daddi, 2020). Angola espera aumentar a potência instalada de energias renováveis até 2025, com a produção a partir de fontes renováveis ultrapassando 7,5% da produção total, cerca de 3 TWh (Afonso Q. M. António, 2020). Prevê-se a instalação de 800 MW de energia em Angola, incluindo 100 MW de fontes limpas como solar e eólica, e 500 MW de biomassa, com o sucesso dependendo da iniciativa privada e de estudos de viabilidade (Afonso Q. M. António, 2020). Segundo a Figura 1, prevê-se que até 2025, 8% do total da potência

instalada seja a partir de fontes de energia renováveis e 7% de outras térmicas.

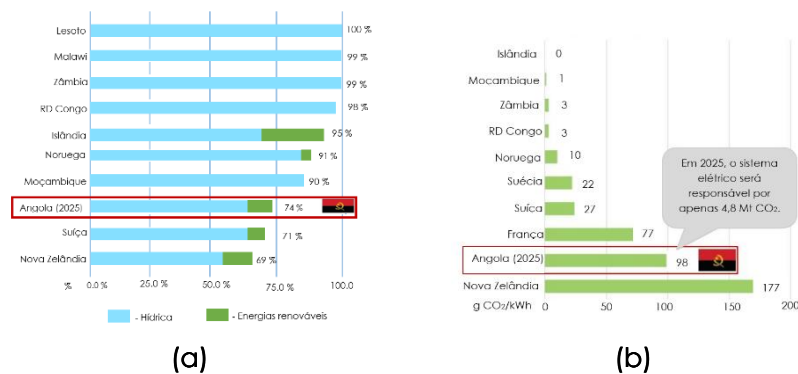
**Figura 1 – Potência instalada em Angola, por fonte, em 2025**



**Fonte:** Adaptado de (Afonso Q. M. António, 2020)

O setor de produção de energia elétrica é o maior emissor de gases de efeito estufa, seguido pela agricultura e indústria (Afonso Q. M. António, 2020). O governo de Angola prevê que, até 2025, 74% da potência instalada será proveniente de fontes renováveis, conforme ilustrado na Figura 2 a).

**Figura 2 – Descarbonização do setor elétrico em Angola: (a) aumento da percentagem de potência instalada de fontes renováveis; (b) redução das emissões de CO<sub>2</sub>**



**Fonte:** Adaptado de (Afonso Q. M. António, 2020)

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos em Angola foram recolhidos por estações em Caope (Luanda), Kessua (Malanje), Bibala (Namibe) e Onjiva (Cunene), em alturas de 10 metros e localizações variadas, conforme descrito por (Thapelo *et al.*, 2021).

### 2.2 TRATAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS

#### 2.2.1 ENERGIA SOLAR

Para determinação do potencial de produção da energia fotovoltaica, é crucial conhecer a temperatura ambiente e o nível de radiação solar.

A potência é determinada através de (1) (Riffonneau *et al.*, 2011; Bento *et al.*, 2019).

$$P = \left[ P_{PV.STC} * \frac{G}{G_{ref.STC}} * [1 - \alpha_{voc} * (T_{cel} - T_{ref.STC})] \right] * N_{PVs} * N_{PVp} \quad (1)$$

Onde,

- $P$  = potência solar (W);
- $P_{PV.STC}$  = potência fotovoltaica em condição de ensaio padrão;
- $G$  = radiação solar (W/m<sup>2</sup>);
- $G_{ref.STC}$  = radiação solar de referência em condições de ensaio padrão (1000 W/m<sup>2</sup>);
- $\alpha_{voc}$  = coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto;
- $T_{cel}$  = temperatura da célula (°C);
- $T_{ref.STC}$  = temperatura de referência em condições de ensaio padrão (25°C);
- $N_{PVs}$  = número de módulos fotovoltaicos em série;
- $N_{PVp}$  = número de módulos fotovoltaicos em paralelo.

A  $T_{cel}$  foi calculada através de (2) (Riffonneau *et al.*, 2011; Bento *et al.*, 2019).

$$T_{cel} = T_{amb} + \frac{G}{G_{ref.NOCT}} * (NOCT - T_{ref.NOCT}) \quad (2)$$

Onde,

- $T_{cel}$  = temperatura da célula (°C);
- $T_{amb}$  = temperatura ambiente (°C);
- $G$  = radiação solar (W/m<sup>2</sup>);
- $G_{ref.NOCT}$  = radiação de referência em condições normais de ensaio (800W/m<sup>2</sup>);
- $NOCT$  = temperatura da célula em condições de funcionamento nominais;
- $T_{ref.NOCT}$  = temperatura de referência em condições de funcionamento nominais (20°C).

Os valores de  $P_{PV.STC}$ ,  $\alpha_{voc}$  e  $NOCT$  foram obtidos de (Afonso Q. M. António, 2020).

### 2.2.2 ENERGIA EÓLICA

Para a energia eólica, é essencial conhecer a densidade do ar, a área varrida pelas pás, e a velocidade do vento. A potência eólica é determinada pela equação (3) (Neammanee *et al.*, 2007).

$$P = \frac{\rho}{2} * A * V^3 \quad (3)$$

Onde,  $P$  = potência eólica (W);  
 $\rho$  = densidade do ar (1,225 kg/m<sup>3</sup>);  
 $A$  = área varrida pelas pás (m<sup>2</sup>);  
 $V$  = velocidade do vento (m/s).

Os dados de velocidade do vento foram ajustados para a altura da turbina eólica. A extrapolação de 10 metros para 60 metros foi realizada usando (4) (Gualtieri, 2019):

$$V_2 = V_1 \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^\alpha \quad (4)$$

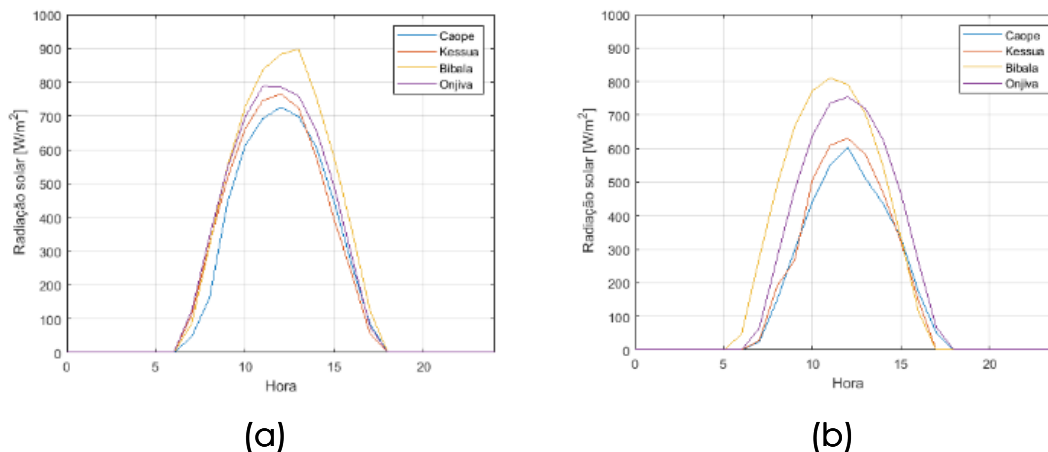
Onde,  $V_2$  = velocidade do vento até a altura de (60 m);  
 $V_1$  = velocidade do vento até a altura de (10 m);  
 $Z_2$  = altura (60 m);  
 $Z_1$  = altura (10 m);  
 $\alpha$  = coeficiente de rugosidade (0,4).

### 3 ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS

#### 3.1 RADIAÇÃO SOLAR

Na estação mais quente, Bibala e Onjiva registaram valores acima de 800 W/m<sup>2</sup>, Figura 3(a). Na estação menos quente, Bibala registou o maior valor, 800 W/m<sup>2</sup>, Caope e Kessua registaram os menores valores, Figura 3(b).

**Figura 3 – Radiação solar: (a) Estação mais quente, 29 de maio de 2016; (b) Estação menos quente, 1 de julho de 2016**

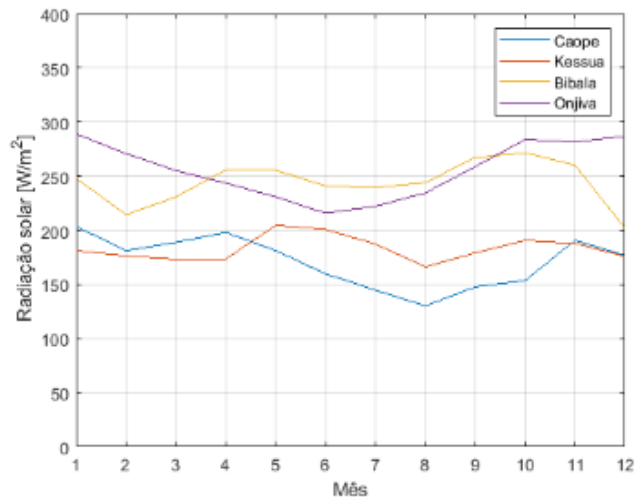


**Fonte:** Autor, elaborado a partir do Software Matlab.

Onjiva teve a maior radiação solar em janeiro, março, outubro e dezembro; Caope teve a menor. Onjiva obteve os melhores valores no período mais quente, e Caope no menos quente, Figura 4.



**Figura 4 – Ilustração da radiação solar de janeiro a dezembro de 2016.**

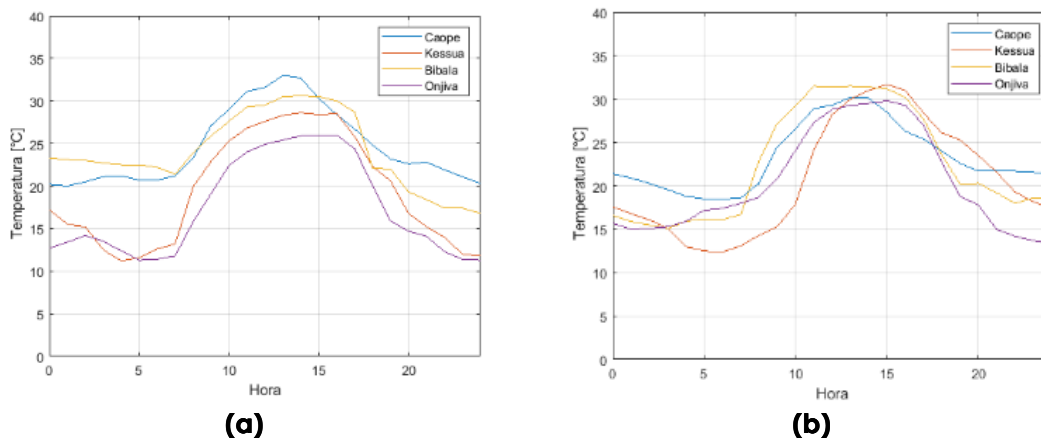


Fonte: Autor, elaborado a partir do Software Matlab.

### 3.2 TEMPERATURA

Na estação mais quente, Caope registou o maior valor, acima dos 30°C, Figura 5(a). No entanto, na estação menos quente, Bibala, destacou-se, com 30°C, Figura 5(b).

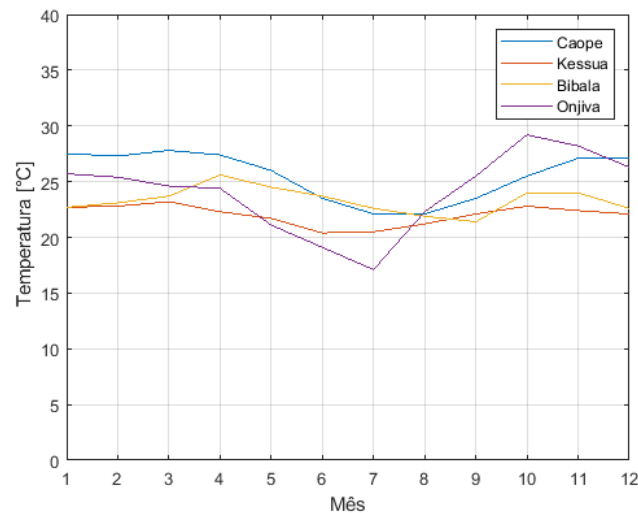
**Figura 5 – Temperatura: (a) Estação mais quente, 29 de maio de 2016; (b) Estação menos quente, 1 de julho de 2016.**



Fonte: Autor, elaborado a partir do Software Matlab.

Na estação mais quente, Caope e Onjiva registraram valores acima de 25°C. Na estação menos quente, Bibala e Caope tiveram os valores mais altos, enquanto Onjiva e Kessua os mais baixos. Caope destacou-se na estação mais quente, e Onjiva foi a pior na estação menos quente, mas a melhor entre setembro e novembro, Figura 6.

**Figura 6 – Ilustração da temperatura de janeiro a dezembro de 2016.**

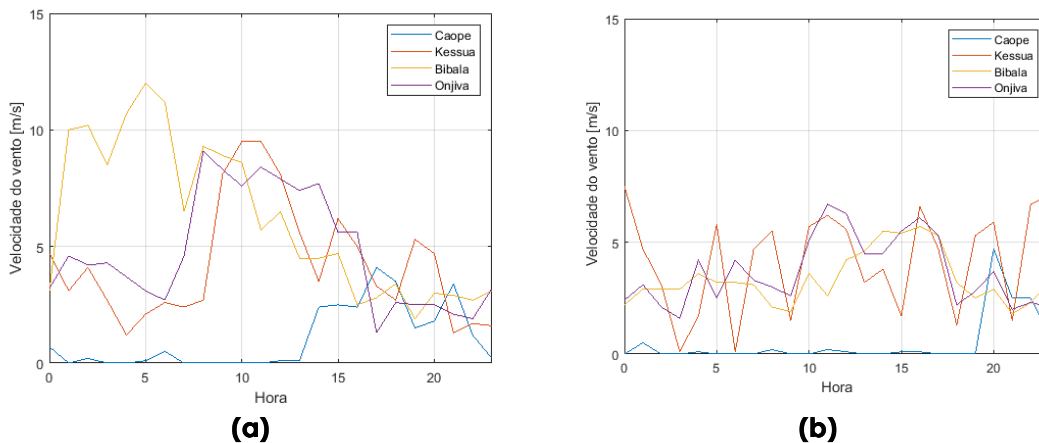


**Fonte:** Autor, elaborado a partir do Software Matlab.

### 3.3 VELOCIDADE DO VENTO

Na estação mais quente, Bibala registrou a maior velocidade do vento, acima de 10 m/s, entre as 0h e as 6h, Figura 7(a). Na estação menos quente, Kessua teve o maior valor às 0h. Nas outras zonas, a velocidade não ultrapassou os 7 m/s, Figura 7(b).

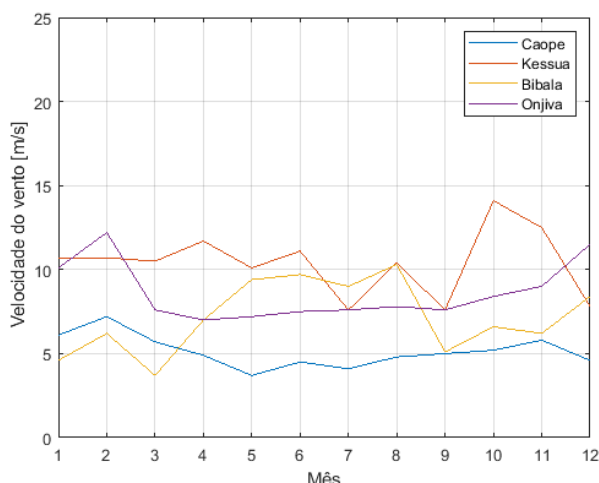
**Figura 7 – Velocidade do vento: (a) Estação mais quente, 29 de maio de 2016; (b) Estação menos quente, 1 de julho de 2016.**



**(a) (b)**  
**Fonte:** Autor, elaborado a partir do Software Matlab.

Na estação mais quente, Kessua e Onjiva registraram os valores mais altos, e na estação menos quente, Kessua e Bibala tiveram os maiores valores. A região com o menor valor na estação menos quente foi Caope, Figura 8.

**Figura 8 – Velocidade do vento de janeiro a dezembro de 2016.**



Fonte: Autor, elaborado a partir do Software Matlab.

## 4 ESTIMATIVA DA POTÊNCIA A SER PRODUZIDA

### 4.1 ENERGIA SOLAR

De setembro a maio de 2016, Bibala teve a maior estimativa diária de energia solar (126 W), seguida por Onjiva e Kessua, Tabela 1. Em 2016, Bibala e Onjiva registraram os maiores valores, e Caope o menor, Tabela 2. Anualmente, Onjiva e Bibala obtiveram os maiores valores, Tabela 3.

**Tabela 1 – Energia solar a ser produzida, na estação mais quente, 29 de maio de 2016.**

Hora	Caope				Kessua				Bibala				Onjiva			
	$T$ [°C]	$T_{cel}$ [°C]	$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P$ [W]	$T$ [°C]	$T_{cel}$ [°C]	$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P$ [W]	$T$ [°C]	$T_{cel}$ [°C]	$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P$ [W]	$T$ [°C]	$T_{cel}$ [°C]	$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P$ [W]
7	21.20	22.83	47.40	11.93	13.20	17.06	112.20	28.78	21.40	24.35	85.80	21.50	11.80	16.07	124.20	31.96
8	23.30	28.87	162.10	40.01	19.90	30.99	322.60	79.06	23.90	34.81	317.50	76.81	15.80	27.60	343.40	85.11
9	27.10	42.31	442.50	104.32	22.90	40.64	516.10	122.39	25.90	44.78	549.10	128.34	19.10	37.84	545.10	130.52
10	29.00	50.05	612.50	140.50	25.30	48.06	662.20	152.99	27.60	52.60	727.40	165.33	22.40	46.37	697.30	162.07
11	31.10	54.91	692.60	156.11	26.80	52.45	746.30	169.72	29.30	58.07	836.90	186.46	24.00	51.09	788.00	180.09
12	31.60	56.55	725.80	162.62	27.60	53.91	765.30	173.13	29.50	59.83	882.40	195.32	24.90	51.89	785.30	178.95
13	33.00	57.01	698.40	156.21	28.30	53.16	723.30	164.07	30.50	61.37	897.90	197.62	25.40	51.48	758.70	173.15
14	32.70	53.55	606.60	137.40	28.60	48.39	575.80	132.87	30.60	56.52	754.10	168.97	25.90	48.46	656.40	151.43
15	30.30	45.56	444.00	103.49	28.40	41.89	392.50	92.67	30.50	50.29	575.80	131.97	26.00	42.86	490.40	115.40
16	28.40	37.23	256.90	61.64	28.50	36.38	229.10	55.13	30.00	42.36	359.70	84.79	26.00	35.66	281.00	67.79
17	26.70	29.62	85.00	20.93	25.80	27.73	56.20	13.92	28.70	33.03	125.90	30.64	24.40	27.06	77.30	19.19
Média	28.58	43.50	433.98	99.56	25.03	40.97	463.78	107.70	27.99	47.09	555.68	126.16	22.34	39.67	504.28	117.79

**Tabela 2 – Energia solar a produzir, na estação menos quente, 1 de julho de 2016**

Hora	Caope				Kessua				Bibala				Onjiva			
	T [°C]	T <sub>cel</sub> [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	P [W]	T [°C]	T <sub>cel</sub> [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	P [W]	T [°C]	T <sub>cel</sub> [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	P [W]	T [°C]	T <sub>cel</sub> [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	P [W]
7	18.60	19.44	24.40	6.21	13.10	14.07	28.30	7.33	16.70	26.14	274.70	68.42	18.00	20.24	65.30	16.58
8	20.30	25.39	148.00	36.95	14.30	20.83	189.90	48.13	22.90	39.73	489.70	116.49	18.70	28.08	272.80	67.51
9	24.50	34.74	297.90	72.09	15.30	24.49	267.40	66.96	27.20	50.13	667.10	152.99	20.80	37.20	477.10	114.49
10	26.60	41.79	442.00	104.39	17.90	35.31	506.50	122.33	29.20	55.74	772.20	173.52	24.10	46.01	637.50	148.36
11	28.90	47.79	549.50	127.08	24.10	45.05	609.40	142.30	31.50	59.36	810.40	179.70	27.30	52.56	734.80	167.04
12	29.30	50.05	603.70	138.49	28.20	49.88	630.70	144.77	31.40	58.59	791.10	175.92	28.80	54.71	753.80	170.03
13	30.20	47.78	511.40	118.27	30.00	50.02	582.40	133.61	31.50	55.68	703.30	158.08	29.30	54.05	719.90	162.78
14	30.10	45.06	435.20	101.62	31.00	47.11	468.60	108.63	31.40	50.16	545.80	125.15	29.50	51.00	625.50	143.00
15	28.50	40.02	335.00	79.61	31.70	42.78	322.20	75.84	31.20	42.75	336.00	79.09	29.80	45.86	467.20	108.78
16	26.30	32.24	172.90	42.19	31.00	36.03	146.30	35.25	30.20	34.07	112.60	27.31	29.30	38.28	261.30	62.47
17	25.40	27.18	51.80	12.86	28.40	28.40	0.00	0.00	27.70	27.70	0.00	0.00	27.00	29.32	67.40	16.61
Média	26.25	37.41	324.71	76.34	24.09	35.81	341.06	80.47	28.26	45.46	500.26	114.24	25.69	41.57	462.05	107.06

**Tabela 3 – Ilustração da estimativa da energia solar no ano de 2016**

Mês	Caope				Kessua				Bibala				Onjiva			
	T [°C]	T <sub>cel</sub> [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	P [W]	T [°C]	T <sub>cel</sub> [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	P [W]	T [°C]	T <sub>cel</sub> [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	P [W]	T [°C]	T <sub>cel</sub> [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	P [W]
Janeiro	27.50	34.50	203.60	49.31	22.70	28.94	181.40	44.76	22.70	31.22	247.90	60.71	25.70	35.63	289.00	69.72
Fevereiro	27.30	33.53	181.20	44.03	22.80	28.86	176.40	43.54	23.10	30.47	214.40	52.64	25.40	34.71	270.70	65.51
Março	27.80	34.29	188.90	45.78	23.20	29.16	173.30	42.73	23.70	31.64	230.90	56.46	24.60	33.37	255.20	62.04
Abril	27.40	34.21	198.00	48.00	22.30	28.26	173.50	42.91	25.60	34.39	255.80	61.97	24.40	32.78	243.70	59.37
Mai	26.00	32.23	181.30	44.25	21.70	28.74	204.80	50.57	24.50	33.28	255.50	62.13	21.10	29.04	230.90	56.96
Junho	23.50	28.99	159.80	39.43	20.40	27.30	200.80	49.82	23.70	31.98	240.90	58.84	19.10	26.52	215.90	53.70
Julho	22.10	27.08	144.80	35.95	20.50	26.94	187.30	46.53	22.60	30.83	239.50	58.73	17.10	24.74	222.20	55.60
Agosto	22.10	26.58	130.20	32.38	21.20	26.92	166.30	41.31	21.90	30.29	244.10	59.96	22.30	30.36	234.60	57.61
Setembro	23.50	28.58	147.80	36.51	22.10	28.26	179.20	44.32	21.40	30.59	267.20	65.57	25.50	34.40	258.80	62.70
Outubro	25.50	30.78	153.70	37.69	22.80	29.36	190.70	46.99	24.00	33.34	271.60	66.04	29.20	38.96	283.90	67.72
Novembro	27.10	33.66	190.70	46.32	22.40	28.86	187.80	46.35	24.00	32.94	260.10	63.33	28.20	37.88	281.60	67.42
Dezembro	27.10	33.18	176.80	43.01	22.10	28.15	176.10	43.57	22.60	29.54	201.90	49.72	26.30	36.17	287.00	69.11
Média	25.58	31.47	171.40	41.89	22.02	28.31	183.13	45.28	23.32	31.71	244.15	59.68	24.08	32.88	256.13	62.29

## 4.2 ENERGIA EÓLICA

Na estação mais quente, a Bibala destacou-se, com 8780,36 kW. Onjiva ocupa a segunda posição, com mais de 3915,77 kW. A zona de Kessua, com 3341,6 kW, conforme ilustrado na Tabela 4. Na estação menos quente, Kessua teve o melhor registo, com mais de 2639,61 kW, conforme a Tabela 5.

**Tabela 4 – Energia eólica, na estação mais quente, 29 de maio de 2016.**

Hora	Caope		Kessua		Bibala		Onjiva	
	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]
0	1.43	6.94	9.62	2100.95	6.35	602.85	6.55	663.09
1	0.00	0.00	6.35	602.85	20.48	20235.91	9.42	1969.68
2	0.41	0.16	8.40	1394.68	20.89	21474.51	8.60	1499.24
3	0.00	0.00	5.53	398.30	17.41	12427.38	8.80	1608.90
4	0.00	0.00	2.46	34.97	21.91	24789.86	7.58	1025.01
5	0.20	0.02	4.30	187.40	24.57	34967.65	6.35	602.85
6	1.02	2.53	5.32	355.67	22.93	28429.99	5.53	398.30
7	0.00	0.00	4.91	279.74	13.31	5557.29	9.42	1969.68
8	0.00	0.00	5.53	398.30	19.04	16276.89	18.63	15249.19
9	0.00	0.00	16.59	10754.19	18.22	14265.69	17.00	11570.63
10	0.00	0.00	19.45	17349.76	17.61	12871.17	15.56	8883.08
11	0.00	0.00	19.45	17349.76	11.67	3747.55	17.20	11993.90
12	0.20	0.02	16.59	10754.19	13.31	5557.29	16.18	9977.09
13	0.20	0.02	11.47	3553.75	9.21	1844.00	15.15	8200.07
14	4.91	279.74	7.17	867.61	9.21	1844.00	15.77	9238.36
15	5.12	316.19	12.70	4822.78	9.62	2100.95	11.47	3553.75
16	4.91	279.74	10.24	2529.49	5.12	316.19	11.47	3553.75
17	8.40	1394.68	6.76	727.22	5.73	444.22	2.66	44.46
18	7.17	867.61	5.53	398.30	6.96	795.35	5.32	355.67
19	3.07	68.30	10.85	3012.66	3.89	138.80	5.12	316.19
20	3.69	118.02	9.62	2100.95	6.14	546.37	5.12	316.19
21	6.96	795.35	2.66	44.46	5.94	493.53	4.30	187.40
22	2.46	34.97	3.48	99.42	5.53	398.30	3.89	138.80
23	0.41	0.16	3.28	82.89	6.35	602.85	6.55	663.09
Média	2.11	173.52	8.68	3341.68	12.56	8780.36	9.73	3915.77

**Tabela 5 – Energia eólica a produzir, na estação menos quente, 1 de julho de 2016.**

Hora	Caope		Kessua		Bibala		Onjiva	
	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]
0	0.00	0.00	15.36	8537.02	4.80	215.47	4.91	279.74
1	1.02	2.53	9.62	2100.95	5.94	493.53	6.35	602.85
2	0.00	0.00	6.35	602.85	5.94	493.53	4.30	187.40
3	0.00	0.00	0.20	0.02	5.94	493.53	5.28	82.89
4	0.20	0.02	3.48	99.42	7.37	944.13	8.60	1499.24
5	0.00	0.00	11.88	3948.27	6.55	663.09	5.12	316.19
6	0.00	0.00	0.20	0.02	6.55	663.09	8.60	1499.24
7	0.00	0.00	9.62	2100.95	6.35	602.85	6.76	727.22
8	0.41	0.16	11.26	3366.75	4.30	187.40	6.14	546.37
9	0.00	0.00	3.07	68.30	3.89	138.80	5.32	355.67
10	0.00	0.00	11.67	3747.55	7.37	944.13	10.44	2684.31
11	0.41	0.16	12.70	4822.78	5.32	355.67	13.72	6086.21
12	0.20	0.02	11.47	3553.75	8.60	1499.24	12.90	5089.93
13	0.00	0.00	6.55	663.09	9.42	1969.68	9.21	1844.00
14	0.00	0.00	7.78	1110.38	11.26	3366.75	9.21	1844.00
15	0.20	0.02	3.48	99.42	11.06	3186.43	11.26	3366.75
16	0.20	0.02	13.51	5817.74	11.67	3747.55	12.49	4593.17
17	0.00	0.00	9.62	2100.95	10.85	3012.66	10.85	3012.66
18	0.00	0.00	2.66	44.46	6.55	663.09	4.80	215.47
19	0.00	0.00	10.85	3012.66	5.12	316.19	5.73	444.22
20	9.62	2100.95	12.08	4156.03	5.94	493.53	7.58	1025.01
21	5.12	316.19	3.07	68.30	3.69	118.02	4.10	161.89
22	5.12	316.19	13.72	6086.21	4.71	246.21	4.71	246.21
23	1.84	14.75	14.54	7242.65	6.55	663.09	4.30	187.40
Média	1.02	114.63	8.53	2639.61	6.89	1061.57	7.52	1536.17

Kessua teve a maior potência estimada, com mais de 25026,71 kW, seguida por Onjiva (14533,31 kW) e Bibala (9351,48 kW). Caope teve a menor potência estimada, com 3005,74 kW, Tabela 6. Kessua e Onjiva também registraram altas velocidades do vento (21,30 m/s e 17,66 m/s, respectivamente), indicando bom potencial para produção de energia.

**Tabela 6 – Energia eólica a ser produzida durante o ano de 2016.**

Mês	Caope		Kessua		Bibala		Onjiva	
	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]	$V_2$ [m/s]	$P$ [kW]
Janeiro	12.49	4593.17	21.91	24789.86	9.42	1969.68	20.68	20849.07
Fevereiro	14.74	7553.01	21.91	24789.86	12.70	4822.78	24.98	36745.33
Março	11.67	3747.55	21.50	23425.59	7.58	1025.01	15.56	8883.08
Abril	10.03	2380.73	23.96	32410.09	14.33	6940.92	14.33	6940.92
Maio	7.58	1025.01	20.68	20849.07	19.25	16807.62	14.74	7553.01
Junho	9.21	1844.00	22.73	27675.25	19.86	18468.77	15.36	8537.02
Julho	8.40	1394.68	15.56	8883.08	18.43	14751.98	15.56	8883.08
Agosto	9.83	2237.93	21.30	22762.64	21.09	22112.32	15.97	9602.99
Setembro	10.24	2529.49	15.56	8883.08	10.44	2684.31	15.56	8883.08
Outubro	10.65	2845.33	28.87	56725.72	13.51	5817.74	17.20	11993.90
Novembro	11.88	3948.27	25.60	39523.25	12.70	4822.78	18.43	14751.98
Dezembro	9.42	1969.68	15.97	9602.99	17.20	11993.90	23.55	30776.28
Média	10.51	3005.74	21.30	25026.71	14.71	9351.48	17.66	14533.31

Bibala teve os maiores valores de energia solar estimada, enquanto Kessua e Caope tiveram os menores. Onjiva destacou-se na produção de energia eólica anual, com Kessua liderando a produção eólica anual e Bibala e Onjiva a seguir, enquanto Caope teve a menor produção estimada, Tabela 7. Na estação mais quente, Bibala teve a maior potência eólica estimada (8780,36 kW), e na estação menos quente, Kessua destacou-se (2639,61 kW), Tabela 7.

**Tabela 7 – Quadro comparativo por regiões.**

Região	Potência solar [W]			Potência eólica [kW]		
	29 de Maio	1 de Julho	Anual	29 de Maio	1 de Julho	Anual
Caope	99.56	76.34	41.89	173.52	114.63	3005.74
Kessua	107.70	80.47	45.28	3341.68	2639.61	25026.71
Bibala	126.16	114.24	59.68	8780.36	1961.57	9351.48
Onjiva	117.79	107.06	62.29	3915.77	1536.17	14533.31

## 5 CONCLUSÕES

Angola tem condições ideais para a instalação de centrais fotovoltaicas devido à alta radiação solar. Na estação mais quente, a região sul, especialmente em Bibala e Onjiva, apresenta o maior potencial solar (126,16 W e 117,79 W, respetivamente). Mesmo na estação menos quente, Onjiva e Bibala continuam a destacar-se (62,29 W e 59,68 W). Em termos de potencial eólico, Bibala e Onjiva são notáveis na estação mais quente, enquanto Kessua é ideal na estação menos quente. Ambas as regiões norte e sul oferecem boas condições para a energia eólica.

## REFERÊNCIA

- Afonso Q. M. Antóno (2020)** Afonso Q. M. Antóno. *Estudo de Viabilidade das Energias Renováveis em Angola*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores)- Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- Asadnabizadeh (2020)** Majid Asadnabizadeh. Development of UN Framework Convention on Climate Change Negotiations under COP25: Article 6 of the Paris Agreement perspective. *Open Political Science*. 2, 1 (2020), 113–119. doi: 10.1515/openps-2019-0012.
- Barbieri and Daddi (2020)** Alessandro Barbieri and Martina Daddi. INTEGRATING HYDROLOGICAL CONSTRAINTS FOR HYDROPOWER IN ENERGY MODELS: The case study of the Zambezi River Basin in the Southern African Power Pool. *EGU General Assembly 2020*. (2020). doi: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11722>.
- Bento et al. (2019)** Pedro Bento et al. Daily operation optimization of a hybrid energy system considering a short-term electricity price forecast scheme. *Energies*. 12, 5 (2019). doi: 10.3390/en12050924.
- Boukhelkhal (2022)** Abdelaziz Boukhelkhal. Energy use, economic growth and CO2 emissions in Africa: does the environmental Kuznets curve hypothesis exist? New evidence from heterogeneous panel under cross-sectional dependence. *Environment, Development and Sustainability*. 24, 11 (2022), 13083–13110. doi: 10.1007/s10668-021-01983-z.
- Busby et al. (2014)** Joshua W. Busby et al. Climate security vulnerability in Africa mapping 3.01. *Political Geography*. 43, (2014), 51–67. doi: 10.1016/j.polgeo.2014.10.005.
- Castillo Esparcia and López Gómez (2021)** Antonio Castillo Esparcia and Sara López Gómez. Public opinion about climate change in United States, partisan view and media coverage of the 2019 United Nations climate change conference (COP 25) in Madrid. *Sustainability (Switzerland)*. 13, 7 (2021). doi: 10.3390/su13073926.
- Chu and Majumdar (2012)** Steven Chu and Arun Majumdar. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*. 488, 7411 (2012), 294–303. doi: 10.1038/nature11475.
- Dodds et al. (2023)** Klaus Dodds et al. The Russian invasion of Ukraine: implications for politics, territory and governance. *Territory, Politics, Governance*. 11, 8 (2023), 1519–1536. doi:

- 10.1080/21622671.2023.2256119.
- Gualtieri (2019)** Giovanni Gualtieri. A comprehensive review on wind resource extrapolation models applied in wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 102, December 2018 (2019), 215–233. doi: 10.1016/j.rser.2018.12.015.
- Halder et al. (2022)** Bijay Halder et al. Land Suitability Investigation for Solar Power Plant Using GIS, AHP and Multi-Criteria Decision Approach: A Case of Megacity Kolkata, West Bengal, India. *Sustainability (Switzerland)*. 14, 18 (2022). doi: 10.3390/su141811276.
- Hasanov et al. (2021)** Fakhri J. Hasanov et al. Theoretical Framework for the Carbon Emissions Effects of Technological Progress and Renewable Energy Consumption. *Sustainable Development*. 29, 5 (2021), 810–822. doi: 10.1002/sd.2175.
- He et al. (2023)** Hujun He et al. Risk Evaluation of Overseas Mining Investment Based on a Support Vector Machine. *Sustainability (Switzerland)*. 15, 1 (2023), 1–14. doi: 10.3390/su15010240.
- Hegedűs (2022)** Éva Hegedűs. Geopolitics and geoeconomics in funding humanitarian mine action - the case of Angola. *Insights into Regional Development*. 4, 4 (2022), 166–183. doi: 10.9770/ird.2022.4.4(10).
- Hryhorczuk et al. (2024)** Daniel Hryhorczuk et al. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 19, 1 (2024), 1–14. doi: 10.1186/s12995-023-00398-y.
- İnal et al. (2022)** Veysel İnal et al. The nexus between renewable energy, CO<sub>2</sub> emissions, and economic growth: Empirical evidence from African oil-producing countries. *Energy Reports*. 8, (2022), 1634–1643. doi: 10.1016/j.egy.2021.12.051.
- Karanfil and Omgba (2023)** Fatih Karanfil and Luc Désiré Omgba. The energy transition and export diversification in oil-dependent countries: The role of structural factors. *Ecological Economics*. 204, December 2021 (2023). doi: 10.1016/j.ecolecon.2022.107681.
- Khribich et al. (2021)** Abir Khribich et al. Causality nexus of renewable energy consumption and social development: Evidence from high-income countries. *Renewable Energy*. 169, (2021), 14–22. doi: 10.1016/j.renene.2021.01.005.
- Leon et al. (2022)** David A. Leon et al. The Russian invasion of Ukraine and its public health consequences. *The Lancet Regional Health - Europe*. 15, March (2022), 1–2. doi: 10.1016/j.lanepe.2022.100358.
- Liadze et al. (2022)** Iana Liadze et al. The Economic Costs of the Russia-Ukraine Conflict. *National Institute of Economic and Social Research 2022*. March (2022).
- Liobikienė and Butkus (2017)** Genovaitė Liobikienė and Mindaugas Butkus. The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy. *Renewable Energy*. 106, 2017 (2017), 298–309. doi: 10.1016/j.renene.2017.01.036.
- Liu and Lee (2024)** Tie Ying Liu and Chien Chiang Lee. Impacts of the Russia-Ukraine war on energy prices: evidence from OECD countries. *Policy Studies*. (2024), 1–33. doi: 10.1080/01442872.2024.2384431.
- Liu et al. (2023)** Yanbing Liu et al. Urban development and resource



- endowments shape natural resource utilization efficiency in Chinese cities. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 126, (2023), 806–816. doi: 10.1016/j.jes.2022.03.025.
- Mbah (2022)** Ruth Endam Mbah. Russian-Ukraine 2022 War : A Review of the Economic Impact of Russian-Ukraine Crisis on the USA , UK , Canada , and Europe. *Advances in Social Sciences Research Journal*. 9, 3 (2022). doi: 10.14738/assrj.93.12005.
- McKee and Murphy (2022)** Martin McKee and Adrianna Murphy. Russia invades Ukraine again: how can the health community respond? *BMJ (Clinical research ed.)*. 376, (2022), o548. doi: 10.1136/bmj.o548.
- Ndlela et al. (2023)** Nomihla Wandile Ndlela et al. Power Planning for a Reliable Southern African Regional Grid. *Energies*. 16, 3 (2023). doi: 10.3390/en16031028.
- Neammanee et al. (2007)** Bunlung Neammanee et al. Development of a wind turbine simulator for wind generator testing. *International Energy Journal*. 8, 1 (2007), 21–28.
- Neidhardt et al. (2022)** Michael Neidhardt et al. Automotive Electrification Challenges Shown by Real-World Driving Data and Lifecycle Assessment. *SSRN Electronic Journal*. (2022), 1–19. doi: 10.2139/ssrn.4064691.
- Oskouei et al. (2022)** Morteza Zare Oskouei et al. A Critical Review on the Impacts of Energy Storage Systems and Demand-Side Management Strategies in the Economic Operation of Renewable-Based Distribution Network. *Sustainability (Switzerland)*. 14, 4 (2022). doi: 10.3390/su14042110.
- Riedel and Špaček (2022)** Norman Hendrik Riedel and Miroslav Špaček. Challenges of Renewable Energy Sourcing in the Process Industries: The Example of the German Chemical Industry. *Sustainability (Switzerland)*. 14, 20 (2022). doi: 10.3390/su142013520.
- Riffonneau et al. (2011)** Yann Riffonneau et al. Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2, 3 (2011), 309–320. doi: 10.1109/TSTE.2011.2114901.
- Thapelo et al. (2021)** Tsaone Swaabow Thapelo et al. SASSCAL webSAPI: A web scraping application programming interface to support access to SASSCAL's weather data. *Data Science Journal*. 20, 1 (2021). doi: 10.5334/dsj-2021-024.
- Wang et al. (2023)** Zhoujie Wang et al. Oil and gas pathway to net-zero: Review and outlook. *Energy Strategy Reviews*. 45, November 2022 (2023), 101048. doi: 10.1016/j.esr.2022.101048.
- Woody et al. (2022)** Maxwell Woody et al. The role of pickup truck electrification in the decarbonization of light-duty vehicles. *Environmental Research Letters*. 17, 3 (2022). doi: 10.1088/1748-9326/ac5142.



## MODELAÇÃO E CONTROLO DE SUSPENSÃO REGENERATIVA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS COM GERADOR LINEAR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL COMUTADO

CHAMARE, JOAQUIM; MENDES, RUI; MARIANO, SÍLVIO; CALADO, M. DO  
ROSÁRIO

Universidade da Beira Interior e Instituto de Telecomunicações  
E-mails: [joaquim.armando.chamare@ubi.pt](mailto:joaquim.armando.chamare@ubi.pt); [rm@ubi.pt](mailto:rm@ubi.pt); [sm@ubi.pt](mailto:sm@ubi.pt);  
[rc@ubi.pt](mailto:rc@ubi.pt)

### RESUMO

Este artigo aborda a modelação e controlo de um sistema de suspensão regenerativa para veículos elétricos com um gerador linear de relutância variável comutado, utilizando uma combinação de controladores com lógica fuzzy e PI (Proporcional-Integral), desenvolvendo-se um algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) para obter a corrente de referência e a energia a produzir. O sistema de suspensão regenerativa é interessante por permitir a recuperação de energia cinética durante o processo de amortecimento do veículo a impactos e irregularidades na estrada. O gerador linear de relutância variável comutado (GLRVC) tornou-se uma alternativa para aplicações em veículos elétricos devido à sua simplicidade, estrutura sem ímanes, robustez e baixo custo. Apesar de todas estas características, e em comparação com outros geradores, o GLRVC apresenta algumas restrições como a ondulação de binário e o ruído acústico decorrente das suas características de operação. O artigo propõe um sistema de suspensão regenerativa com um GLRVC, utilizando-se um modelo matemático de  $\frac{1}{4}$  de um veículo ligeiro. O software Matlab foi usado para simular o comportamento do gerador e do sistema de controlo proposto. Os resultados demonstraram a eficácia do sistema proposto, com bons níveis de desempenho e possibilidade de aproveitamento energético da suspensão.

**Palavras-chave:** Suspensão Regenerativa, Controladores Fuzzy e PI, PSO, Eficiência energética, Gerador linear de relutância variável comutado, Veículo elétrico.

### ABSTRACT

*The paper discusses the modelling and control of a regenerative suspension system for Electric Vehicles with a linear switched reluctance generator (LSRG), using a combination of drivers with fuzzy logic and PI (Proportional-Integral) controllers. A particle swarm optimization (PSO)*

algorithm is used to obtain the reference current and the harvested energy. The regenerative suspension system is interesting because it allows the recovery of kinetic energy during the process of dampening impacts and irregularities on the road. The LSRG is a good alternative for electric vehicle applications due to its simplicity, magnet-free design, robustness, and reduced cost. Despite all these characteristics, and when compared with other generators, the LSRG presents some drawbacks such as torque ripple and acoustic noise resulting from its operation. This paper proposes a regenerative suspension system with a LSRG, using a mathematical model of  $\frac{1}{4}$  of a light electric vehicle. Matlab software was used to simulate the behavior of the generator and the proposed control approach. The results demonstrated the effectiveness of the proposed system, with good levels of performance and possibility of energy harvesting resulting from the suspension operation.

**Keywords:** Regenerative Suspension, Fuzzy and PI Controllers, PSO, Energy Efficiency, Linear Switched Reluctance Generator, Electric Vehicle.

## 1 INTRODUÇÃO

Os veículos elétricos surgem com mais ênfase na busca de alternativas à solução com emissões de gases poluentes provenientes dos veículos movidos a combustão (Cao *et al.*, 2021). O estudo dos sistemas de suspensão tem sido uma área de investigação em constante evolução na busca de maior eficiência energética e conforto (Shvetsova, 2024; Tabasi *et al.* 2024; Salmani *et al.*, 2024; Alhanouti and Gauterin, 2024).

O gerador linear de relutância variável comutado (GLRVC) é considerado uma das melhores opções para veículos elétricos por causa das suas vantagens de estrutura simples, baixo custo, alta confiabilidade, grande potência de geração e alta eficiência numa ampla gama de velocidade (Mendes, Calado, and Mariano, 2016; Abdalmagid, Bakr, and Emadi, 2023; Zhu, Wu, and Zhang, 2020).

É importante controlar a vibração no veículo para garantir estabilidade, conforto e segurança durante a condução (Caban *et al.*, 2021). Os sistemas de suspensão podem ser agrupados em suspensões ativa, semiativa e passiva (Jiregna and Sirata, 2020). A suspensão do veículo elétrico desempenha uma função fundamental devido à necessidade de elevar ao máximo a eficiência energética e garantir um andamento suave e silencioso (Long *et al.*, 2020; Qi *et al.*, 2022).

Este artigo tem como objetivo propor uma abordagem inovadora para o controlo de uma suspensão regenerativa com um GLRVC, usando técnicas de controlo PI e lógica fuzzy.

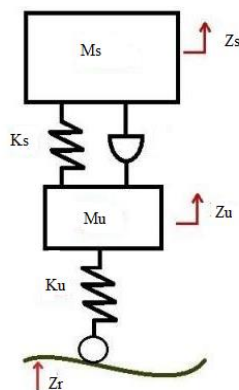
## 2 MODELAÇÃO DINÂMICA DO VEÍCULO

### 2.1 Suspensão ativa baseada no modelo de um quarto de carro

Geralmente, para análise de sistemas de suspensão de veículos, vários tipos de modelos foram adotados pelos investigadores. Os modelos mais comuns são: (1) modelo de um quarto de carro; (2) modelo de meio carro e (3) modelo de carro completo (Darabseh, Al-Yafeai, and Mourad, 2021; Abebe *et al.*, 2020).

O modelo simplificado da suspensão, com foco em apenas um quarto de carro considera principalmente o movimento na direção vertical ( $Z$ ), é bidimensional e usado em engenharia para análise e desenvolvimento de sistemas de suspensão (Abebe *et al.*, 2020); (Ebrahimi-Nejad, Kheybari, and Borujerd, 2020).

Na representação desse modelo, representa-se uma única roda como uma mola, mas, nalguns casos, ela pode ser tratada como uma combinação de uma mola e um amortecedor em paralelo. Assume-se que o amortecedor real suporta apenas um quarto do peso da massa total do carro, incluindo o peso do passageiro, Figura 1 (Abebe *et al.*, 2020; Ebrahimi-Nejad, Kheybari, and Borujerd, 2020).



**Figura 1- Sistema de suspensão ativa de um quarto de carro**

O diagrama de corpo livre é formulado, ilustração na Figura 2, considerando-se como ponto de referência das coordenadas a posição da massa suspensa e da massa não suspensa.

O modelo dinâmico do sistema de suspensão ativa é obtido pela aplicação da segunda lei de Newton a cada uma das massas, de acordo com (1).

$$\sum F = m * a \quad (1)$$

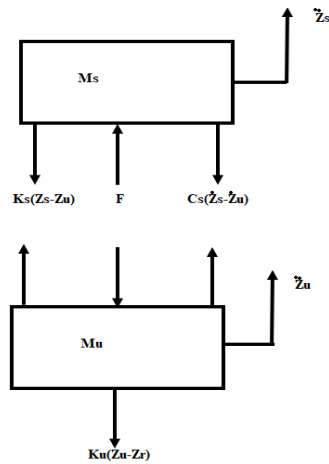
onde,  $\sum F$  = o somatório das forças;  
 $m$  = massa;  
 $a$  = aceleração.

O comportamento dinâmico do sistema ativo é obtido das equações diferenciais de segunda ordem (2) e (3).

$$M_s \ddot{Z}_s - K_s(Z_s - Z_u) - C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) - F = 0 \quad (2)$$

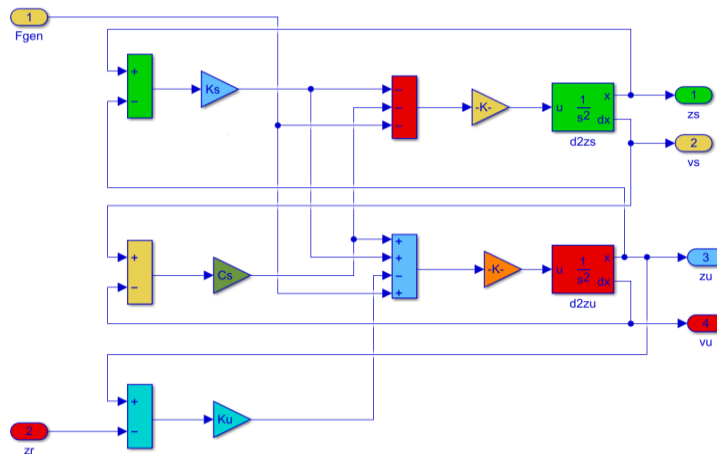
$$M_u \ddot{Z}_u + K_s(Z_s - Z_u) + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) - K_u(Z_u - Z_r) + F \quad (3)$$

- onde,
- $M_s$  = massa suspensa;
  - $Z_s$  = deslocamento de massa suspensa;
  - $M_u$  = massa do conjunto pneu-roda;
  - $Z_u$  = deslocamento de massa não suspensa;
  - $K_s$  = rigidez da mola;
  - $C_s$  = coeficiente de amortecimento;
  - $K_u$  = rigidez do pneu;
  - $Z_r$  = deslocamento da roda;
  - $F$  = força do atuador.



**Figura 2 - Diagrama do corpo livre**

A Figura 3 representa o modelo da suspensão no Simulink.



**Figura 3 – Modelação da suspensão no Simulink**

## 2.2 Modelo Dinâmico do GLRVC

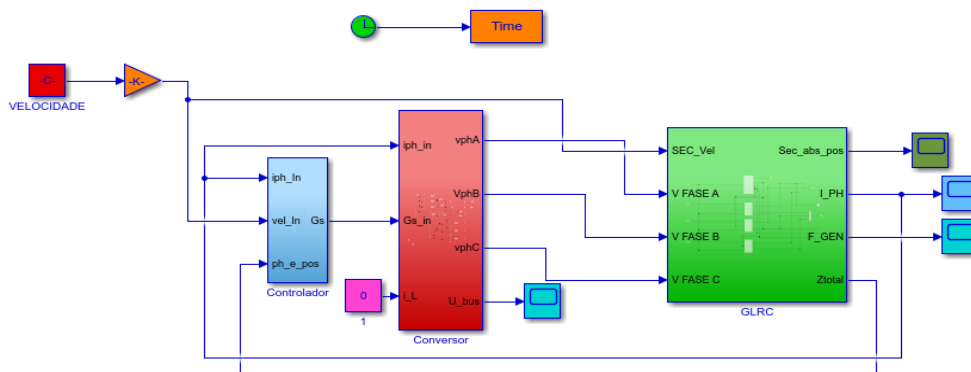
A Figura 4 mostra o modelo dinâmico do GLRVC, que inclui o conversor responsável pelo processo de excitação das fases do gerador e a da geração de energia. Durante o período de excitação, para uma dada posição ( $x_{on}$ ), uma fase dos enrolamentos do GLRVC é excitada através da aplicação de uma tensão de alimentação, sendo a energia gerada

armazenada no campo (Zhu, Wu, and Zhang, 2020);(Mendes, Calado, and Mariano, 2016).

O modelo dinâmico do GLRVC é obtido das equações elétricas de cada uma das fases, de acordo com (4):

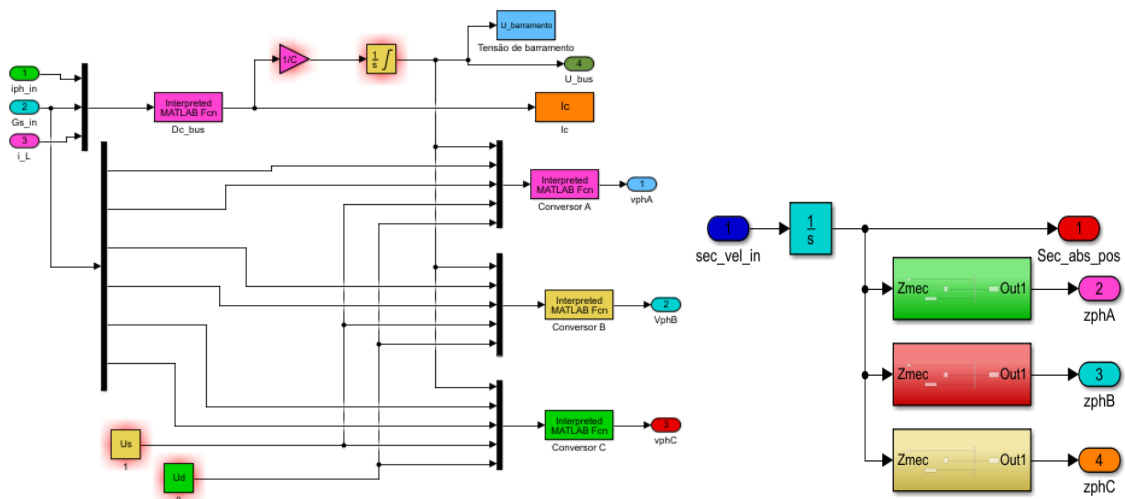
$$u_k = R_{ak}i_k + (L_k(Z_k, i_k) + i_k \frac{dL_k(Z_k, i_k)}{di_k}) \frac{di_k}{dt} + vi_k \frac{dL_k(Z_k, i_k)}{di_k} \quad (4)$$

- onde,
- $u_k$  = tensão aplicada aos terminais de cada fase  $k$ ;
  - $R_{ak}$  = resistência interna dos enrolamentos;
  - $i_k$  = corrente elétrica;
  - $L_k$  = indutância própria de cada fase;
  - $v$  = velocidade linear do secundário;
  - $Z_k$  = posição elétrica da fase.



**Figura 4 - Modelo dinâmico do gerador**

Os vários diagramas de blocos que constituem a Figura 4 são apresentados nas Figura 5 a Figura 7. A Figura 8 mostra as formas de onda típicas para a corrente, fluxo e indutância.



**Figura 5 - Bloco do conversor e Bloco de relação entre posições mecânica e elétrica**

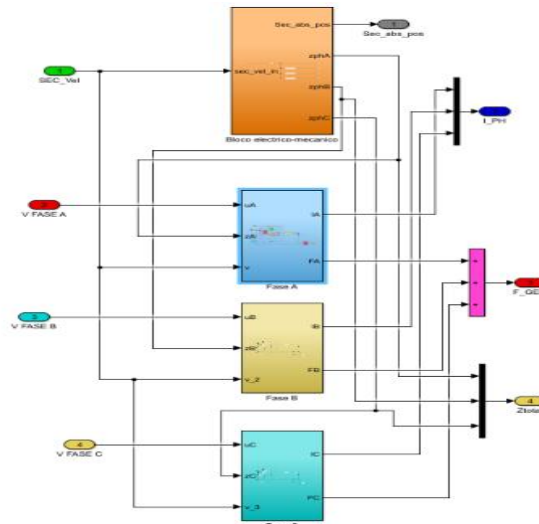


Figura 6 - Bloco do GLRVC

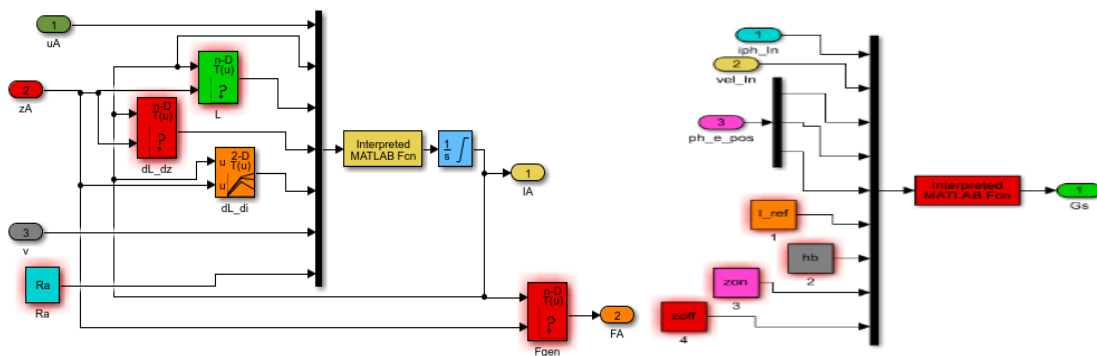


Figura 7 - Bloco da fase A e Bloco do controlador

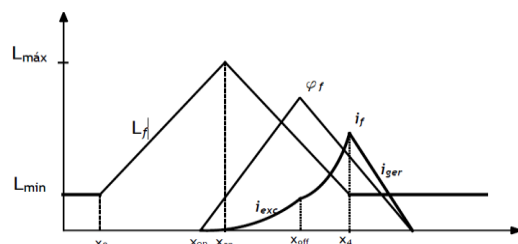
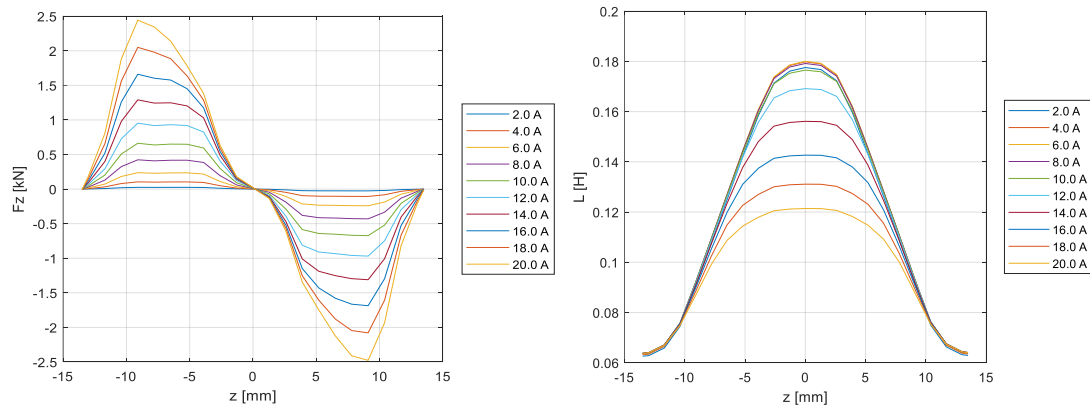


Figura 8 - Formas de onda típicas para a corrente ( $i_f$ ), fluxo ( $\varphi_f$ ) e indutância ( $L_f$ )

### 2.3 Características Eletromagnéticas do gerador

As características eletromagnéticas do GLRVC utilizadas neste estudo foram determinadas pelo método de elementos finitos (FEM) através do software de acesso gratuito Finite Element Method Magnetics (FEMM). Para cada simulação, foi adoptado o modelo axi-simétrico da máquina e a solução foi calculada para uma tolerância relativa de  $1 \times 10^{-8}$ .

Como as características eletromagnéticas para as três fases são idênticas, as simulações, considerou-se somente a fase A. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 9.



**Figura 9 - Características eletromagnéticas do gerador: Força ( $F_z$ ) e Indutância ( $L_f$ ) em função da posição ( $Z$ )**

### 3 MODELAÇÃO DOS CONTROLADORES DO GERADOR E DO VEÍCULO ELÉTRICO

#### 3.1 Controlador PI com Otimização por enxame de partículas

A otimização por enxame de partículas (PSO) é uma heurística inspirada no modelo social dos enxames de pássaros e cardumes de peixes, adotado para a resolução de problemas não lineares com variáveis contínuas, e foi desenvolvida por J. Kennedy e R. Eberhart em 1995. A otimização PSO começa pela inicialização aleatória da posição atual e a velocidade de todas as partículas e, em seguida, enquanto o critério de paragem não é atingido (normalmente número de iterações), em cada iteração, é calculado o valor de aptidão (fitness) para cada partícula, sendo atualizado o melhor valor local de cada uma ( $P_{best}$ ) e o melhor valor global ( $G_{best}$ ). Depois de todas as partículas estarem tratadas, são calculadas as novas velocidades e posições de todas as partículas de acordo com sua própria experiência e a dos vizinhos (5) (Mapa and Gurumoorthy, 2022). A nova posição para a iteração  $k$  é calculada através de (6).

$$V_i^k = V_i^{k-1} + c_1 r_1 [P_{best,i} - X_i^{k-1}] + c_2 r_2 [G_{best,i} - X_i^{k-1}] \quad (5)$$

$$X_i^k = X_i^{k-1} + V_i^k \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

onde,

- $c_1; c_2$  = taxas de aprendizagem individual e de grupo;
- $r_1; r_2$  = números aleatórios gerados a partir de uma distribuição uniforme entre 0 e 1;
- $P_{best,i}$  = melhor posição individual;
- $G_{best,i}$  = melhor posição global;
- $w$  = fator de inércia;
- $X_{ij}$  = posição da partícula;
- $V_i^k$  = velocidade da partícula.



A lógica de controlo pode ser descrita da seguinte forma:

- 1- Inicialização da população: Inicialmente, são atribuídas uma velocidade e uma posição aleatórias para cada partícula;
- 2- Avaliação: Cálculo da aptidão da população de N partículas utilizando-se a função fitness;
- 3- Atualização dos parâmetros globais: Atualizar os valores de melhor posição de cada partícula ( $P_{best,i}$ ) e a melhor posição encontrada pelo enxame ( $G_{best,i}$ );
- 4- Velocidade e Posição: Atualizar a posição e a velocidade de cada partícula de acordo com (5) e (6);
- 5- Verificar a convergência da solução actual: Se os critérios de convergência não forem verificados, é repetido o procedimento indicado no passo 4. O número da iteração é atualizado para  $k = k + 1$  e são identificados os novos valores de  $P_{best,i}$  e  $G_{best,i}$ . O processo iterativo é repetido até se verificarem os critérios de convergência.

O controlador PI é o mais utilizado atualmente industrialmente, sendo necessário determinar os valores apropriados dos ganhos proporcional e integral ( $K_p$  e  $K_I$ ) para que o controlador seja estável, de acordo com (7). O algoritmo PSO é utilizado para calcular os ganhos de modo a minimizar o erro da força do gerador e o valor de referência de acordo com (8) (Du et al., 2023) e cuja função objetivo é determinada pelo índice de desempenho do integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo (ITAE), e definida por (9).

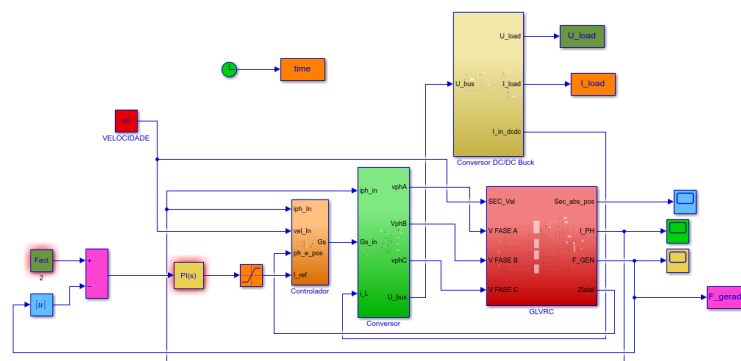
$$u_{-}(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

onde,  $u_{-}(t)$  = variável de controlo;  
 $K_p$  = ganho proporcional;  
 $K_I$  = ganho integral;  
 $e(t)$  = erro associado à grandeza a controlar.

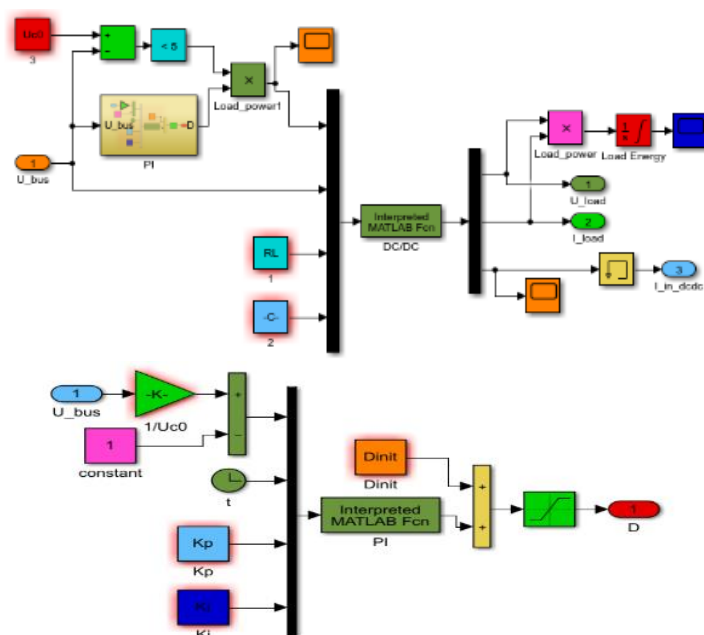
$$e(t) = F_{at} - F_{gerador}(t) \quad (8)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t e(t) dt \quad (9)$$

A Figura 10 mostra o modelo para simulação do controlo de força do gerador com o controlador PI, com os parâmetros otimizados com o PSO, e a Figura 11 o conversor DC\_DC Buck.



**Figura 10 - Gerador com controlo de força PI**



**Figura 11 - Bloco Conversor de DC\_DC Buck Isolado e Bloco PI**

### 3.2 Controlador Fuzzy

A lógica fuzzy envolve a definição das variáveis de entrada e de saída, um conjunto de regras, funções de pertinência e inferência difusa para mapear as condições do sistema em ações de controle apropriadas. O número de regras num sistema de controle fuzzy é igual ao produto cartesiano do número de funções de pertinência pelo número de variáveis de controle envolvidas (Caiado *et al.*, 2021; Varshney and Torra, 2023). Existem duas entradas para o controlador usado na suspensão ativa: a velocidade e a aceleração e uma saída, a força desejada do gerador. A relação entre estas variáveis define as regras de tomada de decisão do controlador. Cada regra é uma condição ou conjunto de condições nas variáveis de entrada, juntamente com uma conclusão sobre a variável de saída, Tabela 1 (Kumar *et al.*, 2022).

**Tabela 1 - Regras fuzzy**

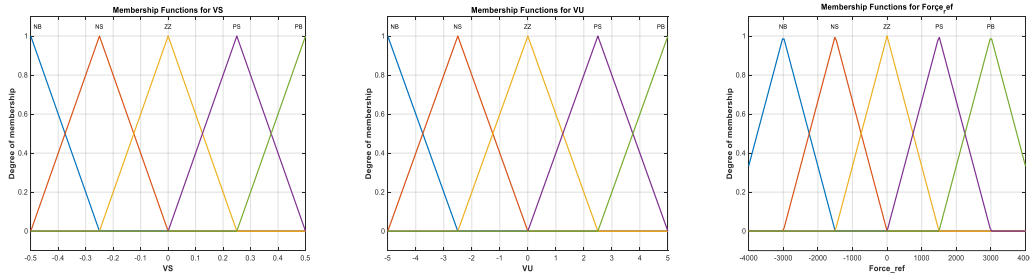
$F_{at}$		$V_U$				
		NB	NS	ZZ	PS	PB
$V_S$	NB	PS	PS	PS	PG	PG
	NS	PS	PS	PS	PS	PG
	ZZ	NS	NS	ZZ	PS	PM
	PS	NB	NS	NS	NS	NS
	PB	NB	NB	NS	NS	NS

$F_{at}$  - Força do atuador;  $V_S$  - velocidade da carroceria;  $V_U$  - velocidade relativa entre a carroceria e a roda, NB – grande negativo; NS – pequeno negativo; ZZ – zero; PS – pequeno positivo; PB – grande positivo.

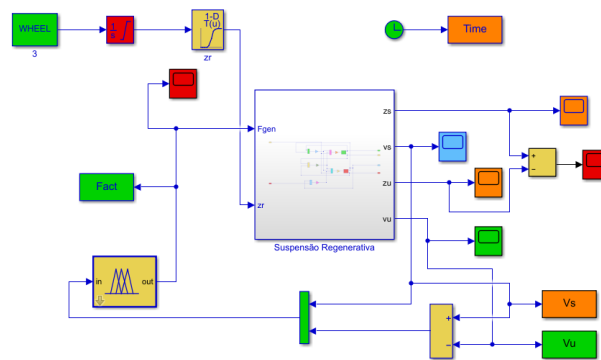
O método de inferência fuzzy Mamdani foi o escolhido neste estudo, sendo as funções de pertinência triangulares, com 25 regras (Valentim da

Silva, Bonventi Jr., 2019; Yin, Su, and Ma, 2023; Abut and Salkim, 2023; Jan *et al.*, 2021).

A Figura 12 mostra as funções de pertinência adotadas, para a velocidade vertical da carroceria ( $V_s$ ) e a velocidade relativa entre a carroceria e a roda ( $V_U$ ), bem como para a saída de força de referência do atuador ( $F_{at}$ ). Na Figura 13 mostra-se o modelo simulink para o sistema controlado.



**Figura 12 - Funções de pertinência das entradas e da saída do controlador**



**Figura 13 – Modelo suspensão Simulink do sistema controlado**

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo-se implementado um controlador PI com otimização por PSO (25 partículas e 100 iterações) para obtenção dos ganhos proporcional e integral, Tabela 2, e lógica fuzzy para obtenção da força de referência do gerador, simulou-se em ambiente MATLAB/Simulink o sistema completo da suspensão ativa, considerando um veículo ligeiro com os parâmetros da Tabela 3, (Guo *et al.*, 2016).

**Tabela 2 - Parâmetros otimizados do controlador PI**

Ganhos	Valor
$K_P$	2.759
$K_I$	0.02

**Tabela 3 - Parâmetros do veículo**

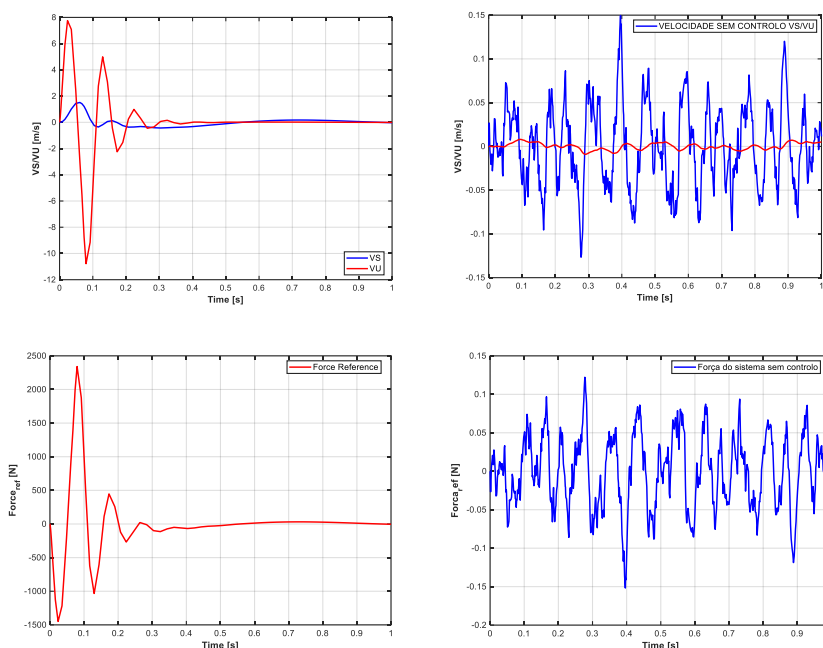
$M_S$ [kg]	$M_u$ [kg]	$K_S$ [kN/m]	$K_u$ [kN/m]	$C_s$ [kNs/m]
240	36	16	160	0,98

A Tabela 4 mostra os valores da banda de histerese ( $h_b$ ) e das posições de início e de fim do período excitação ( $x_{on}$  e  $x_{off}$ ) que maximizam a geração de energia, para cada combinação dos valores da corrente de referência ( $I_{ref}$ ) e da velocidade ( $v$ ).

**Tabela 4 - Valores óptimos obtidos na simulação do modelo do gerador**

$v$ [m/s]	$I_{ref}$ [A]	$h_b$ [%]	$x_{on}$ [mm]	$x_{off}$ [mm]
0.1	2	2	-6.75	10.57
0.1	6.5	2	-6.75	1.80
0.1	11	2	2.25	10.80
0.1	15.5	2	-6.75	10.57
0.1	20	2	-6.75	10.57
0.92	2	2	-2.25	12.15
0.92	6.5	2	4.50	10.12
0.92	11	2	2.25	10.80
0.92	15.5	2	-6.75	10.57
0.92	20	2	-6.75	10.57
1.73	2	2	-4.5	12.82
1.73	6.5	2	-4.5	9.90
1.73	11	2	2.25	10.80
1.73	15.5	2	-6.75	10.57
1.73	20	2	-6.75	10.57
2.55	2	2	-2.25	12.15
2.55	6.5	2	-2.25	12.82
2.55	11	2	-4.5	9.90
2.55	15.5	2	-6.75	10.57
2.55	20	2	4.5	10.12
3.36	2	2	-2.25	12.15
3.36	6.5	2	-2.25	12.15
3.36	11	2	-4.5	12.82
3.36	15.5	2	-6.75	10.57
3.36	20	2	-4.5	4.05
4.18	2	2	-2.25	12.82
4.18	6.5	2	-4.5	6.97
4.18	11	2	-4.5	9.90
4.18	15.5	2	-2.25	6.30
4.18	20	2	-2.25	6.30
5	2	2	-2.25	12.15
5	6.5	2	-4.5	6.97
5	11	2	-4.5	12.82
5	15.5	2	-2.25	6.3
5	20	2	-2.25	6.3

Com o controlador com lógica Fuzzy foi possível obter a força de atuação, ou de referência, necessária. Na Figura 14, mostram-se as duas velocidades, com controlo e sem controlo das componentes do sistema de suspensão, e a força sem controlo e com controlo, esta última ajustada dinamicamente com o objetivo de compensar as vibrações e as oscilações durante a marcha.



**Figura 14 - Velocidades e Força de atuação do sistema da suspensão ativa**

Da Norma ISO 8608, Tabela 5, as estradas são representadas por perfis, listados de A a H, (Agostinacchio, Ciampa, and Olita, 2014).

O desempenho do sistema regenerativo foi avaliado para as classes A e H, calculando-se a potência média elétrica  $P_m$ , pelas equações (10) e (11), onde  $U_{LOAD}$  é tensão de carga e  $I_{LOAD}$  a corrente de carga.

$$P = U_{LOAD} I_{LOAD} \quad (10)$$

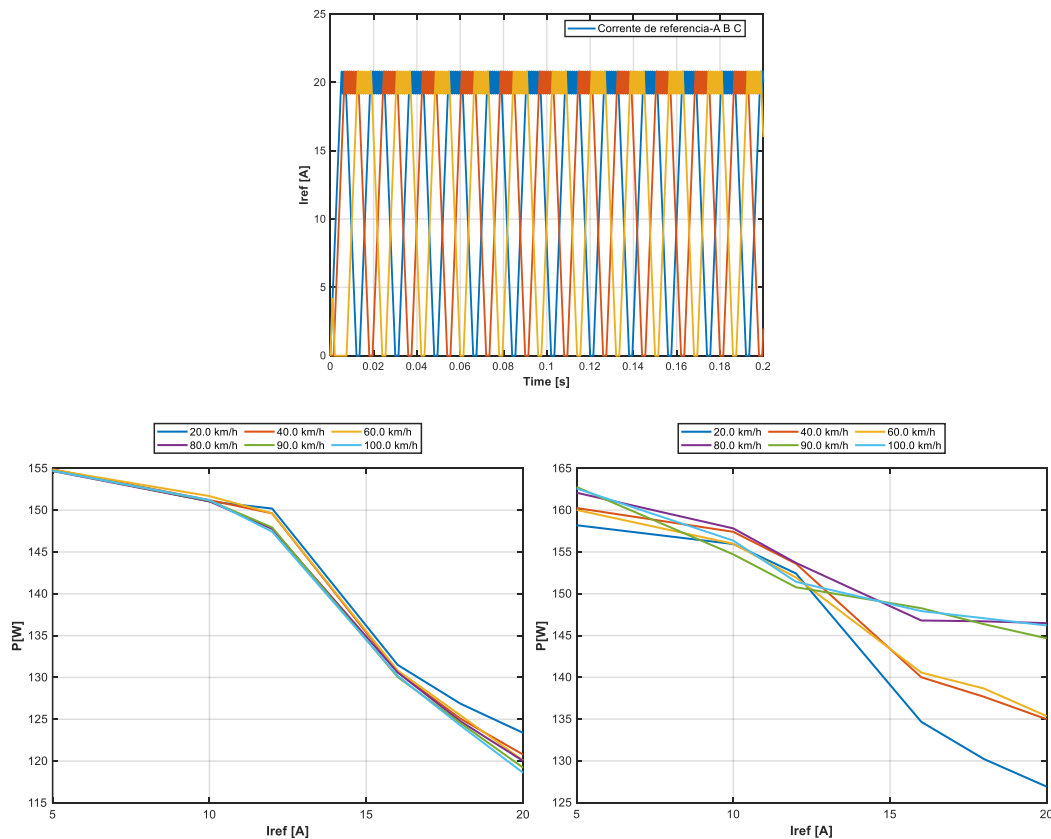
$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T P dt \quad (11)$$

**Tabela 5 - Valores ISO 8608 de Classe de Estrada ( $G_d(n_0)$  e  $G_d(\Omega_0)$ )**

Classe de estrada	$G_d(n_0)(10^{-6}m^3)$		$G_d(\Omega_0)(10^{-6}m^3)$	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
A(Muito boa)	---	32	---	2
B(Boa)	32	128	2	8
C(Média)	128	512	8	32
D(Má)	512	2048	32	128
E	2048	8192	128	512
F	8192	32768	512	2048
G	32768	131072	2048	8192
H	131072	---	8191	---
	$n_0 = 0.1\text{ciclos/m}$		$\Omega_0 = 1\text{rad/m}$	

$G_d(n_0)$ ,  $G_d(\Omega_0)$  correspondem, respetivamente, aos deslocamentos verticais, funções das frequências espacial  $n_0$  e angular  $\Omega_0$ . Nas simulações realizadas foram consideradas para a velocidade do veículo os valores de 20, 40, 60, 80, 90 e 100 km/h, e para a corrente de referência os valores de 5, 10, 12, 16, 18 e 20 A.

Os valores médios da potência elétrica gerada em função da corrente de referência, são mostrados na Figura 15, na qual as potências máximas geradas são 154.8 W para o perfil de estrada A e 162.6 W para o perfil de estrada H.



**Figura 15 - Corrente de referência das três fases do gerador e Potências geradas com perfis de estrada A e H**

## 5 CONCLUSÕES

O uso do controlador PI com controlo fuzzy de uma suspensão regenerativa para veículos eléctricos, utilizando um GLRVC, representa uma abordagem promissora para melhorar o desempenho energético e a adaptabilidade do veículo.

Com uma adequada seleção das funções de pertinência do controlador fuzzy, foi possível a redução da vibrações de maneira diligente, porque a logica fuzzy lida bem com incertezas e não linearidades do sistema de suspensão. Uma boa função de pertinência permite ajustar o sistema às condições de operação, influenciadas, por exemplo, pelo perfil da estrada, permitindo o controlo eficaz das vibrações.

Também, e no contexto da otimização da geração de energia, e aumento da eficiência do sistema, a seleção apropriada das funções de pertinência permitem ao controlador fuzzy maximizar o desempenho dinâmico. Funções de pertinência que capturam adequadamente os níveis ótimos de entrada podem ajustar as saídas para maximizar da produção de energia, mesmo em condições variáveis.

## REFERÊNCIAS

- Abdalmagid, Mohamed, Mohamed H. Bakr, and Ali Emadi. 2023. "A Linesearch-Based Algorithm for Topology and Generative Optimization of Switched Reluctance Machines." **IEEE Transactions on Transportation Electrification** 9(3): 3849–66.
- Abebe, Biniyam Ayele et al. 2020. "Non-Linear Mathematical Modelling for Quarter Car Suspension Model." **International Journal on Emerging Technologies** 11(5): 536–44.
- Abut, Tayfun, and Enver Salkim. 2023. "Control of Quarter-Car Active Suspension System Based on Optimized Fuzzy Linear Quadratic Regulator Control Method." **Applied Sciences** (Switzerland) 13(15).
- Agostinacchio, M, D Ciampa, and S Olita. 2014. "The Vibrations Induced by Surface Irregularities in Road Pavements – a Matlab® Approach." **European Transport Research Review** 267–75.
- Alhanouti, Muhammed, and Frank Gauterin. 2024. "A Generic Model for Accurate Energy Estimation of Electric Vehicles." **Energies** 17(2).
- Caban, Jacek et al. 2021. "Possibilities of Energy Harvesting from the Suspension System of the Internal Combustion Engine in a Vehicle." **Communications - Scientific Letters of the University of Žilina** 23(2): B106–16.
- Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão et al. 2021. "A Fuzzy Rule-Based Industry 4.0 Maturity Model for Operations and Supply Chain Management." **International Journal of Production Economics** 231.
- Cao, Jidi, Xin Chen, Rui Qiu, and Shuhua Hou. 2021. "Electric Vehicle Industry Sustainable Development with a Stakeholder Engagement System." **Technology in Society** 67: 101771.
- Darabseh, Tariq, Doaa Al-Yafeai, and Abdel-Hamid Ismail Mourad. 2021. "Energy Harvesting from Car Suspension System: Mathematical Approach for Half Car Model." **Journal of Mechanical Engineering and Sciences** 15(1): 7695–7714.
- Du, Zhaoping, Fang Yufan, Xiaofei Yang, and Jianzhen Li. 2023. "Design of PI Controller for a Class of Discrete Cascade Control Systems." **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering** 20(4): 2607–15.
- Ebrahimi-Nejad, Salman, Majid Kheybari, and Seyed Vahid Nourbakhsh Borujerd. 2020. "Multi-Objective Optimization of a Sports Car Suspension System Using Simplified Quarter-Car Models." **Mechanics and Industry** 21(4).
- Guo, Sijing et al. 2016. "Performance Evaluation and Parameter Sensitivity of Energy-Harvesting Shock Absorbers on Different Vehicles." **Vehicle System Dynamics** 54(7): 918–42.
- Jan, Mishkat Ullah et al. 2021. "Frequency Regulation of an Isolated Microgrid with Electric Vehicles and Energy Storage System Integration Using Adaptive and Model Predictive Controllers." **IEEE Access** 9: 14958–70.
- Jiregna, Iyasu T., and Goffila Sirata. 2020. "A Review of the Vehicle Suspension System." **Journal of Mechanical and Energy Engineering** 4(2): 109–14.
- Kumar, Shailendra, Amit Medhavi, Raghuvir Kumar, and P. K. Mall. 2022. "Modeling and Analysis of Active Full Vehicle Suspension Model Optimized Using the Advanced Fuzzy Logic Controller." **International Journal of Acoustics and Vibrations** 27(1): 26–36.

- Long, Guimin et al. 2020. "Regenerative Active Suspension System with Residual Energy for In-Wheel Motor Driven Electric Vehicle." **Applied Energy** 260(June 2019): 114180. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114180>.
- Mapa, Swagata, and Bhuvaneshwari Gurumoorthy. 2022. "Maximum Power Extraction from a Switched Reluctance Generator Based Wind Power Generating System Using Optimization Techniques." **Engineering Reports** 4(2): 1–14.
- Mendes, Rui Pedro Gouveia, Maria do Rosário Alves Calado, and Sílvia José Pinto Simões Mariano. 2016. "Control and Dynamic Simulation of Linear Switched Reluctance Generators for Direct Drive Conversion Systems." **Intech**.
- Qi, Lingfei et al. 2022. "A Review of Vibration Energy Harvesting in Rail Transportation Field." **iScience** 25(3): 103849. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103849>.
- Salmani, H., A. Rezazadeh, and N. Sedighizadeh. 2024. "Robust Stochastic Blockchain Model for Peer-to-Peer Energy Trading Among Charging Stations of Electric Vehicles." **Journal of Operation and Automation in Power Engineering** 12(1): 54–68.
- Shvetsova, Svetlana. 2024. "Increasing the Attractiveness of Electric Vehicles for Consumers in Cold Climates." **E3S Web of Conferences** 471.
- Tabasi, Maliheh, John M. Rose, Andrea Pellegrini, and Taha Hossein Rashidi. 2024. "An Empirical Investigation of the Distribution of Travellers' Willingness-to-Pay: A Comparison between a Parametric and Nonparametric Approach." **Transport Policy** 146 (December 2023): 312–21. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.12.006>.
- Valentim da Silva, Neusa, and Waldemar Bonventi Jr. 2020. "Controle de Suspensão Ativa Automotiva Por Lógica Difusa." **Na era da Automação** 2067–72.
- Varshney, Ayush K., and Vicenç Torra. 2023. "Literature Review of the Recent Trends and Applications in Various Fuzzy Rule-Based Systems." **International Journal of Fuzzy Systems** 25(6): 2163–86.
- Yin, Zongjun, Rong Su, and Xuegang Ma. 2023. "Dynamic Responses of 8-DoF Vehicle with Active Suspension: Fuzzy-PID Control." **World Electric Vehicle Journal** 14(9).
- Zhu, Yueying, Hao Wu, and Junxia Zhang. 2020. "Regenerative Braking Control Strategy for Electric Vehicles Based on Optimization of Switched Reluctance Generator Drive System." **IEEE Access** 8: 76671–82.





## PLUVIÔMETRO AUTOMATIZADO COM MONITORAMENTO EM TEMPO REAL

### TÍTULO

MENDES, WILLIANS(1); BOMBARDA, JOÃO VICTOR (2)

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, E-mail: [willians.mendes@ifmt.edu.br](mailto:willians.mendes@ifmt.edu.br)

(2) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, E-mail: [bombarda.eng@gmail.com](mailto:bombarda.eng@gmail.com)

### RESUMO

O pluviômetro é um equipamento de grande relevância no meio rural, sendo responsável por monitorar a quantidade de chuvas ocorridas em um determinado período. Ter conhecimento sobre a precipitação pluviométrica é de fundamental importância para o produtor rural, pois, a água é um recurso essencial em todas as etapas do cultivo, desde o monitoramento para ser liberado o plantio até o seu completo desenvolvimento e colheita. Atualmente são poucas opções de pluviômetros oferecidas no mercado, além do preço de custo elevado e muitas vezes vinculado a uma assinatura anual. Surge então como proposta o pluviômetro automatizado que conta com integração a internet das coisas (IoT), oferecendo um monitoramento confiável e com menor custo e possuindo alimentação com módulos fotovoltaicos, banco de baterias e visualização remota via web ou aplicativo mobile. Neste artigo será discutido uma metodologia para construção de um pluviômetro tipo balde basculante de baixo custo será projetado e construído. Nos testes de calibração e validação do equipamento proposto observou-se uma precisão satisfatória de 97 % dos valores de precipitação pluviométrica, assim como, o correto funcionamento do seu sistema de energia, do envio de informações e a visualização via web e aplicativo.

**Palavras-chave:** Precipitação, Pluviômetro, IoT, Supervisório.

### ABSTRACT

*Knowing rainfall is of fundamental importance for rural producers, since water is an essential resource in all stages of cultivation, from monitoring to release planting to its complete development and harvest. There are few rain gauge options on the market, in addition to the high cost, which is often linked to an annual subscription. Then, the automated rain gauge that integrates with the Internet of Things (IoT) emerges as a proposal, offering reliable monitoring at a lower cost and having power with*

*photovoltaic modules, battery bank, and remote viewing via web or mobile application. This article will discuss a methodology for building a low-cost tipping bucket rain gauge that will be designed and built. In the calibration and validation tests of the proposed equipment, a satisfactory accuracy of 97% of the rainfall values was observed, as well as the correct functioning of its energy system, the sending of information and visualization via the web and application.*

**Keywords:** *Precipitation, Rain Gauge, IoT, Supervisory.*

## **1 INTRODUÇÃO**

O Brasil tem importante destaque, quando relacionado a América Latina, sendo um dos maiores produtores mundiais de alimento e com grande extensão de terra para a utilização agropecuária. Porém, esse potencial de expansão dos campos é afetado pelas preocupações ambientais e preservação das vegetações nativas (SAATH e FACHINELLO, 2018).

Por outro lado, o crescimento da fronteira agrícola é bastante restringido. O planeta conta com reservas de terras volumosas, com potencial para se tornarem terras produtivas (IPEA, 2022), o aperfeiçoamento da produtividade é um caminho fundamental para ampliar a oferta de alimentos. Esse ganho de produção é obtido através de vários fatores como: manejo correto do solo, utilização de insumos de qualidade, manejo integrado de pragas, manejo de plantas daninhas, mecanização da propriedade, agricultura de precisão e outros (SILVA, 2020).

Os pluviômetros, equipamentos que realizam esse monitoramento das precipitações de chuva ocorrida em determinado período, e indicar através de sua escala linear, a quantidade da precipitação pluviométrica em mm. A quantidade de precipitação deve ser conferida no local do equipamento, registrada e em seguida, descartada, para que possa mensurar novamente a próxima precipitação (VINÃS, 2022).

Apesar da sua importância, o pluviômetro é um equipamento que já está em uso a muitos anos pela humanidade, e conseqüentemente vem sendo aperfeiçoado no decorrer do tempo. Em 1441, ao realizar medições no palácio ele notou que seria mais adequado usar um recipiente padrão em contrapartida de cavar a terra para conferir os níveis de água (ALEMÃO, 2021).

Com o avanço da eletrônica e da tecnologia, através da comunicação IoT (*Internet of Things*), os pluviômetros apresentaram grandes avanços em seu funcionamento, como por exemplo, o uso de um microcontrolador, que tornou possível a leitura, processamento e envio de informações remotas, evitando custos de deslocamentos, tempo e mão de obra, antes destacados para realização dessa tarefa (SOKOLOVA, 2021).

O custo relativamente alto de pluviômetros comerciais, sistemas de comunicação e software de pós-processamento é a principal razão pela

qual a coleta dos valores de precipitação e a densidade da rede de monitoramento ainda é um desafio, especialmente nos países em desenvolvimento (FERREIRA et al., 2017).

Neste artigo será discutido uma metodologia para construção de um pluviômetro tipo balde basculante de baixo custo será projetado e construído. A eletrônica e o software do medidor utilizaram um microcontrolador de código aberto, com o corpo do medidor impresso em uma impressora 3D usando uma tecnologia de fabricação de filamentos fundidos e um polímero termoplástico.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Precipitação**

A precipitação é definida como: toda água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre. Neblina, chuva, granizo e orvalho são algumas de suas diferentes formas. Podemos diferenciar os tipos de precipitação considerando o estado em que a água é depositada (TUCCI, 2004).

A precipitação pluviométrica é uma medida essencial para o monitoramento hidrológico e climatológico, representando a quantidade de água que se acumula sobre uma superfície plana, horizontal e impermeável. Essa medida, conhecida como altura pluviométrica, é expressa em milímetros (mm) e obtida por meio de instrumentos chamados pluviômetros (JUNIOR, 2022).

Cada milímetro de chuva corresponde a 1 litro de água acumulado em uma área de 1 metro quadrado (1 m<sup>2</sup>). Portanto, quando se afirma que choveu 10 mm, significa que, em uma área de 1 m<sup>2</sup>, a precipitação foi suficiente para formar uma lâmina de água com 10 mm de altura. Esse dado é fundamental para a gestão de recursos hídricos e para a prevenção de enchentes, além de ser utilizado em análises agrícolas e estudos sobre mudanças climáticas (COLLISCHONN e DORNELLES, 2021).

Será considerada chuva fraca a precipitação de até 2,5 mm por hora, caracterizada por gotas isoladas, identificadas facilmente, quando ocorre de forma uniforme é definida como garoa. Já para chuvas entre 2,5 e 7,5 mm por hora, podem ser classificadas como chuva moderada, sendo formadas também por gotas isolada, porém, apresentam dificuldade para serem observadas. Por fim, as precipitações com intensidade superior a 7,5 mm por hora, são consideradas chuva forte, caracteriza-se por cair em forma de "lençóis", não possibilitando a identificação de gotas isoladas (REICHARDT, 1990).

### **2.2 Irrigação**

A irrigação é uma prática agrícola capaz de suprir a deficiência total ou parcial de água para as culturas. São utilizadas técnicas e equipamentos próprios para esse manejo, visando fornecer água de forma artificial, assegurando a produção da lavoura mesmo em caso de escassez de

precipitações (SANTORO, 2020). Os principais tipos de irrigação atuais são a superficial, a localizada e a aspersão (SANTOS, 2023).

Realizando um comparativo entre áreas, é possível perceber a vantagem da irrigação, sendo, a produção média de 1ha de qualquer cultura irrigada em torno de duas a quatro vezes a produção de cultivos em áreas com baixo índice pluviométrico, dessa forma, a irrigação diminui a pressão por desmatamento de novas áreas para que se tenha uma produção maior (LOPES e PEDROSO, 2017).

A medição da chuva é fundamental para o manejo da irrigação, pois permite que os agricultores saibam quando e quanto irrigar, sendo o pluviômetro o equipamento responsável por realizar a medição da precipitação em determinado local (LOPES et al., 2004).

### **2.3 Pluviômetros**

Pluviômetro é um equipamento responsável por medir a chuva que ocorre em um ponto geográfico em determinado momento, convencionalmente expressa como altura pluviométrica em milímetros (FERREIRA et al., 2017).

Segundo Tucci (2004) existem duas maneiras de medir a precipitação pluviométrica: espacialmente, utilizando os radares e pontualmente, utilizando pluviômetros e pluviógrafos. Pluviômetros e pluviógrafos se diferem quanto a forma de coleta de dados, a leitura do pluviômetro é feita de forma manual, já o pluviógrafos realiza o registro de forma gráfica. Segundo Menezes (2019) os três tipos mais utilizados de pluviômetros automáticos são:

- Pluviômetro flutuador: Realiza a medição relacionando a variação do nível de água em um recipiente, através de um flutuador, que é ligado diretamente ao mecanismo de registro.
- Pluviômetro de balança: Funciona por meio da captação da água, que em seguida é pesada de forma automática, em uma balança. Por fim, após a pesagem a água é descartada do equipamento.
- Pluviômetro automático do tipo balança: Esse equipamento, é formado por um coletor que direciona a água para um sistema de duas básculas de mesmo volume. Quando uma balança se enche, automaticamente, ela vira para esvaziar e a outra balança passa a receber água.

No pluviômetro automático os dados são enviados diretamente ao sistema de monitoramento, não sendo necessário um operador para realizar a leitura (MILANESI et al., 2017). Segundo Calder e Kidd (1978), esse modelo de pluviômetro apresenta um valor de erro em sua precisão, isso ocorre devido ao fato, que certa quantidade de água é perdida no momento de tempo em que uma balança dá lugar a outra, para que comece a receber água novamente.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

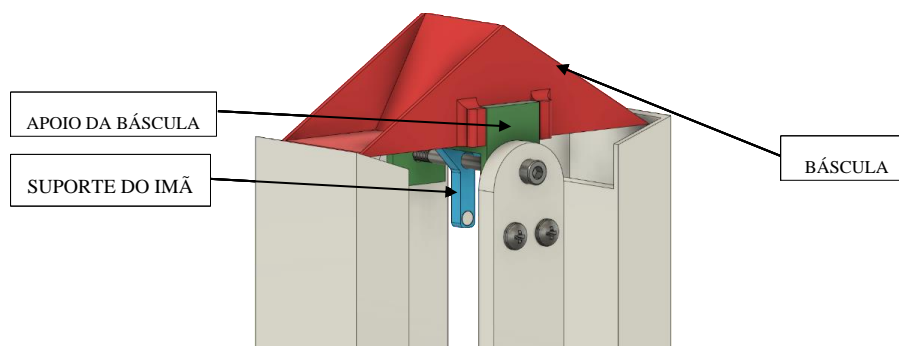
Planejar o processo de fabricação é fundamental para definir a sequência ideal de produção das peças, garantindo que cada etapa seja realizada com precisão e de acordo com as especificações do projeto (BATOCCHIO, 1992). A impressão 3D, introduzida nos anos 1980, revolucionou a criação de protótipos ao permitir que ideias saíssem do papel e se transformassem em objetos físicos, estabelecendo-se como uma tecnologia disruptiva (WONG, 2012).

A integração entre o planejamento de fabricação e a impressão 3D permanece um tópico de grande relevância, explorando as oportunidades e os desafios que surgem dessa fusão de abordagens. Vale destacar que a manufatura aditiva só alcançou seu pleno potencial com o auxílio de tecnologias complementares, como o desenho assistido por computador (CAD), a fabricação assistida por computador (CAM) e o controle numérico computadorizado (CNC), que juntas possibilitam a criação de objetos tridimensionais de maneira precisa e eficiente (KRUTH, 1991).

#### 3.1 Desenvolvimento do design - Projeto

O pluviômetro foi projetado através do software Autodesk Fusion 360 (licença estudantil). Foram projetadas inicialmente suas peças internas, sendo elas, a balsa, responsável por armazenar e direcionar a água, o suporte da balsa, encarregado de apoiar a balsa e garantir seu movimento de inclinação em volta do eixo do parafuso, por fim o suporte do imã, que une o imã a estrutura do apoio da balsa, e garante a sincronia de seu movimento com o conjunto (Figura 1).

**Figura 1 – Desenho preliminar da balsa**



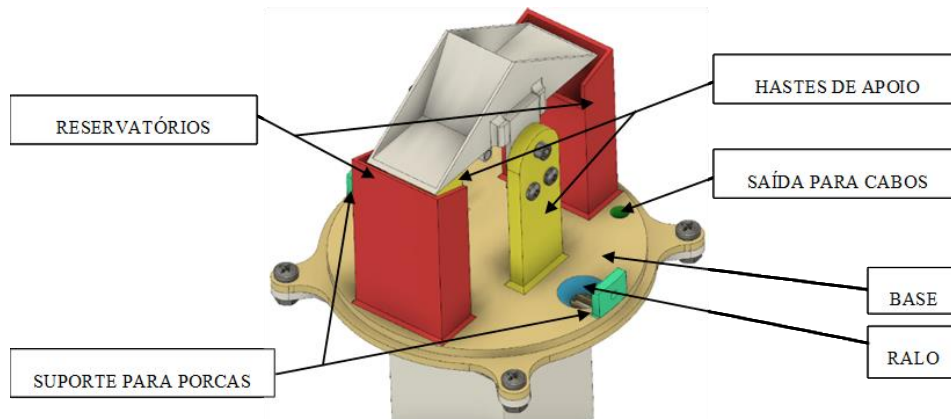
**Fonte:** AUTOR (2023)

Após definidas os componentes internos, foi projetada a base, onde está localizada as hastes que fornecem apoio ao suporte da balsa e os reservatórios por onde a água escorrerá para fora do pluviômetro após ser captada pelo recipiente da balsa.

Na base também foram projetados dois suportes, para posicionamento das porcas que serão responsáveis pela fixação do copo, dois ralos

projetados para captar a água que não se direcionou aos reservatórios de escoamento, e uma saída para os cabos de alimentação e de dados (Figura 2).

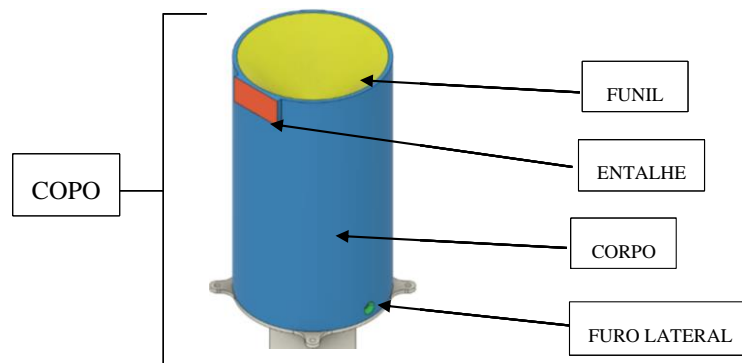
**Figura 2 – Componentes da base do pluviômetro**



Fonte: AUTOR (2023)

O copo do pluviômetro foi desenvolvido visando a captação da precipitação, assim como, a proteção do interior do pluviômetro de intempéries, e vedação em conjunto com a base. Sendo a peça em formato cilíndrico, composta pela abertura em formato de funil na parte superior, entalhe na parte frontal para identificação e furação nas laterais para fixação na base (Figura 3).

**Figura 3 – Componentes do copo do pluviômetro**

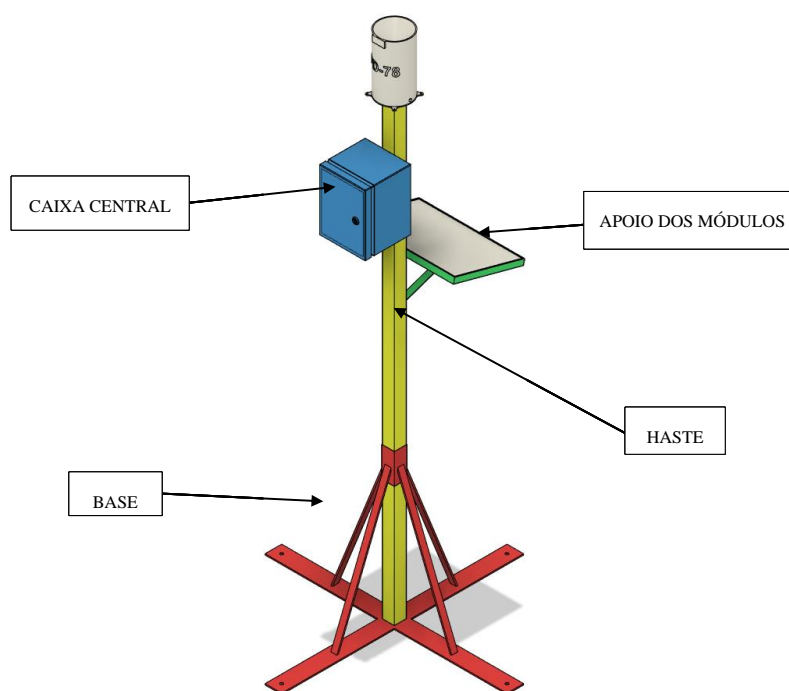


Fonte: AUTOR (2023)

A projeção da estrutura de fixação também foi desenvolvida no software Fusion 360, é composta por 3 elementos, a base, a haste e o apoio das placas solares. A base é formada por uma estrutura em formato de "X" visando fixar toda a estrutura no solo. A parte superior da base é formada por um tubo que é apoiado por 4 barras chatas de sustentação.

Por fim, finalizando as estruturas de suporte do pluviômetro e seus complementos, tem-se, o apoio do modulo solar e a caixa central que armazena o sistema de bateria, controle de carga e processamento e envio de informações, o conjunto completo pode ser visto na Figura 4.

**Figura 4 – Componentes da estrutura de apoio**



**Fonte:** AUTOR (2023)

O tubo foi projetado para fornecer apoio a haste, evitando que ela penda em alguma direção. A haste é formada por uma barra de 40 mm x 40 mm, tendo um 1,5 m de comprimento, sendo responsável por fornecer pontos de fixação para o apoio dos módulos. Em sua posição recolhida, o pluviômetro fica a 1694 mm do solo, sendo em sua posição estendida uma distância máxima de 2044 mm.

### **3.2 Índice Pluviométrico no município de Primavera do Leste - MT**

Foi realizado um estudo sobre o índice pluviométrico na região de Primavera do Leste, Mato Grosso, referente ao ano de 2022. Durante a busca, verificou-se no site do INMET, Instituto Nacional de Meteorologia ([portal.inmet.gov.br/](http://portal.inmet.gov.br/)), que o menor valor de precipitação ocorrido no município foi de 0,2 mm/h, e o maior valor registrado foi 27 mm/h.

Devido ao fato de o pluviômetro desenvolvido ter uma resolução de 0,5 mm, definiu-se que os seguintes valores para teste de validação, 0,5 mm/h, pois é o valor mais perto do menor valor registrado; 27 mm/h pois, é o maior valor registrado no ano anterior; e por fim, 5 mm/h (chuva moderada) e 10 mm/h (chuva forte) para completar o conjunto de valores (Quadro 1).

**Quadro 1 – Classificação das faixas de medição**

Intensidade [mm/h]	Descrição da Chuva
0,5	Chuva fraca – menor valor contabilizado
5	Chuva modera

10	Chuva forte
27	Chuva forte – maior valor contabilizado

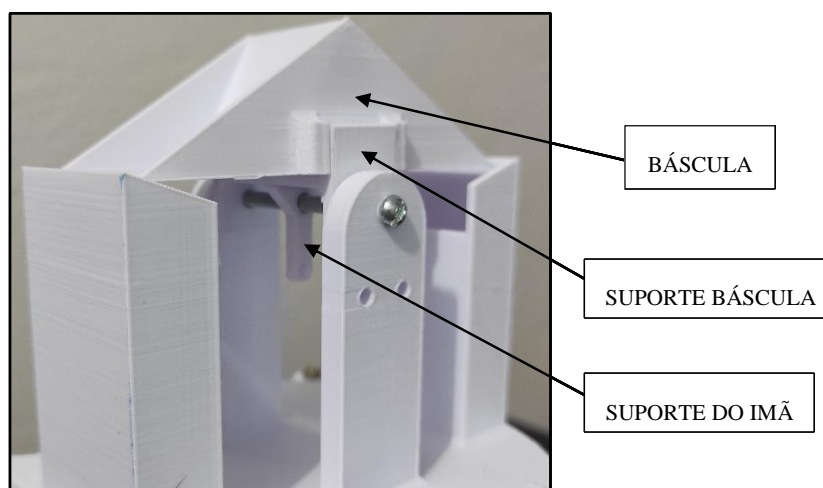
Na sequência, foram definidas nove medições para cada um dos valores estabelecidos anteriormente (0,5 mm/h; 5mm/h; 10 mm/h e 27 mm/h). Desse modo, podemos estabelecer um método de validação, ao compararmos os valores medidos com os valores calculados anteriormente, e assim encontrar a precisão do equipamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Fabricação das peças

Após a simulação e configuração da fabricação das peças, iniciou-se o processo de produção dos elementos do pluviômetro, seguindo a respectiva ordem da projeção. As peças foram fabricadas com filamento termoplástico composto por ácido polilático (PLA). Foram produzidos primeiramente os componentes internos, iniciando-se pela balsa, apoio da balsa e apoio do imã (Figura 5). Concluída a produção das peças, fixou-se o imã ao seu suporte.

**Figura 5 – Peça conjunto balsa**

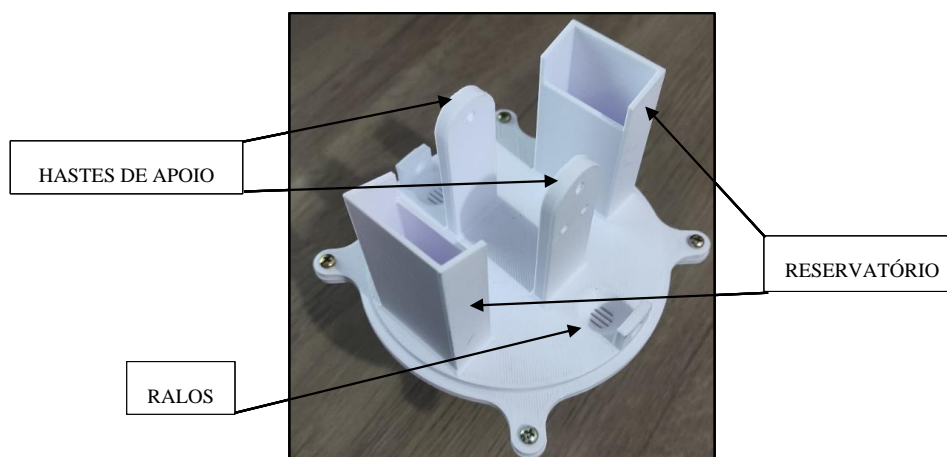


**Fonte:** AUTOR (2023)

Em sequência, foi produzida a estrutura da base, composta pelos seguintes componentes, hastes de apoio, reservatórios, suporte para porcas, ralos de escoamento e saída dos cabos (Figura 6). Todos os elementos foram impressos de uma única vez, para que obtivessem melhor resistência mecânica, evitando assim, que precisassem ser colados posteriormente.



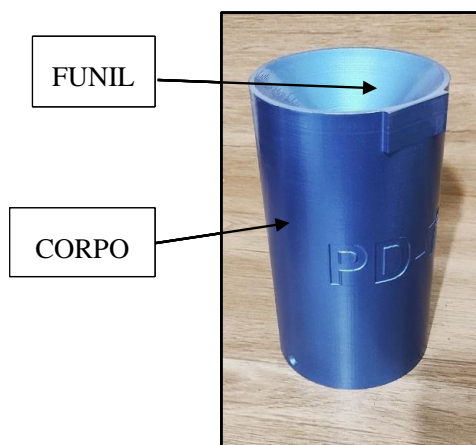
**Figura 6 – Componentes da base**



**Fonte:** AUTOR (2023)

Foi construído o copo atendendo as suas características físicas e funções definidas na etapa de projeção, proteção da parte interna e captação da água da chuva, por exemplo. O copo é formado pelos seguintes componentes, corpo, funil, entalhe e furos laterais (Figura 7).

**Figura 7 – Componentes do copo**



**Fonte:** AUTOR (2023)

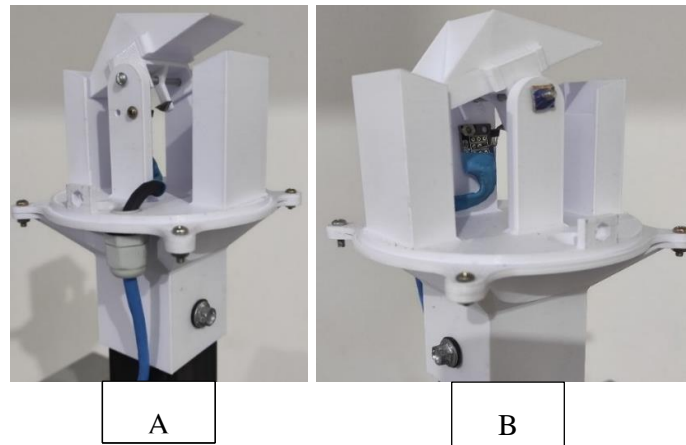
## **4.2 Montagem do Conjunto**

Conforme as etapas anteriores, a montagem também teve início a partir dos componentes internos do protótipo. Primeiramente foi realizado o processo de fixação do suporte do ímã na parte inferior do apoio da balança, em seguida, fixou-se a balança na parte superior de seu apoio.

O sensor magnético foi preso a haste direita de apoio com o uso de parafusos, adiante, foram conectados seus cabos de dados e de alimentação e foram fixados de modo a facilitar sua saída através da saída localizada na base. A balança foi colocada em seu eixo, que é formado por um parafuso posicionado nas hastes de apoio. Todo esse

conjunto de ações teve como resultado os elementos que estão ilustrados nas figuras 08(A) e 08(B).

**Figura 8 – Componentes internos – (A) cabo; (B) sensor**



**Fonte:** AUTOR (2023)

Completada a etapa do interior segue-se para o fechamento do pluviômetro por meio do encaixe da tampa com sua base através da fixação de duas porcas no interior do pluviômetro, que ao receber a tampa são então rosqueados dois parafusos, um em cada lado com sua respectiva porca fixada. Em sequência, são realizados o posicionamento e o travamento da base do pluviômetro com a estrutura de fixação.

Do mesmo modo, o cabo originado do modulo solar é preso a haste de apoio, e percorre a estrutura até chegar à caixa central, onde adentra seu interior por meio de outra prensa cabo, posicionado atrás do primeiro, citado anteriormente.

A última etapa da montagem é adicionar o microcontrolador dentro da caixa e posicioná-lo na parte superior da bateria, e realizar as ligações referente ao microcontrolador, bateria e placa solar na controladora de carga. Assim como a soldagem dos cabos vindos do sensor no ESP32. Primeiramente são conectados os polos positivo e negativo da bateria, por meio de 2 fios, nas entradas identificadas para bateria na controladora, na entrada positiva e negativa respectivamente.

Na sequência, os cabos do sensor são soldados no microcontrolador, conectando seus fios positivo, negativo e dados, nos pinos do ESP 32, Ground (negativo), Vin (positivo) e IO14, respectivamente. Por fim, é conectado o ESP32 na controladora de carga através da porta USB. Optou-se pela ligação desse modo, pois, facilita o acesso da placa no local, através de um notebook por exemplo, a tensão de saída já estar no nível compatível com o ESP (5 volts), não sendo necessário utilizar um circuito ou modulo para adequar a tensão na saída da controladora.

Após concluída a etapa de montagem, o pluviômetro está finalizado e em operação, o equipamento completo é ilustrado na Figura 9.

**Figura 9 – Montagem completa do pluviômetro automatizado**



Fonte: AUTOR (2023)

### **4.3 Calibração e validação do pluviômetro**

Como citado anteriormente, o volume de chuva captado pelo pluviômetro é expresso em milímetros (mm) convencionalmente conhecido como altura pluviométrica, pois corresponde à altura de lâmina de água que cobre uma área correspondente a 1 m<sup>2</sup>. Para encontrar a relação entre a quantidade de chuva em 1 m<sup>2</sup> e a quantidade captada pelo pluviômetro é preciso relacionar a captação da precipitação pluviométrica com a área de abertura do recipiente responsável por captar a água da chuva, calculado de acordo com o tamanho da abertura do recipiente de captação.

Como a medida no pluviômetro é realizada a cada pulso, é preciso saber quantos pulsos representa cada sinal emitido pelo sensor. Primeiramente calculamos a área da abertura de captação do pluviômetro, e em seguida multiplicamos pela altura da lâmina (Equação 1), para então encontrar o volume captado de precipitação que corresponde à altura pluviométrica de 1 mm;

$$\text{Volume} = \text{Área} \times \text{Altura} \quad (1)$$

onde, o volume é expresso em m<sup>3</sup>, a área em m<sup>2</sup> e a altura em m.

O valor encontrado utilizando a equação 1, foi de 7.854 ml que corresponde a 1 mm, ou seja, a cada 7.854 ml captados pelo pluviômetro, ele deverá indicar o valor de 1 mm.

Encontrada essa relação, agora relacionamos esse valor com a quantidade de pulsos contabilizados pelo equipamento. Para isso, adicionamos a quantidade de água corresponde a 1 mm (7.854 ml) ao pluviômetro, e verificar quantos pulsos ele irá contabilizar.

Ao adicionar a água ao pluviômetro, foi verificado constatou-se dois movimentos com sua báscula. Desse modo, podemos verificar que ao adicionar a quantidade corresponde a 1mm o pluviômetro contabiliza 2 pulsos, dividindo 1mm para dois pulsos, obtemos 0.5 mm, ou seja, cada pulso contabilizado corresponde a 0.5 mm de precipitação. Após encontrar a relação entre a precipitação e a altura pluviométrica marcada pelo pluviômetro finaliza-se a calibração.

Segue-se então para a verificação de validação dos valores medidos pelo equipamento. O teste de validação utilizou os seguintes itens: Proveta graduada em vidro com suporte; Balança de precisão Marte AD500; bureta graduada em vidro; pipeta graduada; e cronometro;

O valor de 7.854 ml não é possível encontrar com precisão nas vidrarias disponíveis, dessa forma, faz se necessário encontrar o mesmo de outro modo. Para resolver essa situação foi utilizada a Equação (2) da densidade,

$$\text{Densidade} = \text{Massa} / \text{Volume} \quad (2)$$

onde a densidade é expressa em kg/m<sup>3</sup>, a massa em kg e o volume em m<sup>3</sup>.

Inserindo o valor da densidade e do volume na equação 1, obtemos o valor da massa, sendo 7.830 g. Em posse do valor encontrado, é possível utilizar uma balança de precisão para que se adicione essa quantidade de massa, que correspondera ao volume de 7.854 ml descrito anteriormente.

Após realizadas os nove testes, foi então calculada a média do grupo, estabelecendo assim uma precisão para cada faixa de valor. Em seguida foram realizadas as medições de todos os conjuntos de valores, e calculada a média, por fim, foi calculada uma média geral, que corresponde à média da soma dos valores da média dos grupos.

Foi constatado que os nove valores medidos para a intensidade de 0.5 mm/h, tendo sua média do grupo em 100%. Na sequência, foram realizados os testes para a intensidade de 5 mm/h. Podemos observar na Quadro 2 os nove valores medidos para a intensidade de 5 mm/h, tendo sua média do grupo em 96,667%.

**Quadro 2 – Valores para a intensidade de 5 mm/h**

Ensaio	Volume [ ml ]	Tempo [ h ]	Precipitação calculada [mm/h]	Precipitação medida [mm/h]	Precisão [%]
1	39.270	1	5	4.5	90
2	39.270	1	5	4.5	90
3	39.270	1	5	5	100

4	39.270	1	5	5	100
5	39.270	1	5	5	100
6	39.270	1	5	5	100
7	39.270	1	5	4.5	90
8	39.270	1	5	5	100
9	39.270	1	5	5	100
Média do Teste 1 – 5 mm/h					96.667

Adiante, realizou-se os testes para a intensidade de 10 mm/h. Podemos observar na Quadro 3 os nove valores medidos para a intensidade de 10 mm/h, tendo sua média do grupo em 96,111%.

**Quadro 3 – Valores para a intensidade de 10 mm/h**

Ensaio	Volume [ ml ]	Tempo [ h ]	Precipitação calculada [mm/h]	Precipitação medida [mm/h]	Precisão [%]
1	78.540	1	10	10	100
2	78.540	1	10	9.5	95
3	78.540	1	10	10	100
4	78.540	1	10	9.5	95
5	78.540	1	10	9	90
6	78.540	1	10	10	100
7	78.540	1	10	9	90
8	78.540	1	10	9.5	95
9	78.540	1	10	10	100
Média do Teste 1 – 10 mm/h					96.111

Posteriormente, foi realizado o último grupo de testes, que correspondem aos valores para a intensidade de 27 mm/h. Podemos observar na Quadro 4 os nove valores medidos para a intensidade de 27 mm/h, tendo sua média do grupo em 96,111%.

**Quadro 4 – Valores para a intensidade de 27 mm/h**

Ensaio	Volume [ ml ]	Tempo [ h ]	Precipitação calculada [mm/h]	Precipitação medida [mm/h]	Precisão [%]
1	212.058	1	27	26	96.296
2	212.058	1	27	26.50	98.148
3	212.058	1	27	25.50	94.444
4	212.058	1	27	25.50	94.444
5	212.058	1	27	25.50	94.444
6	212.058	1	27	25.50	94.444

7	212.058	1	27	26	96.296
8	212.058	1	27	25.50	94.444
9	212.058	1	27	26	96.296
Média do Teste 1 – 10 mm/h					95.473

Por fim, foi calculada a média geral, obtida por meio da soma das médias dos grupos obtidas anteriormente. O valor da média geral de precisão do pluviômetro automatizado foi de aproximadamente 97 %. Diante da precisão verificada, não se fez necessário uma nova etapa de calibração, visto que, que o processo utilizado para relacionar a precipitação com os valores captados pelo pluviômetro já alcançou valores satisfatórios, comprovados durante a execução dos testes de validação.

Assim como, os valores encontrados estão em acordo com as afirmações de Calder e Kidd (1978), que descrevem que é característico dos pluviômetros do tipo de balsa, que com o aumento da intensidade da precipitação, sua precisão seja afetada, subestimando assim o valor medido chuva.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que o objetivo principal proposto, que era desenvolver um pluviômetro digital com monitoramento em tempo real, foi atingido com sucesso.

O parâmetro de monitoramento (precipitação pluviométrica) foi medido de forma satisfatória apresentado bons resultados nos testes realizados durante a validação do protótipo, atingindo 97% de precisão. Os valores registrados são visualizados em tempo real através do site, como também, via aplicativo mobile.

O pluviômetro apresenta um bom custo-benefício em relação aos concorrentes atuais, considerando seu grau de precisão, seu custo de produção relativamente baixo e o fato de não ser necessário uma assinatura de serviço como em grande parte dos produtos atualmente disponíveis.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, porém, alguns pontos em contrapartida merecem destaque. O processo de impressão 3D FDM tem a grande vantagem da criação e personalização da peça de acordo com o projeto, contudo, é um processo longo de produção, e que deve ser executado com atenção, pois, as peças podem apresentar defeitos caso não sejam bem-posicionadas na programação ou caso a impressora não esteja calibrada corretamente.

Deve-se atentar também ao material escolhido para a impressão das peças, visto que grande parte dos filamentos, dentre eles o PLA, é sensível a temperatura e são danificados quando expostos ao ambiente e a luz

solar por um período longo, sofrendo ressecamento e tornando-se quebradiços.

Devido à época de construção do projeto coincidir com o período sem chuvas, não foi possível realizar testes em campo. Desse modo, foram realizados apenas testes em laboratório. Portanto, não foi possível avaliar o funcionamento do equipamento em condições reais, sujeito as condições ambientes, como ventos, poeira etc.

## REFERÊNCIAS

ALEMÃO, Portillo. Pluviômetro. **Meteorologia em Vermelho**, 03 fev. 2021. Disponível em: <https://www.meteorologiaenred.com/pt/pluviometro.html>. Acesso em: 15 set. 2023.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

BATOCCHIO, A. **Planejamento do Processo e de Célula de Manufatura**. São Paulo: Ed. Universidade Estadual de Campinas, 1992.

CALDER, I. R.; KIDD, C. H. R. A note on the dynamic calibration of tipping-bucket gauges. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 39, p. 383-386, 1978.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2013. Disponível em: [https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=5&LIVRO=216&TITULO=hidrologia\\_para\\_engenharia\\_e\\_ciencias\\_ambientais](https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=5&LIVRO=216&TITULO=hidrologia_para_engenharia_e_ciencias_ambientais). Acesso em: 13 out. 2024.

FERREIRA, E. P. M.; SOARES, P. H. F.; DE LIMA REDA, A. L.; DURO, M. A. S.; CYMROT, R.; CRIVELARI, R. M. Metodologia para corrigir dados de pluviômetros automáticos comerciais antes da sua publicação: um estudo de caso. In: **XVII Safety, Health and Environment World Congress**. 09-12 jul. 2017, Vila Real, Portugal. DOI 10.14684/SHEWC.17.2017.40-44.

JUNIOR, Antenor R. B. **Elementos de hidrologia aplicada**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2022.

KRUTH, J-P. **Material inress manufacturing by rapid prototyping techniques**. CIRP annals, v. 40, n. 2, p. 603-614, 1991.

LOPES, A. S.; PAVANI, L. C.; CORA, J. E.; ZANINI, J. R.; MIRANDA, H. A. Manejo da irrigação (tensiometria e balanço hídrico climatológico) para a cultura do feijoeiro em sistemas de cultivo direto e convencional. **Jaboticabal**, v. 24, n. 1, p. 89-100, jan./abr. 2004.

LOPES, Carlos A.; PEDROSO, Maria T. M. **Sustentabilidade e horticultura no Brasil: da retórica à prática**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

MENEZES, A. **Desenvolvimento e calibração de pluviômetros automáticos de baixo custo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, Juazeiro, 2019. p. 51.

MILANESI, Marcos Alexandre; ALVES, Rogério Rozolen; GALVANI, Emerson. Comparativo entre instrumentos pluviométricos experimentais e automáticos.

**Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 2251-2261, 2017.

PEREIRA, C. N.; CASTRO, C. N. Texto para Discussão - IPEA, **Expansão da Produção Agrícola, Novas Tecnologias de Produção, Aumento de Produtividade e o Desnível tecnológico no meio Rural**. 1. ed. Rio De Janeiro: IPEA, 2022.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. 1. ed. São Paulo: Manole, 1990.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. **Revista de economia e sociologia rural**. Brasília, v. 56, n. 2, p. 195-212, abr./jun. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/DdPXZbMzxby89xBDg3XCTgr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 18 ago. 2023.

SANTORO, Marcelo. **Agricultura irrigada: o que é, principais métodos e vantagens**. AEGRO, 18 maio 2020. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/agricultura-irrigada/>. Acesso em: 18 ago. 2023.

SANTOS, Diego. **Principais tipos de irrigação: vantagens e desvantagens**. Agrosmart, [s.d.]. Disponível em: <https://agrosmart.com.br/blog/vantagens-tipos-de-irrigacao/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

SILVA, Evelise Martins. **7 fatores que influenciam o aumento da produtividade agrícola e como melhorá-los**. AEGRO, 26 nov. 2020. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/produtividade-agricola/>. Acesso em: 16 ago. 2023.

SOKOLOVA, Lara. **O que saber sobre agricultura inteligente usando IoT**. Forbes, 24 jul. 2021. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2021/09/o-que-saber-sobre-agricultura-inteligente-usando-iot/>. Acesso em: 01 set. 2023.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: ABRH, 2004.

VINÃS, José M. **Breve historia del pluviómetro**. El Ágora, 2022. Disponível em: <https://www.elagoradiario.com/la-mirada-del-agua/breve-historia-del-pluviometro/>. Acesso em: 03 nov. 2023.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. ISRN **Mechanical Engineering**, v. 2012, 2012.





**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# INDUSTRIAL MANAGEMENT AND ENGINEERING



## **ENERGETIC AND ECONOMIC IMPACT OF THE HVAC TEMPERATURE SETPOINT ADJUSTMENT IN COMMERCIAL AND SERVICE BUILDINGS IN BEIRA INTERIOR REGION**

CEREJO, NUNO (1); BARANDIER, PEDRO (2); MIRANDA, ALEXANDRE (3);  
MARQUES CARDOSO, ANTONIO J. (4)

**(1) CISE - ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS RESEARCH CENTRE, UNIVERSITY  
OF BEIRA INTERIOR, CALÇADA FONTE DO LAMEIRO, P – 6201-001  
COVILHÃ, PORTUGAL, E-MAIL: [NUNO.CEREJO.SILVA@UBI.PT](mailto:NUNO.CEREJO.SILVA@UBI.PT)**

**(2) CISE - ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS RESEARCH CENTRE, UNIVERSITY  
OF BEIRA INTERIOR, CALÇADA FONTE DO LAMEIRO, P – 6201-001  
COVILHÃ, PORTUGAL, E-MAIL: [PEDRO.BARANDIER@UBI.PT](mailto:PEDRO.BARANDIER@UBI.PT)**

**(3) CISE - ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS RESEARCH CENTRE,  
UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR, CALÇADA FONTE DO LAMEIRO, P – 6201-  
001 COVILHÃ, PORTUGAL, E-MAIL: [ALEXBORGR@UBI.PT](mailto:ALEXBORGR@UBI.PT)**

**(4) CISE - ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS RESEARCH CENTRE, UNIVERSITY  
OF BEIRA INTERIOR, CALÇADA FONTE DO LAMEIRO, P – 6201-001  
COVILHÃ, PORTUGAL, E-MAIL: [AJMCARDOSO@IEEE.ORG](mailto:AJMCARDOSO@IEEE.ORG)**

### **ABSTRACT**

*The modernization of the society's infrastructure has resulted in an incontestable increase of its energy requirements. Within this context, the building sector represents over 40% of the final energy consumption (FEC) in Europe, of which about 28% and 14% regard households and commercial and services buildings (CSB), respectively. As Portugal has a milder climate in comparison to the other European Union (EU) countries, the FEC of the Portuguese building sector accounts for almost 33% of the total, where 19.4% and 13.4% concern households and CSB, respectively. In spite of these comparatively low energy requirements the endeavours to achieve a high energy efficiency and, therefore, a low energy consumption become imperative, as outlined in the Agreement of Paris.*

*In addition to the energy efficiency, other concerns were engaged by the Paris Agreement as well. Among them are the decarbonisation and security supply, which substantiate a major interest concerning this topic. Decarbonisation bears a great importance as the building sector itself accounts for more than 36% of the total carbon emissions in the EU. These emissions result mainly from heating systems that use fossil fuels, which represent over 80% of the CO<sub>2</sub> direct emissions in buildings. The security supply is also essential as an instability within EU was prompted with the sanctions placed on Russia due to the Ukraine conflict that outbreaked in 2022.*

*Thereby, this study seeks to categorize the CSB in the Beira Interior region in Portugal according to their energy class, and assess the energetic impact of Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) temperature setpoint adjustments in these buildings. For this purpose, some dynamic building simulation models that predict the energy consumption fluctuation as a function of the temperature setpoint were created using Hour Analysis Program (HAP) software. Subsequently, the energy savings resulting from the aforementioned adjustments were estimated.*

**Keywords:** Energy Efficiency; Energy Classification; Buildings Temperature Setpoint; Dynamic Building Models; HVAC Systems.

## 1 INTRODUCTION

The evolution of the building sector in Portugal can be split, taking into account the energy context, in two phases: In the first phase, which lasted until the early 1990s, there were no official guidelines or standards to be followed. In a second phase, starting in 1990, in order to improve health and thermal comfort conditions and energy efficiency, some important concepts have been introduced and then, included in national legislation (VAQUERO, 2020).

An important milestone in this evolution occurred in 2006, when Directive 2002/91/EC was transposed into national legislation. This directive establishes that European Union member states should implement an Energy Certification System (ECS) to inform citizens about the thermal quality of buildings. The regulatory documents published at the time constituted the basis of the Portuguese ECS. As a result of the system's operation, it becomes possible to obtain a document that characterizes the quality of the solutions and the thermal performance of the building, the Energy Performance Certificate (EPC) (ADENE, 2023a).

The operational management of the Portuguese ECS was assigned to the Portuguese Energy Agency (ADENE), an associative legal entity with public utility status. This entity provides general statistical data on the thermal behaviour of buildings, resulting from the energy certification work carried out by ECS Qualified Experts, which is the main source of data used in this study (ADENE, 2023b).

In statistical terms, the building sector represents over 40% of the FEC in Europe, of which 28% and 14% regard residential buildings and CSB, respectively. Such sector comprises the largest share of FEC among the economic activities sectors. In Portugal the building sector was the greatest contributor to the FEC in 2020, with a total of 32,9%, of which 19,4% and 13,4% concerned residential buildings and CSB, respectively. Building sector FEC was quite similar to sectors like the transportation, with 32,6%, and industrial, with 28,8%, (DGEG, 2024c, EUROSTAT, 2020, SILVA, BARANDIER, et al., 2024).

Although there is a quite large energy consumption in the building sector, there is also a considerable margin for improvements, as over 50% of it can be reduced through the implementation of energy efficiency improvements measures. Such measures reveal a great potential not only for the FEC reduction, but to mitigate the climate changes as well (DGEG, 2024a).

The objective of the present work is to assess the energetic and economic impact of an adjustment in the HVAC temperature setpoint in CSB in the Portuguese Beira Interior Region. The estimations considered, specifically, the districts of Castelo Branco and Guarda, located in Cova da Beira and Beira Interior Norte, respectively, according to the level III of Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS III) (EUROSTAT, 2023). For the aforementioned assessment, the Carrier HAP software was employed.

## **2 METHODOLOGY**

### **2.1 Sample Selection**

The Energy Agency, ADENE, provides statistical data from the general thermal behaviour of buildings, which result from the energy certification conducted by ECS technical experts. In the context of CSB, information relating to the total amount of certificates is available, alongside useful floor area, building energy classification, and other relevant data, all broken down by municipalities and districts. Based on these data, a model for the present study was developed. To this end, some basic assumptions were made.

Firstly, all the statistical data available on the platform regarding the period between 2014 and 2023 were employed. Secondly, the locations of the study buildings were settled and matched to the locations of CISE - Electromechatronic Systems Research Centre facilities in the Beira Interior region. To comply with the climate zoning in Portugal, according to NUTS III, the adopted nomenclatures are Cova da Beira and Beira Interior Norte, which comprise the municipalities of Covilhã and Guarda, respectively.

Thirdly, the available statistical data classify the buildings as new, renovated or existing. For the analysed period, the most significant category is the existing buildings, which account for about 82.1% and 78% of the total energy certificates in Cova da Beira (CB) and Beira Interior Norte (BIN), respectively, as presented in Table 1. For this reason, the existing buildings were selected for the present study.

Fourthly, the climate zone definition is another aspect to be considered as the building behaviour strongly depends on its location. Thus, the climate zones in Portugal are classified qualitatively into *s* and *w*, representing the summer and the winter, respectively. They are also classified into three levels according to their severity, from 1, less severe, to 3, more severe. Therefore, there are six climate zones in Portugal, *s1*,

s2, and s3 for summer, and w1, w2, and w3 for winter. For the current work, the climate zones were selected and adjusted according to the altitude of the location, which is going to be the reference altitude in each one of the NUTS III selected sites (DGEG, 2020). Accordingly, the considered climate zones for this work are s3w2 for CB and s2w3 for BIN.

**Table 1 – Existing Buildings in Beira Interior**

NUTS III	Total	Existing	(%)
Cova da Beira	1383	1135	82,1%
Beira Interior Norte	1654	1290	78,0%

Finally, the energy classes of the existing buildings in the analysed regions are described in Tables 2 and 3, and in the Pareto Charts presented in Figure 1 and Figure 2, regarding both CB and BIN territories. Similarly to what occurs in Lisbon, the energy class C buildings reveal to be the most predominant class in the referred regions, accounting for more than half of the total (SILVA, BARANDIER, et al., 2024).

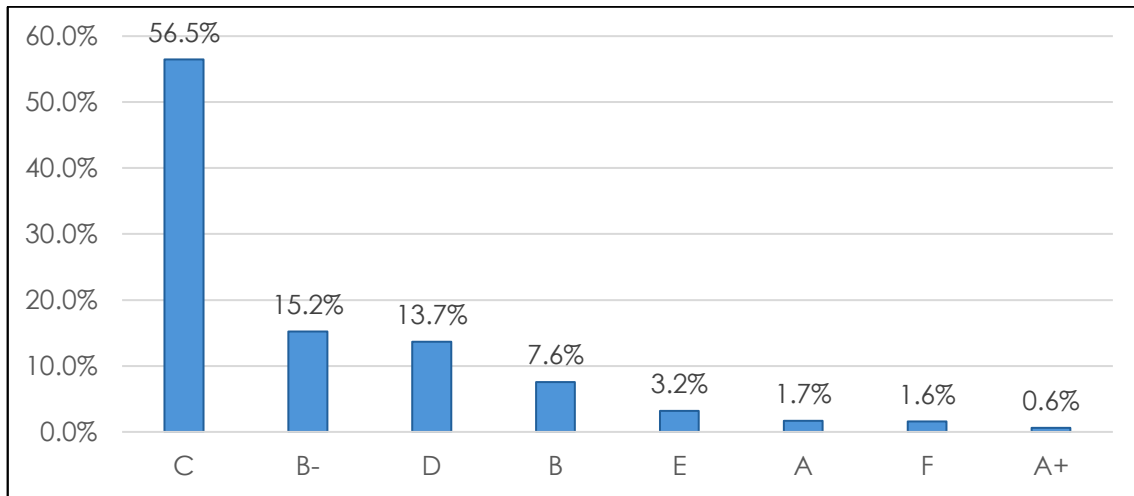
**Table 2 – Existing Buildings Energy Class in Cova da Beira**

NUTS III	Classification	Existing Buildings	Floor Area (m <sup>2</sup> )
Cova da Beira	A+	7	23259
	A	19	22022
	B	86	34147
	B-	173	42544
	C	641	114898
	D	155	39454
	E	36	11872
	F	18	1351

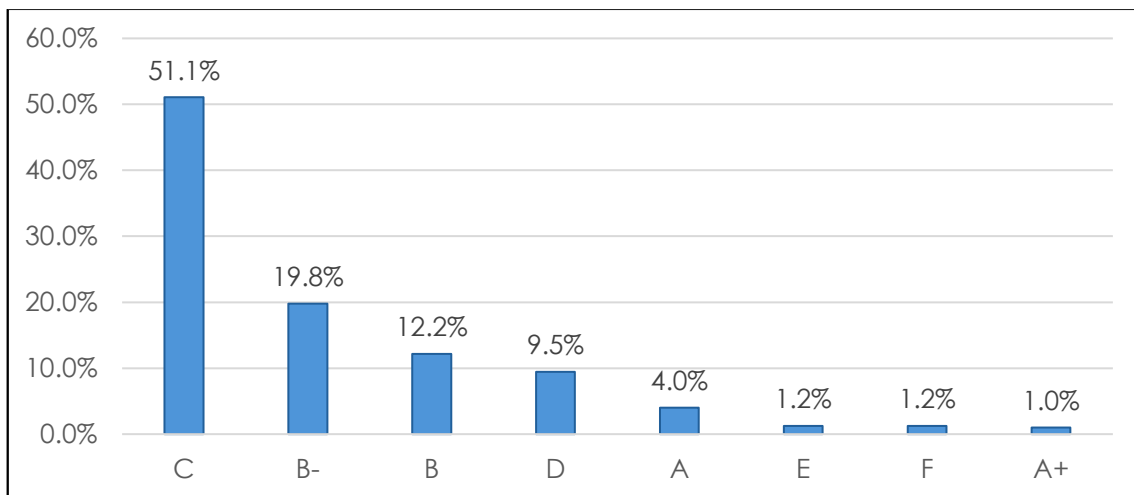
**Table 3 – Existing Buildings Energy Class in Beira Interior Norte**

NUTS III	Classification	Existing Buildings	Floor Area (m <sup>2</sup> )
Beira Interior Norte	A+	13	14021
	A	52	27889
	B	157	61146
	B-	255	83303
	C	659	175036
	D	122	53231
	E	16	4874
	F	16	2287

**Figure 1 – Existing Buildings Energy Class in Cova da Beira**



**Figure 2 – Existing Buildings Energy Class in Beira Interior Norte**



In CB and in BIN, the class C buildings represent about 56% and 51% of the total, respectively, followed by B- energy class, with a modest share between 15% and 20%. In this manner, as a result of the greater proportion of energy class C buildings in comparison to the total, as well as their larger floor area, such buildings were selected as the study object of the present work.

## **2.2 Building Energy Classification**

The energy classification of a building depends on predicted indicators and references of energy efficiency indicators (EEI). Such indicators are based on the floor area and on the type of energy usage. Additionally, they may be categorized into type S or type T, according to their energy usage. Type S refers to the regulated energy usage, which is intended for human comfort, such as thermal comfort, lighting, and domestic hot water. Type T regards the non-regulated energy usages, such as HVAC

operations not intended for human comfort like refrigeration systems and cold rooms. Based on these parameters, the ratio of the energy efficiency indicator (REEI) is estimated as expressed in equation 1, where  $EEl_{pred,S}$ ,  $EEl_{pred,T}$ ,  $EEl_{pred,ren}$ ,  $EEl_{ref,S}$  regard the predicted type S EEI, predicted type T EEI, predicted renewable EEI, and reference type S EEI, respectively (DGEO, 2021).

$$REEI = (EEl_{pred,S} - EEl_{pred,ren})/EEl_{ref,S} \quad (1)$$

In the following, the building can be energetically classified by comparing the REEI obtained and the ranges of intervals presented in Table 4, where it can be noted that the smaller the REEI, the higher the energy class, i.e., the more efficient the building.

**Table 4 –Specific Simulation Building Enveloping Parameters**

<i>Energy Class</i>	<i>REEI</i>	<i>Energy Class</i>	<i>REEI</i>
A+	$REEI \leq 0,25$	C	$1,00 < REEI \leq 1,50$
A	$0,25 < REEI \leq 0,50$	D	$1,50 < REEI \leq 2,00$
B	$0,50 < REEI \leq 0,75$	E	$2,00 < REEI \leq 2,50$
B-	$0,75 < REEI \leq 1,00$	F	$REEI > 2,50$

**Source:** DGEG (2021)

### 2.3 Energetic Simulation of the Building

The search for the convergence between HVAC operations in buildings, such as thermal comfort and indoor air quality, and the increasingly rational use of energy reveals to be a remarkable challenge, especially when the continuous escalation of the energy consumption is taken into account.

To overcome such challenge, it is imperative the assessment of all available alternatives and the systems' optimization, so that a higher energy efficiency can be achieved. In this context, simulation software have become an indispensable tool for the designing and sizing of CSB, mainly when a more sustainable building is sought (HEE, ALGHOUL, et al., 2015, PEGUES, 2020).

For the assessment performed in the present paper, the Carrier Hour Analysis Program (HAP), certified by ASHRAE Standard 140, was employed. The requirements and methodology for the development of the simulation model of hypothetical buildings relied on the aforementioned ECS. Additionally, the developed model comprises mostly general parameters, as presented in Table 5. In addition, as the present work concerns two locations with different climate zones, some specific assumptions were considered for CB and BIN, as presented in Table 6 and Table 7.

**Table 5 – General Simulation Parameters**

Indoor Temperature (°C)		Opaque Enveloping			Glass Enveloping		
Heating	Cooling	Thermal Transfer Coefficient (W/(m²°C))			Thermal Transfer Coefficient (W/(m²°C))		
		External Walls	Internal Walls	Indoor Floors			
		Predicted	Predicted	Predicted			
20	25	0,96	0,66	3,10	3,30		
Ventilation							
Airflows determined through prescriptive method		Specific Power Factor (W/(m³/s))		Free Cooling System		Heat Recovery System	
Predicted	Reference	Predicted	Reference	Predicted	Reference	Predicted	Reference
Flow	Flow/0,8	2000	1250	No	No	No	No
Climatization							
Heating							
Predicted		Reference		Passive Cooling System		Heat Recovery System	
COP	EER	COP	EER	Predicted	Reference	Predicted	Reference
4	3,5	3	2,9	No	No	No	No
Lighting							
Lighting Power (W/m²)		Power Density	Average Illuminance Required (lux)	Occupation Control		Natural Light Control	
Predicted	Reference						
8	6,3	2,1	300	No		No	

**Table 6 – Specific Simulation Location Parameters**

Location	Floor Area (m²)	Building Altitude (m)	Climate Zone
<b>Cova da Beira</b>	180	507	W2, S3
<b>Beira Interior Norte</b>	266	717	W3, S2

**Table 7 – Specific Simulation Building Enveloping Parameters**

Location	Opaque Enveloping			Glass Enveloping
	Thermal Transfer Coefficient (W/(m²°C))			Solar Factor (%)
	External Walls	Internal Walls	Indoor Floors	
	Reference	Reference	Reference	
<b>Cova da Beira</b>	0,60	0,45	0,45	0,15
<b>Beira Interior Norte</b>	0,50	0,40	0,40	0,20



Based on the developed model of the buildings, new operation regimes for the HVAC system were adopted by adjusting the indoor temperature setpoints by -2°C and +2°C for heating and cooling operations respectively with the purpose of providing a smaller temperature difference between the indoor and outdoor temperatures. Therefore, the reference setpoint of 20°C and 25°C for heating and cooling were both adjusted in the simulation to 18°C and 27°C, respectively.

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

The input parameters in the dynamical simulation of the hypothetical buildings for the reference indoor temperature setpoints resulted in the outcomes presented in Table 8 and Table 9 for CB and BIN. Based on the presented results, as the REEI of the hypothetical buildings of CB and BIN were 1,19 and 1,35, respectively, it means that, according to Table 4, both buildings can indeed be classified energetically as C.

Moreover, as expected, the final predicted energy consumption regarding HVAC operations concerns a large share of the total, about 37%, for both buildings, which undeniably reveals a great potential either for improvements or for savings.

**Table 8 – Final Energy Consumption in Cova da Beira**

Energy Usage	Final Predicted Energy Consumption (kWh)	Final Reference Energy Consumption (kWh)
Heating (20 °C)	4 094	3 163
Cooling (25 °C)	1 096	1 466
Ventilation	680	522
Lighting	4 493	3 538
Electrical Equipment	5 210	5 210
REEI	1,19	

**Table 9 – Final Energy Consumptions in Beira Interior Norte**

Energy Usage	Final Predicted Energy Consumption (kWh)	Final Reference Energy Consumption (kWh)
Heating (20 °C)	6 008	3 306
Cooling (25 °C)	1 369	1 833
Ventilation	998	794
Lighting	6 633	5 223
Electrical Equipment	7 690	7 690
REEI	1,35	

Based on the simulation outcomes, the indoor temperature setpoints were adjusted in  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  for heating and cooling operations for both buildings and then the simulations were conducted one more time. According to the new simulations results, the analysed setpoint adjustments reveal to be quite advantageous in the economical and environmental perspectives.

As depicted in Table 10, for the building in CB zone, the setpoint adjustment leads to a reduction of 25% in the HVAC FEC, that might result in a decrease of about 9% in the total FEC of the building. In terms of energy consumption per area, there is a reduction of more than 8 kWh/m<sup>2</sup> after the adjustment.

Meanwhile, for the building in the BIN zone, a more expressive reduction of the FEC arises from the setpoint adjustment, which leads to a decrease in more than 30% in the HVAC FEC and almost 12% in the building total FEC, which represents a decrease of almost 10 kWh/m<sup>2</sup>.

**Table 10 – Energetic Impact of Setpoint Adjustment**

Location	Average Floor Area (m <sup>2</sup> )	HVAC Consumption/Year			Total Building Consumption/Year			
		FEC (kWh/year)			FEC (kWh/year)		Reduction	
		Original Setpoint	Setpoint Adjusted	Reduction	Original Setpoint	Setpoint Adjusted	(%)	kWh/m <sup>2</sup>
CB	180	5870	4404	25.0%	15573	14107	9.4%	8.14
BIN	266	8375	5725	31.6%	22698	20048	11.7%	9.96

Taking into account the seasonal HVAC FEC resulting from the setpoint adjustment, the greater decrease in the FEC for the analysed locations is observed during the more severe season, that is, the cooling and heating periods for CB and BIN, respectively. Such analysis is further described in Table 11, where it can be noted that the FEC decrease in cooling in CB, about 30%, is greater than in heating, around 28%, while the opposite occurs for BIN, with a FEC reduction of about 33% and 36% for cooling and heating, respectively. Thereby, it indicates that the setpoint adjustment will result in a higher impact in more rigorous climate zones.

**Table 11 – Energetic Impact in HVAC FEC Seasonal Operations**

Location	Climate Zone	Mode	Reduction
CB	Summer 3	Cooling	30%
CB	Winter 2	Heating	28%
BIN	Summer 2	Cooling	33%
BIN	Winter 3	Heating	36%

According to DGEG (2024), the average price of electricity in 2023 was of 146€/MWh for industrial clients with a consumption ranges from 20 to 500 MWh. Thus, from an economical perspective, if such setpoint adjustment is applied to all the class C buildings in the region of Beira Interior, the potential savings for the expected reductions in the FEC might reach about 400 000€ per year. As presented in Table 12, out of this total, the average savings in CB account for about 35%, with almost 138 000 €/year. Meanwhile, the average savings in BIN represent the remaining 65%, with almost 255 000 €/year.

**Table 12 – Economic Impact from Setpoint Adjustment**

Location	Total Buildings	Floor Area (m <sup>2</sup> )	Total Savings per Year		Share of the Total	CO <sub>2</sub> (tons)
			(MWh/Year)	(€/Year)		
CB	641	115380	940	137197	35%	338
BIN	659	175294	1746	254967	65%	629
Total	1300	290674	2686	392164	100%	967

Lastly, such adjustment also reveals to be quite advantageous from the environmental perspective when considering the converting factors to estimate the reduction in the emissions of CO<sub>2</sub> (DGEG, 2021). In this manner, the expected reduction in the energy consumption also results in an expected decrease of about 967 tons of CO<sub>2</sub>.

#### 4 CONCLUSIONS

Aiming to assess the impact of HVAC temperature setpoint adjustment in class C CSB in the region of Beira Interior, Portugal, dynamic models were developed and simulated. Such models comprised hypothetical buildings based on the average characteristics which were outlined according to statistical data from the Portuguese Energy Agency and ECS.

Based on the data regarding the certified BSC in Beira Interior region, more than 85% of the buildings are class C or higher. Considering only the class C samples, buildings with similar constructive features boast a slightly better REEI in CB, with 1,19, than in BIN, with 1,35. Furthermore, as class C buildings represent over 50% of the total, that represents a considerable margin for improvement, especially when almost 40% of their FEC regard HVAC operations. Taking these figures into account, they were selected as the study object of the present work.

From the conducted simulations, it can be assumed that a HVAC temperature adjustment setpoint of  $\pm 2$  °C may lead to a significant impact in terms of energy, savings, and environment. Through this adjustment in the class C buildings of Beira Interior region, a reduction in HVAC FEC of 25% and over 30% can be expected in CB and in BIN

respectively. This reduction also culminates in a significant decrease, by some 8 to 9% of the buildings total FEC per year. This can be, in economic terms, translated into savings of around 400 000€ per year in the Beira Interior region alone. Additionally, there are also some benefits from the environmental perspective, since such energy consumption decrease might culminate in the reduction in annual CO<sub>2</sub> emissions of about 967 tons.

Finally, in addition to the aforementioned advantages, it is also important to overcome Europe's dependence on energy external supply, which was clearly noticed after the outbreak of the conflict between Russia and Ukraine. In this manner, the setpoint adjustment also reveals to be a great solution in the short term as it can reduce energy consumption without any extra investment.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) under Projects UIDB/04131/2020 and UIDP/04131/2020.

### REFERENCES

ADENE. **Certificação Energética dos Edifícios**. 2023a. Legislação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios. Disponível em: <https://www.sce.pt/legislacao/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

ADENE. **Certificação Energética dos Edifícios**. 2023b. Estatísticas do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios. Disponível em: <https://www.sce.pt/estatisticas/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

DGEG. **Despacho n.º 6476-H/2021**. . [S.l: s.n.], , 2021

DGEG. **Eficiência Energética**. 2024a. Edifícios. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/edificios/>. Acesso em: 8 ago. 2024.

DGEG. **Guia SCE - Parâmetros de cálculo**. ADENE. [S.l: s.n.], 2020.

DGEG. **Preços de Energia**. 2024b. Preços de eletricidade e gás natural. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/precos-de-energia/precos-de-eletricidade-e-gas-natural/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

DGEG. **Sistema de Certificação Energética dos Edifícios**. 2024c. Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/sistema-de-certificacao-energetica-dos-edificios/diretiva-do-desempenho-energetico-dos-edificios/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

EUROSTAT. **Energy consumption in households**. 2020. Energy consumption

in households by type of end-use.

EUROSTAT. **Glossary:Nomenclature of territorial units for statistics (NUTS)**. 2023. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Nomenclature\\_of\\_territorial\\_units\\_for\\_statistics\\_\(NUTS\)#:~:text=The+Nomenclature+of+territorial+units,2+and+3+respectively%2C+moving.](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Nomenclature_of_territorial_units_for_statistics_(NUTS)#:~:text=The+Nomenclature+of+territorial+units,2+and+3+respectively%2C+moving.)

HEE, W. J., ALGHOUL, M. A., BAKHTYAR, B., *et al.* "ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 Standard", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 323–343, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211400793X>.

PEGUES, J. "Carrier HAP and the Evolution of Energy Modeling Tools", **ASHRAE Transactions**, v. 126, p. 644–650, 2020.

SILVA, N. C., BARANDIER, P., MIRANDA, A., *et al.* "Energy and economic impact of the HVAC temperature setpoint adjustment in commercial and service buildings". 2024. **Anais** [...] Lisbon, [s.n.], 2024. p. 1–6.

VAQUERO, P. "Buildings energy certification system in Portugal: Ten years later", **Energy Reports**, v. 6, p. 541–547, 2020.



## **INTERNET DAS COISAS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

PUNGO, ERICA. (1); TEIXEIRA, EMANUEL (2); REIS, ANTONIO D. (3); VELEZ,  
FERNANDO J. (4)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [erica.pungo@ubi.pt](mailto:erica.pungo@ubi.pt)

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: [emanuel.teixeira@ubi.pt](mailto:emanuel.teixeira@ubi.pt)

(3) Universidade da Beira Interior, E-mail: [adreis@ubi.pt](mailto:adreis@ubi.pt)

(4) Instituto de Telecomunicações, UBI, E-mail: [fjv@ubi.pt](mailto:fjv@ubi.pt)

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta aspetos de Redes de Sensores sem Fios aplicadas à promoção da agricultura de precisão, inteligente e autónoma. O sistema de irrigação aqui desenvolvido com base em conceitos da Internet das Coisas (IoT) destina-se a combater os desperdícios, que ocorrem num modelo de rega tradicional e aprimorar a eficiência energética nas comunicações. Para desenvolver este sistema de irrigação foi utilizado o Raspberry Pi 4, juntamente com os módulos XBEE – PRO S1 da norma do Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE) 802.15.4. Testaram-se os alcances de comunicação pretendidos. As medições da humidade do terreno, condições atmosféricas e horários apropriados de rega fornecem dados que são processados pelo sistema de monitorização, com o objetivo de realizar uma rega inteligente, autónoma, eficaz e sem desperdícios. Considerou-se a plataforma de interface gráfica Blynk para criar um painel que permite a visualização dos níveis de humidade e temperatura. A configuração do sistema de rega envolve a utilização de uma mini bomba submersível em água, de um sensor de temperatura e de um sensor de humidade do solo ligados a um Arduino Uno. Este sensor comunica os valores da humidade para o Raspberry Pi. Os resultados subjacentes comprovam as vantagens da solução e mostram que a eficiência da comunicação entre nós XBEE é diferenciada dependendo da distância. Através da comparação de dois modos de operação (Application Programming Interface, API, e modo transparente, AT) conclui-se que o modo AT é mais fácil de utilizar e económico, pois realiza configurações diretas e comunicações básicas.

**Palavras-chave:** Rega, Raspberry Pi, XBEE-PRO, Agricultura de precisão.

## ABSTRACT

*This work presents aspects of Wireless Sensor Networks applied to the promotion of precision, intelligent and autonomous agriculture. The irrigation system developed in this work based on Internet of Things (IoT) concepts aims at avoiding waste that occur in traditional watering, whilst increasing energy efficiency in communications. To develop this irrigation system, the Raspberry Pi 4 was used, together with the XBEE – PRO S1 modules of the Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE) 802.15.4 standard, to test the desired communication ranges. Measurements of soil humidity, atmospheric conditions and appropriate irrigation schedules provide data that is processed by the monitoring system, to carry out intelligent, autonomous, effective, and waste-free irrigation. One considered the Blynk graphical interface platform to create a dashboard that allows the visualization of the humidity and temperature levels. The configuration of the irrigation system involves the use of a mini pump submersible in water, temperature sensor, and a soil humidity sensor connected to an Arduino Uno. These humidity sensor reports provide the humidity and temperature values to the Raspberry Pi. Underlying results prove the advantages of the proposed solution and show that the efficiency of the communication between XBEE nodes is different depending on the distance. It was possible to compare the two modes of operation (Application Programming Interface, API, and Transparent Mode, AT) whilst realizing that the AT mode is easier and economical to use, as it enables direct configurations and basic communications.*

**Keywords:** Watering, Raspberry Pi 4, XBEE-PRO S1, Precision Agriculture.

## 1 INTRODUÇÃO

Os dispositivos de recolha de dados IoT energeticamente eficientes podem ser utilizados no campo agrícola para recolher dados em tempo real através de ligações sem fios. Estes dispositivos IoT foram otimizados para vários cenários agrícolas e podem ser utilizados para analisar dados de culturas, solo, gado e clima [7], no contexto da agricultura de precisão.

O sistema de irrigação moderno tem evoluído significativamente com a integração de tecnologias de comunicação sem fio. Nesse contexto, o uso dos módulos XBEE-PRO S1 em conjunto com o Raspberry Pi oferece uma solução para a automação e controle remoto de sistemas de irrigação. Através dessa comunicação sem fio eficiente, o Raspberry Pi pode transmitir comandos precisos para acionar e regular o sistema de irrigação, permitindo uma gestão mais precisa e conveniente dos recursos hídricos. Essa integração entre dispositivos promove não apenas a eficiência no uso da água, mas também a flexibilidade e adaptabilidade do sistema, proporcionando uma abordagem sustentável e tecnologicamente avançada para a agricultura e o manuseio de áreas verdes.

Os módulos XBEE-PRO foram projetados para atender a norma IEEE 802.15.4 e suportar as necessidades exclusivas de redes de sensores sem fio de baixo custo e baixo consumo de energia. Estes dispositivos requerem energia mínima e fornecem entrega confiável de dados entre dispositivos. Operam dentro da banda de frequência ISM 2,4 GHz e são compatíveis pino a pino entre si [1].

O Raspberry Pi é um microcomputador, que contém, num hardware de baixo custo, todas as funções que estamos habituados a ver num computador. O modelo Raspberry Pi 4, tem WiFi e Bluetooth integrados, que disponibilizam boa conectividade com o que o leitor necessitar, inclui um processador Quad Core de 1,5 GHz e entre 2 e 6 GB de memória RAM [2], [3].

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Eficiência Energética das RSSFs**

A eficiência energética é um dos aspetos importantes a considerar no desenvolvimento de nós sensores e da rede. Por exemplo, as escolhas feitas na camada física de um nó sensor afeta o consumo de energia de todo o dispositivo e a conceção de protocolos de nível mais alto [4].

A eficiência energética das RSSFs corresponde à habilidade de se realizar uma ou várias tarefas com uma quantidade menor de recursos energéticos [5].

As técnicas de economia de energia concentram-se em dois subsistemas, o subsistema de rede (a gestão de energia é direccionada para as operações em cada nó único) e o subsistema de deteção (onde técnicas são utilizadas para reduzir a quantidade de amostras com alto consumo de energia) [5].

### **2.2 Procedimentos Experimentais**

A realização deste trabalho de desenvolvimento, envolveu os seguintes procedimentos.

#### **Configuração do Raspberry Pi**

Seguindo os passos sugeridos pelo autor de [4], começou-se por montar e configurar o Raspberry Pi, inicialmente utilizou-se um teclado, um rato e um ecrã, conexão Ethernet, cartão micro SD, deu-se início a instalação do Raspberry Pi OS que foi um processo simples e rápido onde o leitor responde um conjunto de questões básicas; por predefinição, as credenciais de acesso do Raspberry Pi OS são: Utilizador: pi; Password: raspberry.

Para identificar o endereço IP que nos permite trabalhar remotamente no Raspberry PI, utiliza-se o comando "sudo ip addr show". Existem duas formas principais de fixar o endereço IP:

- 1-** Utilizar DHCP (este geralmente é dinâmico).



2- Fixar o IP no router, conhecido por IP estático; usado o comando "sudo nano /etc/network/interfaces" é aberto um ficheiro em edição que precisa-se substituir de acordo o IP desejado.

Se a opção for utilizar o DHCP utiliza-se "iface etho inet dhcp". Se o IP for o estático utiliza-se "iface etho inet static", "address IP", "netmask", "gateway"; também se pode utilizar a alternativa de acesso via WiFi, utilizando "iface wlan0 inet static", wpa-ssid "nome da rede", wpa-psk "password".

Após a configuração da rede podemos usar remotamente o Raspberry Pi usando o PUTTY e VNC viewer, através da conexão por SSH. Para iniciar sessão ao PUTTY deve-se introduzir o endereço IP, número do Porto, e seleccionar o tipo de conexão. E no VNC precisa-se apenas do endereço de IP.

Alguns comandos usados para instalar o servidor VNC no Raspberry Pi: "sudo apt-get install tightvncserver" e depois executar: "/usr/bin/tightvncserver".

## Desenvolvimento Do Sistema de Irrigação

Como se observa na Figura 1, a montagem do sistema de irrigação, iniciou-se conectando os sensores de humidade e temperatura ao Arduino:

- **Conexão:** o pino VCC do sensor de humidade foi ligado a 5 V no Arduino, o GND ao GND e o A0 a uma porta analógica (como A0); definiu-se o pino 7 do Arduino como um pino de 5V, que foi ligado ao VCC do sensor de temperatura, o respetivo GND ao GND, e o pino de saída analógica foi ligado ao A1 do Arduino.

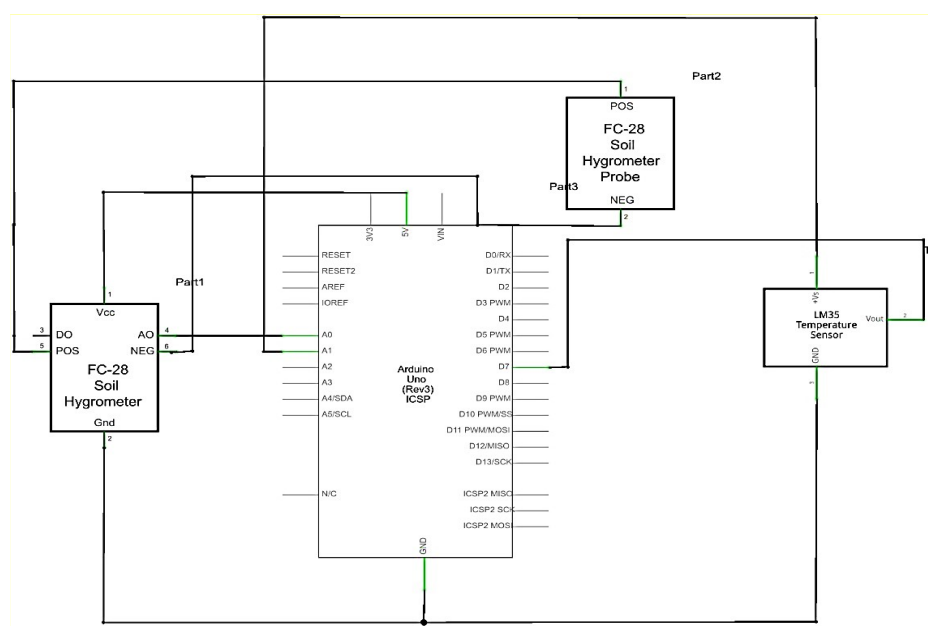


Figura 1-Esquema elétrico da montagem no Arduino.

- **Definição dos limites de programação:** Com base nas leituras, estabeleceram-se limites para determinar quando será conveniente regar ou não. Se o valor da leitura da humidade for <50% e a temperatura estiver entre 4 a 25 °C, o sistema informa que o solo necessita de água. Todas estas informações são enviadas através da comunicação *serial* para o Raspberry Pi.
- **Observações:** Neste contexto o Arduíno serviu apenas como um conversor intermediário entre os sensores de humidade/temperatura e o Raspberry Pi. Assim, o Arduíno apenas lida com a leitura analógica do sensor, enquanto o Raspberry Pi é dedicado ao processamento, ao armazenamento e na comunicação com serviços externos, ou mesmo à exibição dos dados.

A montagem com o Raspberry Pi envolve os seguintes passos:

- **Conexão:** O pino VCC do relé é ligado ao pino de 5 V do Raspberry PI, o GND ao GND, e IN ao pino 12 (PWM), como se apresenta na Figura 2. O relé foi ligado em modo normalmente aberto. Atrui-se-lhe a responsabilidade de acionar a minibomba de água submersível. Como a sua alimentação nominal é de 6 V foi necessário incluir uma fonte de alimentação compatível para habilitar a sua capacidade básica de funcionamento.
- **Configuração da Comunicação Serial:** configura-se a leitura dos dados do Arduíno através da porta serial USB, da seguinte forma: `comunicacaoSerial = serial.Serial('/dev/ttyACM0', 9600)`. Configura-se uma comunicação *serial* com o dispositivo conectado à porta através da utilização de `/dev/ttyACM0` a uma taxa de transmissão de 9600 b/s.
- **Controle do Relé:** o relé, inicialmente em nível baixo, é colocado em nível alto se o valor recebido for de humidade < 50% e a temperatura estiver no intervalo entre 4 a 25 °C; mas se não for esta condição, o relé mantém no estado baixo.

### Comunicação Com Os Módulos Xbee-Pro S1

As comunicações sem fios proporcionam flexibilidade e mobilidade, permitindo assim a troca de dados entre dispositivos em áreas remotas ou de difícil acesso. A interconexão entre o Raspberry Pi e os módulos XBEE-PRO S1 é realizada por meio das portas séries disponíveis no dispositivo, como se apresenta em [5].

Através da biblioteca Python "serial", é possível estabelecer uma comunicação bidirecional confiável, permitindo enviar e receber dados entre os nós da rede. A configuração para comunicação dos módulos XBEE-PRO S1 começou-se com a ligação dos módulos ao computador utilizando um adaptador USB da Libellium. O software XCTU deteta automaticamente os módulos XBEE-PRO S1 conectados como se observa na Figura 3 [5].

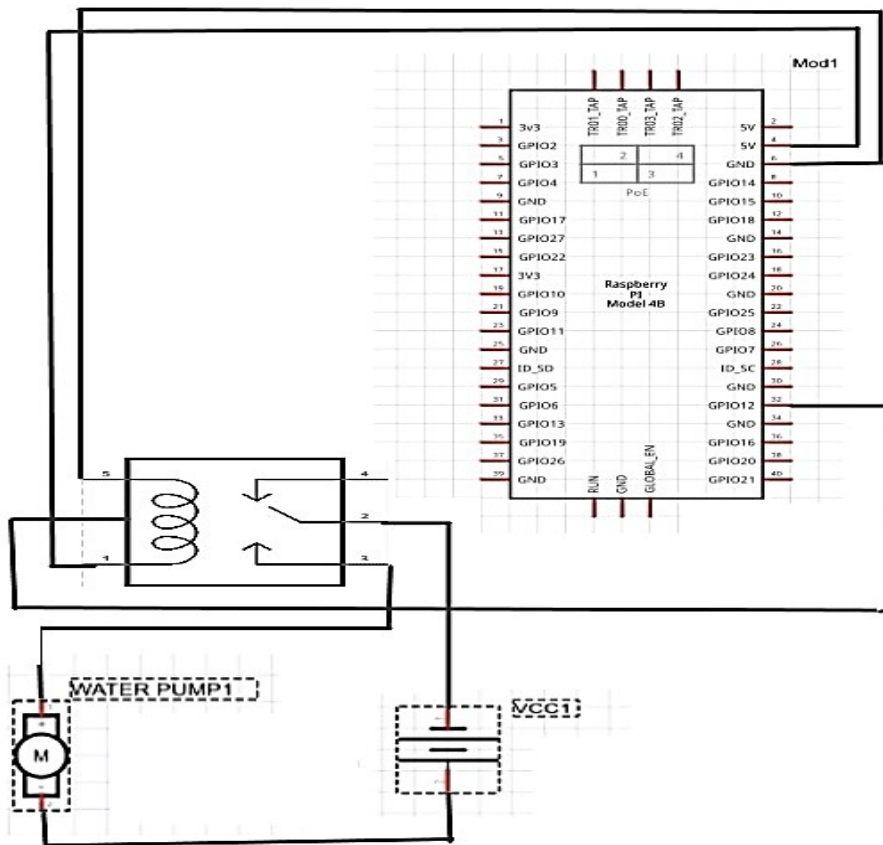


Figura 2-Esquema de ligação no Raspberry Pi

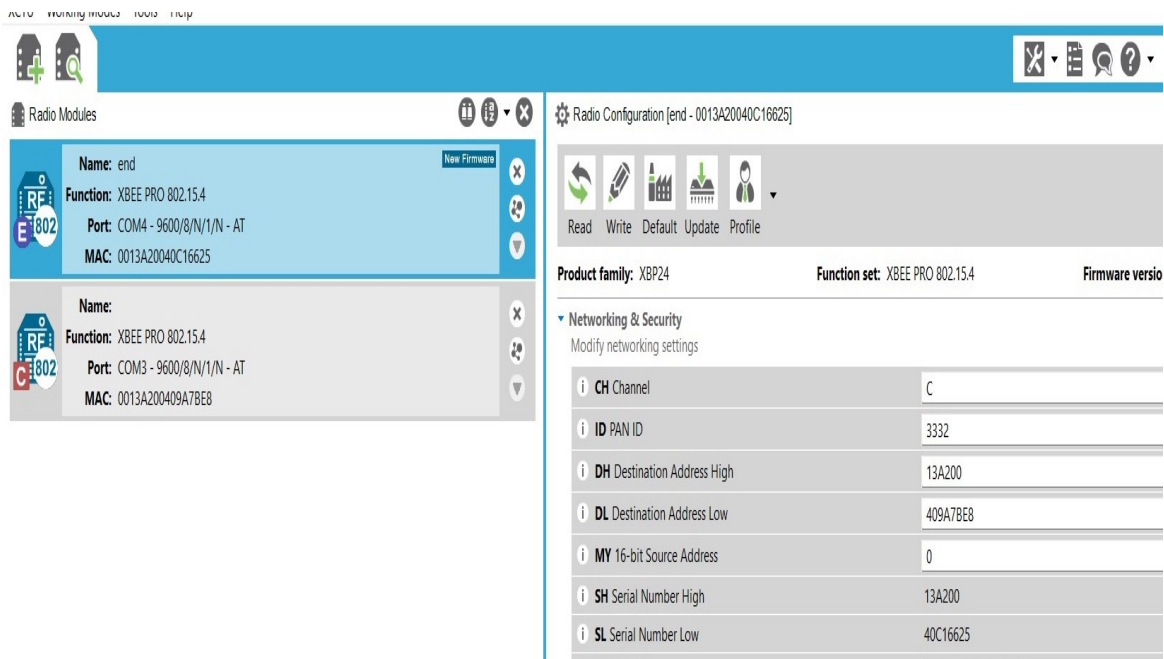
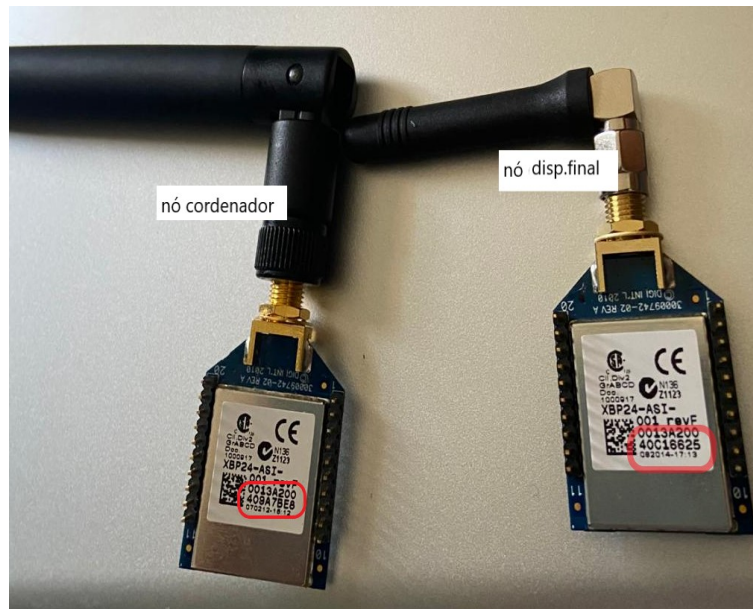


Figura 3-Configuração dos módulos no XCTU (foi selecionada a família XBP24; conjunto de funções XBEE-PRO 802.15.4, e a versão de firmware 10ee).

OS passos comuns para configurar os módulos XBEE-PRO S1 no modo AT são os seguintes. Deve-se garantir que os módulos tenham o mesmo PAN ID: 3332, e haja correspondência dos *destination address High* (DH)

e *destination address Low* (DL) dos endereços da camada MAC, como se apresenta na Figura 4. O DH e o DL devem trocar-se entre nós, ou seja, o endereço MAC do coordenador deve ser a concatenação do DH (os primeiros 8 dígitos) e do DL (os segundos 8 dígitos) do nó de dispositivo final. Por outro lado, o endereço MAC do nó de dispositivo final deverá ser a concatenação dos DH e DL do nó coordenador.



**Figura 4-Endereços dos nós coordenador e dispositivo final.**

A taxa de transmissão da interface *serial* para comunicação entre a porta *serial* do módulo e o *host* designa-se por BD. O parâmetro RO define o atraso entre caracteres necessários antes do início da transmissão. NB configura a paridade para o UART e o AP serve para habilitar o API.

Depois da configuração, a rede estará pronta a realizar a comunicação entre os sensores, em que um é o nó coordenador e outro é o nó fonte (dispositivo final).

Para que o Xbee coordenador envie os valores obtidos pelo script em Python para módulo Xbee *end-device*, utilizou-se a comunicação *serial* conectada ao módulo Xbee, envolvendo os seguintes passos:

Contemplam-se ainda os seguintes passos:

**Configurar a Comunicação Serial:** Configura-se a comunicação *serial* para a porta onde o módulo XBEE está conectado. Isso envolve definir a taxa de transmissão (baud rate) e outros parâmetros.

```
"ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', baudrate=9600)"
```

**Enviar valores:** Depois de ter a comunicação *serial* configurada, utiliza-se o comando `"ser.write(message.encode())"` para enviar dados para o módulo XBEE-PRO S1.

Executou-se o código no para certificar que o Xbee coordenador esteja a enviar os dados lidos ao End-device

A Figura 5 apresenta o protótipo do sistema de irrigação completo, compreendendo também comunicação dos módulos XBEE-PRO S1.



Figura 5-Prototipo do sistema de irrigação completo.

### Painel De Visualização

Foi criado um painel de visualização na plataforma *Blynk*, para controlar dentro e fora do local que se opera.

A plataforma *Blynk* por ser conhecida por conectar dispositivos via Internet e na nuvem, utiliza alguns métodos de segurança tais como [ 2 ] :

- **Autenticação:** Exige que o utilizador autentique o seu dispositivo e aplicações utilizando um Token de autenticação para que só os dispositivos autorizados se conectem a plataforma.
- **Comunicação encriptada:** Para evitar interações não autorizadas.
- **Controlo de acessos:** Capacidade de controlar quem pode aceder aos seus projetos.
- **Proteção de dados:** Políticas de privacidade para protecção de dados dos utilizadores.

A Figura 6 apresenta o fluxograma do sistema, após a leitura dos sensores de humidade e de temperatura, comunica ao Raspberry Pi e envia os dados no painel de interface *Blynk*, o Raspberry Pi compara os valores segundo aos critérios estabelecidos e mediante aos critérios liga ou desliga a bomba, e o nó coordenador comunica ao dispositivo final, espera durante um tempo para retomar o ciclo novamente. Os detalhes podem ser consultados em [6]

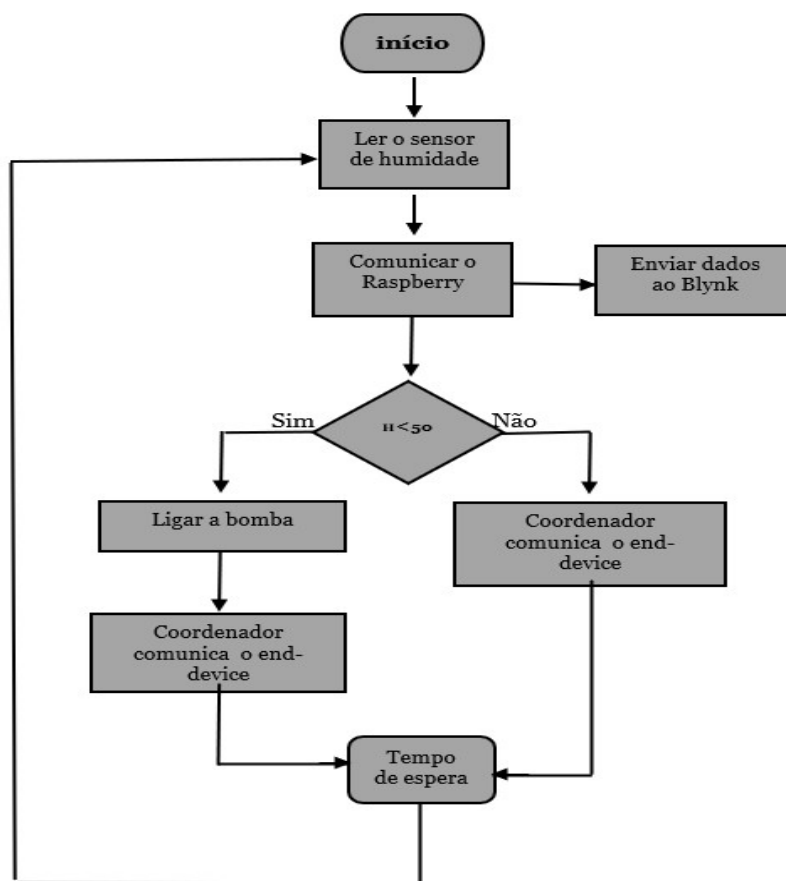


Figura 6-Fluxograma do sistema.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Consumo de Energia

A Figura 7 apresenta sistema composto por dois nós:

- um é o nó coordenador, que lê as informações vindas dos sensores, por meio do Raspberry Pi, passando também dados ao painel;
- e o outro é o dispositivo final, que recebe as informações vinda do coordenador.

A Tabela1 apresenta os dispositivos utilizados e suas respectivas taxas de consumo de energia (P), bem como o número de horas (T) que cada dispositivo está ligado ou em utilização. Com base nesses números, é possível calcular quantidade total de energia (E) consumida por cada dispositivo ao longo de uma hora.

$$E = P * T \quad (1)$$

O consumo total estimado de energia foi de 2,84 Wh (ou seja, 10368 J). Este valor representa uma quantidade relativamente reduzida de energia em comparação com muitos outros dispositivos eletrônicos. É importante considerar estes valores ao projetar sistemas eletrônicos, especialmente quando se analisa a eficiência energética.

Além da estimativa do consumo de energia no período de uma hora, utilizou-se o Wattímetro para saber o consumo real de energia do sistema, como se apresenta na Figura 8.

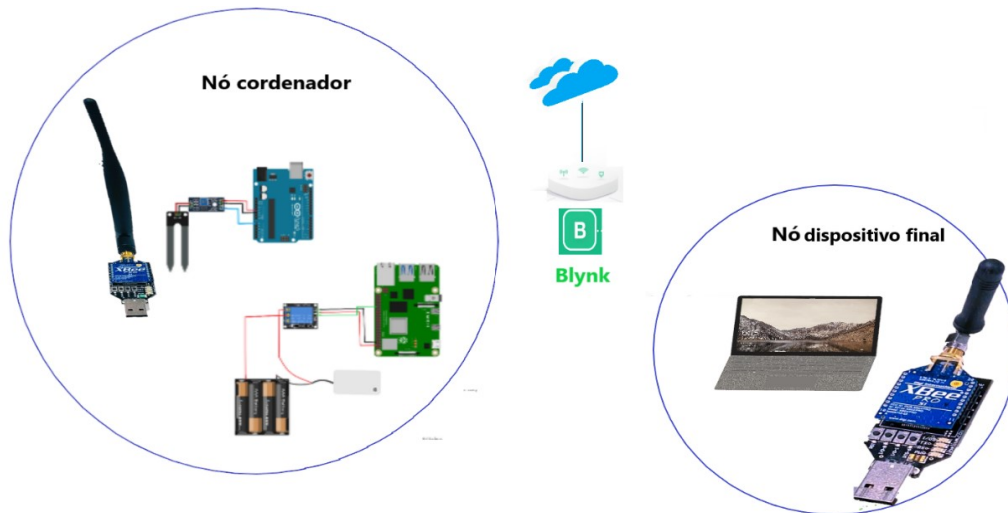


Figura 7-Ilustração do sistema completo de comunicação.

Tabela 1 – Consumo de Energia[6].

Dispositivo	Potência (W)	Tempo(h)	Energia (Wh)
Arduíno	0,03	1	0,03
Raspberry Pi	2,7	1	2,7
Relé	0,005	1	0,005
Sensor H	0,005	1	0,005
XBEE-PRO S1	0,1	1	0,1
Sensor T	$0,09 \cdot 10^{-3}$	1	$0,09 \cdot 10^{-3}$

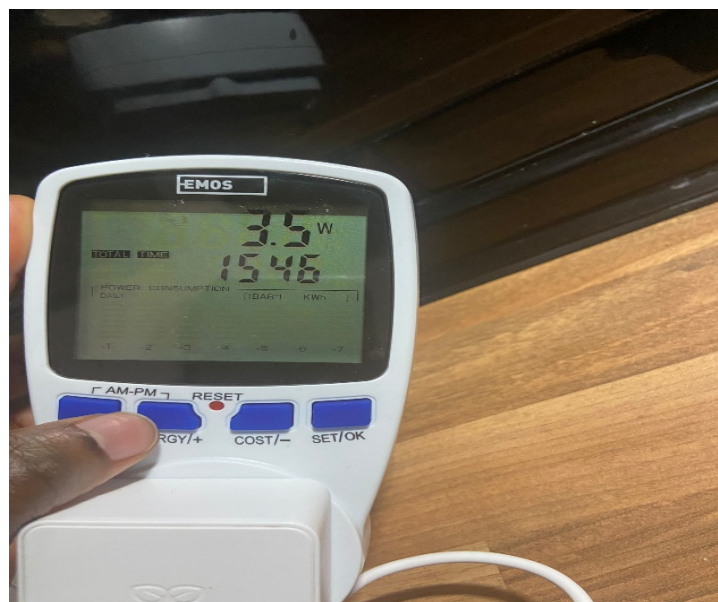


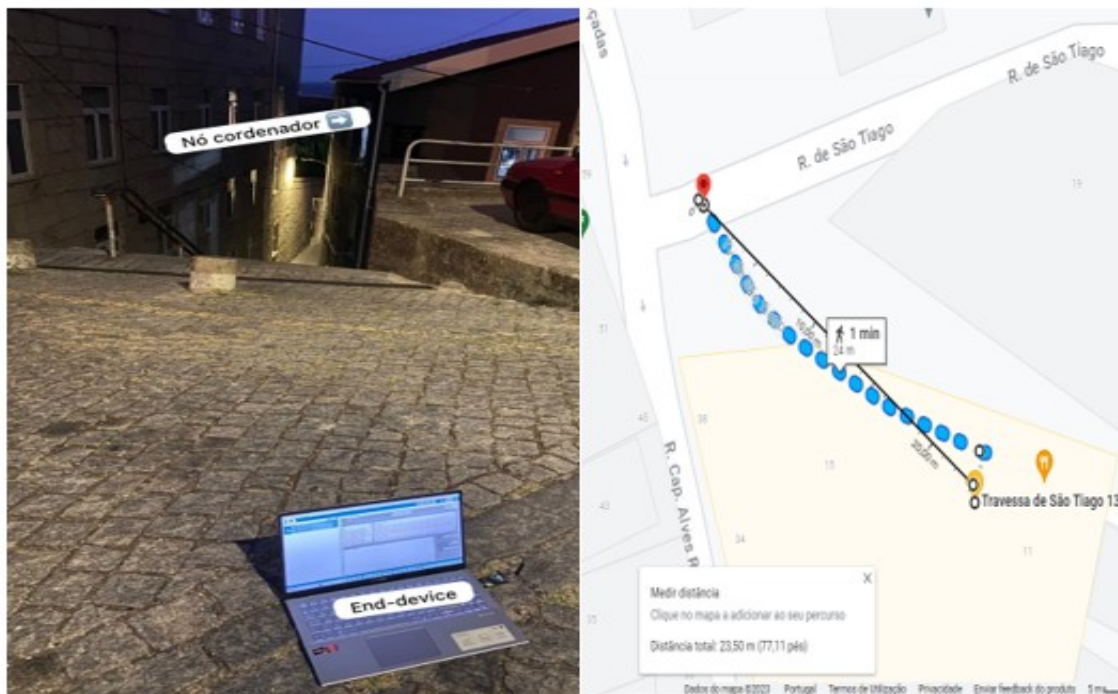
Figura 8-Consumo de energia vista pelo Wattímetro.

Com uma duração total de 15 horas e 46 minutos, o sistema consumiu uma energia total de 54,11 Wh, correspondendo uma potência de 3,5 W, que é um valor de consumo aceitável e que se aproxima do valor esperado.

Existe no entanto uma ligeira diferença entre o cálculo estimado e o real, devido ao sensor de temperatura, visto que esse é um dispositivo que fornece uma saída analógica proporcional à temperatura. Este facto tem como consequência que, mediante o período de tempo que a temperatura varia, a tensão também varia. Por este motivo, o valor do consumo real pode ser ligeiramente diferente do consumo estimado.

### 3.2 Testes de Alcance

Foram efetuados dois testes de alcance em locais diferentes. No primeiro teste, no ambiente da Figura 9, o nó coordenador estava dentro de um compartimento e a distância entre o nó de dispositivo final e o coordenador era separado por uma parede; os resultados indicam que em zonas urbanas a comunicação é mais eficaz a curtas distâncias, com uma resposta confiável e eficiente obtida entre 10 e 20 metros. No entanto, conforme a distância aumenta, a confiabilidade e a velocidade da comunicação diminuem consideravelmente. Isso é evidenciado pelos testes bem-sucedidos entre 20 e 30 metros, mas com respostas consideravelmente demoradas, o que não é mal segundo a norma IEEE 802.15.4.



**Figura 9-Primeiro teste de alcance dos nós na Traversa de São Tiago 13, na Covilhã.**

O segundo teste, foi realizado na UBIMedical, onde colocamos o nó coordenador e o dispositivo final em espaço livre sem barreira nenhuma, como se apresenta na Figura 10.



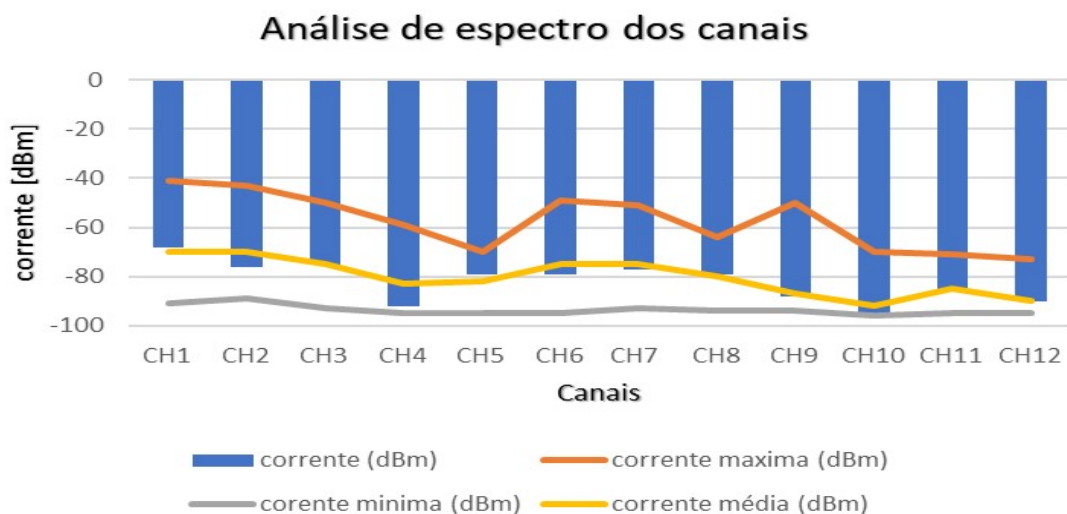


**Figura 10-Segundo teste de alcance dos nós, na UBIMedical.**

Os resultados indicam que quando os nós são distribuídos sem barreiras nenhuma, a comunicação é mais eficaz para distâncias até cerca de 60 metros, sem perda de mensagens. Já para distâncias superiores a 60 metros, constatou-se a perda de dados e atraso na recepção dos dados. A Figura 10 também apresenta a distância de teste com eficácia.

### 3.3 Análise dos Canais

Como se apresenta nas Figuras 11, o software XCTU, permitiu observar o espectro das bandas de rádio de 12 canais, possibilitando a observação do nível da intensidade do sinal dos canais, incluindo medições de máxima, mínima e média para ajudar na melhor configuração da rede. Quanto maiores forem os valores das correntes em dBm, melhor o sinal do canal.



**Figura 11-Análise do espectro dos canais na banda ISM (a 2,4 GHz).**

Os resultados apresentados na Figura 11 mostram que o CHI demonstrou ser o melhor canal, pelo valor máximo de intensidade atingido, o que o torna numa conexão mais forte e estável.~

### Medição do RSSI e Taxa de Transferência de Dados

O Received Signal Strength Indication (RSSI) indica a intensidade do sinal recebido, é expressa em dBm, e é utilizado para avaliar a qualidade do sinal de rádio ou a potência do sinal em uma conexão de comunicação sem fio. O RSSI é dado pela seguinte formula:

$$RSSI = 10 \log \frac{P_r}{P_{ref}} \quad (3)$$

onde  $P_r$  é a potência recebida, e  $P_{ref}$  é a potencia recebida por referência e, normalmente, tem o valor de 1 mW. Para se saber o valor RSSI, o XCTU dá-nos a opção *Range Test*. O valor medido de RSSI é obtido após a transferência de 100 pacotes de 34 bytes cada e feita a média do RSSI de cada transmissão. Após a configuração dos dados geram-se gráficos, como se apresentam nas Figuras 12 e 13.

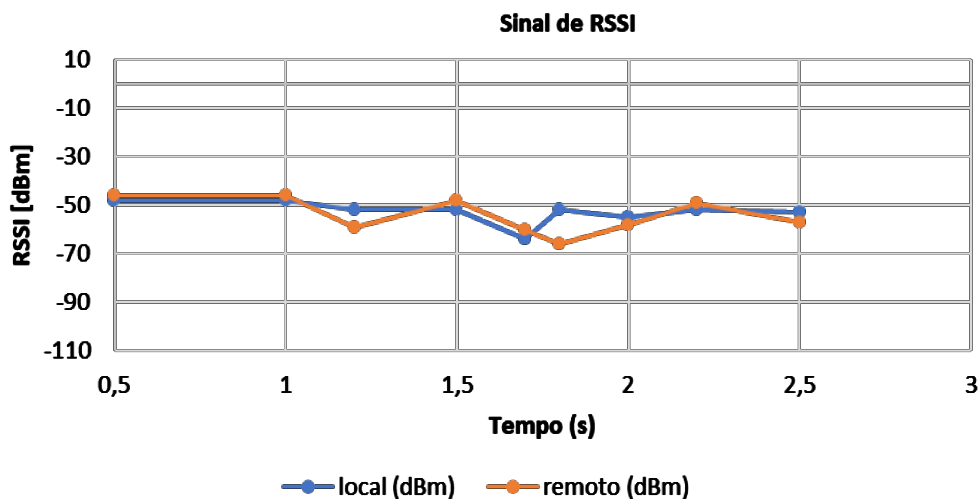


Figura 12-Monitorização dos valores medidos do RSSI.

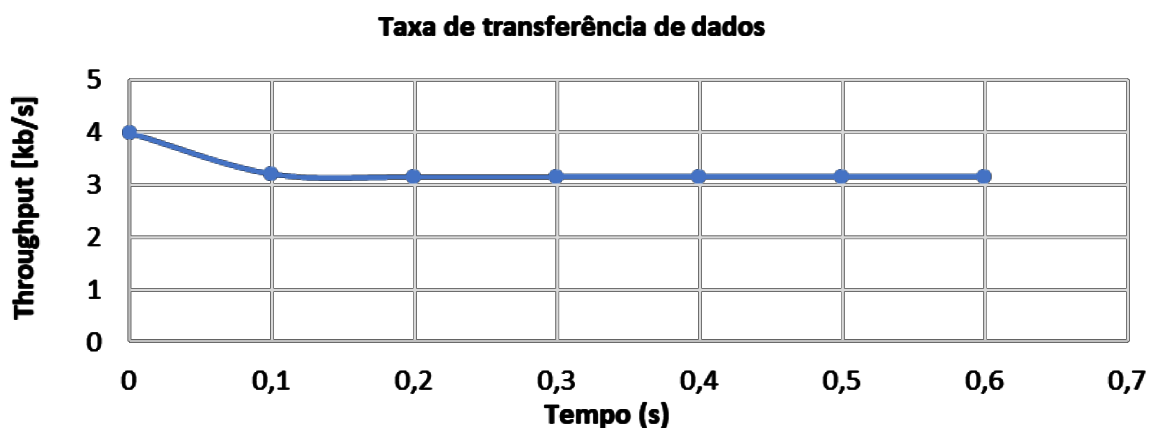


Figura 13-Evolução da taxa de transferência de dados ao longo do tempo.

Os valores de RSSI obtidos dependem do local, e da distância. Neste caso, os valores de RSSI do nó local e do nó remoto obtidos estão compreendidos em valores espetáveis que se aproximam ao valor médio, e constata-se a perda de pacotes. Em alguns momentos, o valor de RSSI chega a -50 dBm, o que corresponde a uma qualidade do sinal aceitável, ou seja, “boa” (e quanto maior melhor).

A taxa de transferência de dados é a quantidade de dados que um sistema pode processar em um determinado tempo. Para saber o valor da taxa de transferência, o XCTU dá-nos a opção *throughput*; foi utilizado um intervalo de um minuto de transmissão e pacotes de 100 bytes. Como podemos observar na Figura 13, a taxa de transferência média foi de 3,15 kb/s, este teste foi feito a pouco mais de 1,5 metros de distância, em local fechado.

### Painel de Visualização

Como resultado do painel criado na plataforma *Blynk*, esta interface permite fazer a leitura dos dados da humidade e temperatura em tempo real tornando-os disponíveis para acompanhamento e análise. A interface também traz a possibilidade de ser instalada em smartphones, como se apresenta na Figura 14.

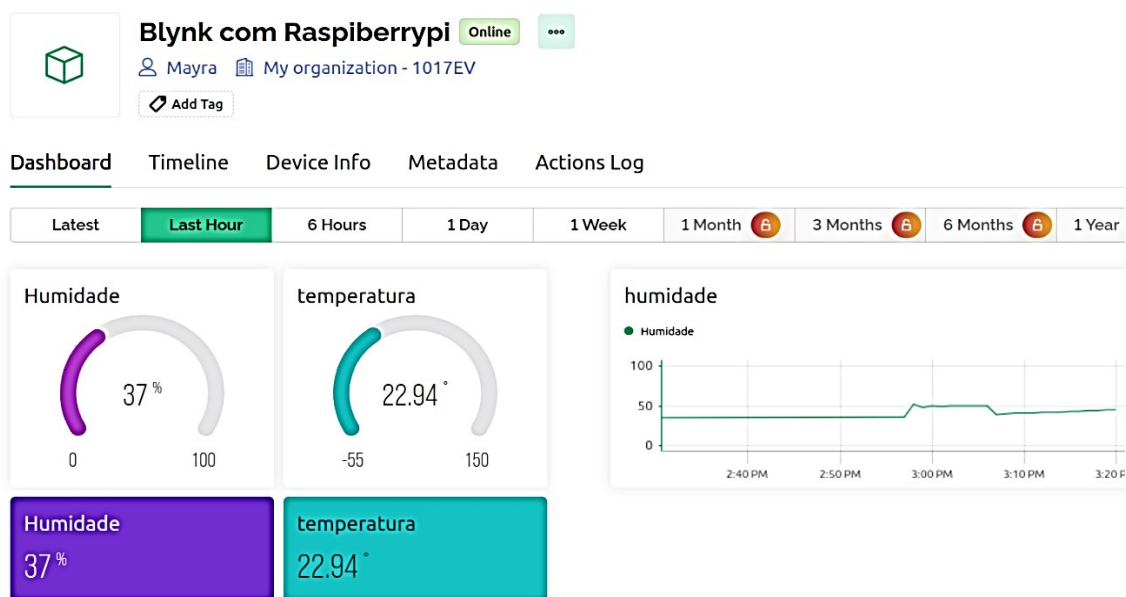


Figura 14-Apresentação do painel no Blynk.

Os testes efetuados na camada de aplicação da plataforma de controlo e gestão de dispositivos IoT, foram realizados com sucesso, desde o registo, autenticação, conectividade e segurança na comunicação via HTTP.

## 4 CONCLUSÕES

Concluiu-se que enquanto que valor real do consumo de energia no período de uma hora foi de 3,5 Wh, o valor estimado do consumo de

energia no período de uma hora foi de 2,84 Wh. A diferença resulta principalmente da diferença entre os valores estimado e medido para o sensor de temperatura, pois existe dependência da tensão relativamente à temperatura real medida.

Quanto aos resultados da comunicação sem fios, o valor medido de RSSI mais elevado foi de -50 dBm, que corresponde a uma “boa” qualidade de sinal. A taxa de transferência de dados média foi de 3,15 kb/s, uma velocidade de transferência aceitável dado que foram enviados dados simples como leitura de humidade e temperatura.

O desenvolvimento da interface criada na plataforma *Blynk* foi eficiente, pois o *Blynk* é muito simples de utilizar, e tem a vantagem de se poderem monitorizar os parâmetros através de um *smartphone*, de qualquer forma, em qualquer momento e lugar desde que haja ligação à Internet. A plataforma *Blynk*, utilizada para conectar dispositivos via internet e na nuvem, utiliza alguns métodos de segurança, como o *Token* de autenticação para que só os dispositivos autorizados se conectem a plataforma; comunicação encriptada; controlo de acessos e proteção de dados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Telecomunicações, e à FCT/MCTES que financiou este trabalho através de fundos nacionais e quando aplicável cofinanciado por fundos comunitários no âmbito do projeto com referência UIDB/EEA/50008/2020 e identificador DOI <https://doi.org/10.54499/UIDB/50008/2020>.

## REFERÊNCIAS

1. DIGI INTERNATIONAL INC. \*\*Guia do usuário XBee/XBee-PRO S1 802.15.4 - Sobre os módulos RF XBee/XBee-PRO S1 802.15.4 (legado)\*\*.  
Disponível em: <https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90000982/Default.htm>. Acesso em: 09 set. 2024.
2. BLYNK. \*\*Introduction\*\*. Disponível em: <https://docs.blynk.io/en/>. Acesso em: 09 set. 2024.
3. COELHO, P. \*\*5G e Internet das Coisas\*\*. 1. ed. 2022.
4. COELHO, P. \*\*5G e Internet das Coisas\*\*. 2. ed. Lisboa: FCA.
5. LIBELIUM. \*\*XBee X-CTU tutorial\*\*. Disponível em: <https://development.libelium.com/xbee-x-ctu-tutorial/>. Acesso em: 09 set. 2024.
6. PUNGO, É. M. S. \*\*Eficiência Energética das Redes de Sensores sem Fios para Agricultura de Precisão\*\*. Covilhã, PT: Universidade da Beira Interior, 2023.
7. SILVA, T. A. A. da. \*\*Percepção de Risco, Produção de Energia Eólica e Pequenos Agricultores do Agreste Pernambucano\*\*. CECS, v. 11, n. 1,

- jul. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.47456/cadecs.v11i1.41925>>. Acesso em: 09 set. 2024.
8. TAMACHIRO, T. S. O.; JUNIOR, F. N.; MARQUES, M. A. M. **\*\*Estudo de Implantação de Sistema Piezoelétrico para Geração de Energia Limpa em um Controle de Videogame\*\***. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGERP), 2019, Santos/SP, Brasil. Anais [...]. 2019. Disponível em: <[https://doi.org/10.14488/ENEGERP2019\\_TN\\_STO\\_298\\_1684\\_37205](https://doi.org/10.14488/ENEGERP2019_TN_STO_298_1684_37205)>. Acesso em: 09 set. 2024.
9. AUGUSTIN, A.; YI, J.; CLAUSEN, T.; TOWNSLEY, W. M. **\*\*A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things\*\***. *Sensors*, v. 16, n. 9, set. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s16091466>>. Acesso em: 09 set. 2024.
10. NADZIEJKO, A. **\*\*Wireless Sensor Networking Applied to Swarms of Aquatic Drones\*\***. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, PT.
11. LIBELIUM. **\*\*XBee X-CTU tutorial\*\***. Disponível em: <<https://development.libelium.com/xbee-x-ctu-tutorial/>>. Acesso em: 09 set. 2024.
12. HENRIQUES, D. J. S. D. **\*\*Implementação de um Sistema de Rega Inteligente\*\***. Tomar, PT: Instituto Politécnico de Tomar, 2019. Disponível em: <[https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/31426/1/Relatorio\\_Projeto\\_Final\\_Mestrado.pdf](https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/31426/1/Relatorio_Projeto_Final_Mestrado.pdf)>. Acesso em: 09 set. 2024.
13. SILVA, G. H. G. **\*\*Estudo de Padrões de Comunicação em WBANs: Uma Análise Comparativa das Técnicas de Escalonamento de Filas em Dispositivos Bluetooth Low Energy\*\***. Londrina, BR: Universidade Estadual de Londrina, 2023.
14. FACINA, A. R.; TANCREDO, R. G.; FACINA, M. S.; FRAIDENRAICH, G. **\*\*Comunicação LoRa na Zona Rural: Análise Baseada em uma Campanha de Medição no Noroeste Paulista\*\***. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBRT), 2021. Anais [...]. 2021.
15. JAWAD, H. M.; NORDIN, R.; GHARGHAN, S. K.; JAWAD, A. M.; ISMAIL, M. **\*\*Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review\*\***. *Sensors*, v. 17, n. 8, p. 1781, ago. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s17081781>>. Acesso em: 09 set. 2024.
16. PENTTINEN, J. T. J., Ed. **\*\*5G Second Phase Explained: The 3GPP Release 16 Enhancements\*\***. 1st ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2021.
17. MUTEBA, K. F.; DJOUANI, K.; OLWAL, T. **\*\*5G NB-IoT: Design, considerations, solutions and challenges\*\***. *Procedia Computer Science*, v. 198, p. 86–93, 2022.



## **INTERNET OF THINGS APPLIED TO THE INTELLIGENT MANAGEMENT OF PARKING PARKS IN THE OLD AREA OF COVILHA**

**PAIVA, JOAO P. (1); BARATA, RUI (2); VELEZ, FERNANDO J. (3); FLANIGAN, KATHERINE A. (4); REIS, ANTONIO D. (5)**

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [joao.paiva@ubi.pt](mailto:joao.paiva@ubi.pt)

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: [rbarata@ubi.pt](mailto:rbarata@ubi.pt)

(3) Universidade da Beira Interior, E-mail: [fjv@ubi.pt](mailto:fjv@ubi.pt)

(4) Carnegie Mellon University, E-mail: [kaflanig@cmu.edu](mailto:kaflanig@cmu.edu)

(5) Universidade da Beira Interior, E-mail: [adreis@ubi.pt](mailto:adreis@ubi.pt)

### **ABSTRACT**

*This work presents a study on how the Internet of Things (IoT) can be applied to the intelligent management of car parks in the historic area of Covilhã. The aim is to study parking areas and parking lots, challenges faced when trying to find a parking space, and ultimately apply technologies, such as IoT, in order to mitigate and solve some of the existing problems. This study can be extrapolated to other mountain cities all across Europe, as they have very similar characteristics to Covilhã, such as steep terrain, narrow streets and old architecture. Ultimately, one of the main objectives of this study is to formulate how, through the use of technologies such as the IoT, innovative solutions can be created to solve current issues in cities, bringing them ever closer to a modern 'Smart City', a city capable of providing intelligent answers to its various users. A Smart City brings together several technologies which, when combined, facilitate the management of various functions such as mobility, energy, parking, transport, among other resources. The case study presented, as mentioned before, is that of Covilhã, Portugal. It has an old and historic part, with run-down houses, narrow streets, difficult traffic circulation and complicated parking, and a new part, with modern buildings and wide streets. Consequently, in the more historic part of the city, there are several car parking problems. To reduce this problem, auto silos were built. However, they lack information about their location, operation and real-time information about how many parking spots are available at one given time. Thus, combining the IoT and Smart City concepts, some theoretical and practical modernization proposals are explored in this article. The study is focused on the Mercado, Sporting Shopping, and the Pelourinho parking lots. There is also a proposal in the sense of preparing the spaces to prioritise the housing of electric cars as well as making it possible to charge their batteries while they are parked inside the silos. As for the proposed vehicle counting mechanism, it consists of an electronic device equipped with ultrasonic sensors, placed on the ceiling, to count the free parking spots. These sensors are then connected to an electronic prototyping platform, in this case an Arduino. This equipment is then capable of counting the number of vacant spaces and send the corresponding information in order to present it in the digital screens, visible from the outside of the park. This*

*real-time information can also be sent, through the IoT, to displays in central areas of the city. This way, drivers have access to valuable information in order to make the best decision when parking.*

**Keywords:** *Internet of Things, Smart city, Sensors, Arduino.*

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre como a Internet das Coisas (IoT) pode ser aplicada à gestão inteligente de parques de estacionamento na zona histórica da Covilhã. O objetivo é estudar as áreas de estacionamento e os parques (destinados para o mesmo efeito), os desafios enfrentados quando se tenta encontrar um lugar de estacionamento e, por último, aplicar tecnologias, como a IoT, para mitigar e resolver alguns dos problemas existentes. Este estudo pode ser extrapolado para outras cidades de montanha em toda a Europa, uma vez que têm características muito semelhantes às da Covilhã, como terrenos inclinados, ruas estreitas e uma arquitetura antiga. Em última análise, um dos principais objectivos deste estudo é formular como, através da utilização de tecnologias como a IoT, podem ser criadas soluções inovadoras para resolver os problemas actuais das cidades, aproximando-as cada vez mais de uma 'Smart City' moderna, uma cidade capaz de dar respostas inteligentes aos seus vários utilizadores. Uma *Smart City* reúne várias tecnologias, que quando combinadas, facilitam a gestão de várias funções como a mobilidade, energia, estacionamento, transportes, entre outros recursos. O caso de estudo apresentado, como já foi referido anteriormente, é o da Covilhã, Portugal. Esta cidade tem uma parte antiga e histórica, com casas degradadas, ruas estreitas, difícil circulação de tráfego e escassez de estacionamento, e uma parte nova, com edifícios modernos e ruas largas. Consequentemente, na parte histórica da cidade, existem vários problemas de estacionamento automóvel. Para reduzir este problema, foram construídos silos auto. No entanto, estes carecem de informação sobre a sua localização, funcionamento e informação em tempo real sobre quantos lugares de estacionamento estão disponíveis num determinado momento. Assim, combinando os conceitos de IoT e *Smart City*, algumas propostas teóricas e práticas de modernização são exploradas neste artigo. O estudo é focado nos silos Mercado, *Sporting Shopping* e Pelourinho. Há também uma proposta no sentido de preparar os espaços para priorizar o alojamento de carros eléctricos, assim como possibilitar o carregamento das suas baterias enquanto estiverem estacionados dentro dos silos. Quanto ao mecanismo de contagem de veículos proposto, este consiste num dispositivo eletrónico equipado com sensores ultra-sónicos, colocado no teto do parque, para contar os lugares de estacionamento livres. Estes sensores são depois ligados a uma plataforma de prototipagem eletrónica, neste caso um Arduino. Este equipamento é então capaz de contabilizar o número de lugares vagos e enviar a informação correspondente para a apresentar nos ecrãs digitais, visíveis do exterior do parque. Esta informação em tempo real pode também ser enviada, através da IoT, para ecrãs em zonas centrais da cidade. Desta forma, os condutores têm acesso a informação privilegiada para tomarem a melhor decisão no momento de estacionar.

**Palavras-chave:** Internet das coisas, Cidade Inteligente, Sensores, Arduino.

## **1 INTRODUCTION**

The aim of this article is to study and propose solutions to some of the parking problems in the historic part of the city of Covilhã. Through the use of 'Smart Cities' and 'Internet of Things' concepts, a system will be exemplified, based on communication between sensors, with storage in databases and through a wireless network (Internet), encompassed in an IoT architecture, which allows the intelligent management of the municipality's public utility services in the city of Covilhã.

This study is motivated by the author's experience as a resident of the city, as well as the experiences of many other people we have had the opportunity to interview, who have told us that they suffer from this problem on a daily basis. In this sense, the main objective of this report will be to propose a possible solution that can make a positive contribution to reducing the existing problem of the lack of parking spaces in the center of Covilhã, as well as providing clearer information about parking spaces, such as silos and parks, so that citizens have a better experience when using them.

Methodologically, this article has initially been based on a bibliographical review of the main topics covered. Next, data and information have been collected on the case study, the city of Covilhã. Finally, a prototype will be presented, consisting of an Arduino, ultrasonic sensors and an LED display, which can be applied to a parking lot in order to count vacant spaces in real time.

## **2 LITERATURE REVIEW**

### **2.1 PARKING AND ENERGY SUSTAINABILITY IN HISTORIC AREAS OF EUROPEAN CITIES**

Nowadays, with the growing population in most European and world cities, as well as the increase in the use of motor vehicles in them, it is common for the historic areas of different municipalities to face a series of difficulties in responding to issues such as the lack of parking and, more recently, in the search for more environmentally sustainable alternatives, such as the increasingly rapid transition to electric vehicles.

Today, around half of the world's population already lives in cities, and this figure is expected to rise to 70% by 2050 [1]. As this increase takes place, it is only natural that there will be a greater demand for vehicles in the future, and forecasts suggest that by 2050, the number of vehicles in circulation will exceed 2.5 billion, according to the International Parking



Institute (IPI) [1]. Some of the reasons for the difficulties experienced in cities, and especially in their older areas, are that in many cases they are not prepared, in terms of physical and electrical infrastructure, to deal with the growing flow of traffic, with a shortage of spaces for parking vehicles, outdated technology for providing quick and clear information to people, as well as narrow streets [2, 3]. In many cases, the high monetary costs of using vacant and old buildings to build parking lots or redesign infrastructure and traffic routes make it impossible to carry out such work in cities. In order to solve some of these issues, it is above all necessary to take into account and understand the origin of the demand for these spaces [4].

Fundamentally, it is possible to narrow down the main causes of the difficulties that historic areas of various cities, especially European ones, face when it comes to parking and charging for electric vehicles to three: Physical space restrictions, Inadequate electrical infrastructure and Protection of historical heritage.

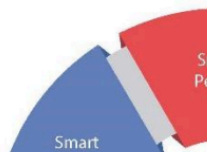
The difficulty of parking and charging electric vehicles in old parts of cities is a complex challenge, but one that can be tackled. Through a range of innovative solutions, such as the adaptation of underutilised spaces, public-private partnerships, and the use of advanced charging technologies, it is possible to overcome these obstacles and promote the transition to more sustainable mobility.

## 2.2 **SMART CITIES**

The characterization and definition of a Smart City varies according to different authors, that is, depending on their area of expertise and their different points of view. For this reason, it is possible to find various definitions of the same concept in the literature. Even so, there are key aspects on which the authors largely agree [5]. In general terms, and combining some of the different opinions of authors in the literature, a Smart City is an urban area that uses Information and Communication Technologies (ICT) to improve the quality of life of its inhabitants, optimise resource management and promote sustainable development [5]. In a Smart City, various systems and infrastructures are connected and integrated, allowing data to be collected, analysed and used in real time to make more efficient and convenient decisions for its users [5]. These technologies are applied in different sectors, such as transportation, energy, management, infrastructure, security, healthcare and the environment. For example, a Smart City can use sensors to

better manage traffic and adjust traffic lights according to real-time conditions, reducing congestion and improving the flow of traffic [6]. In addition, intelligent energy management systems can optimise consumption, reduce waste and promote the use of renewable sources [7].

The 'Components' or 'Areas of Action' of Smart Cities are defined according to the areas of the city in which technological intervention may be required [8]. As with the topic discussed above, there are various interpretations and formulations of the components of a Smart City in order to divide it into subcategories. Although they vary, they end up conveying similar messages [8]. In general, however, the literature divides a smart city into six different components, as shown in Figure 1 [9]:



**Figure 1 – The Smart City divided into 6 components [9]**

### 2.3 THE INTERNET OF THINGS (IoT)

The IoT and its evolution go back to the creation of the Internet. The Internet began by connecting computers. These computers would later be connected to each other via the World Wide Web (WWW) [10]. In recent decades we have seen the possibility of integrating mobile devices, such as cell phones, into this network. Finally, and more recently, the idea of linking everyday devices to the Internet has emerged, giving rise to the IoT [10]. The 'Internet of Things' refers to a network of interconnected physical objects that are equipped with sensors, software and other technologies, allowing them to collect and exchange data via the Internet [10, 11]. These objects can range from household electronic devices to industrial machines or even vehicles [12]. This technology has various components which, when combined, allow data to be collected, trafficked, processed and analysed, as well

as access to this information by users [12]. The importance of the IoT lies in the fact that, through this technology and with minimal or no human intervention, it is possible to interconnect objects, systems and devices cheaply and efficiently [12].

Overall, the structure of IoT can be seen in Figure 2:



**Figure 2 – Structure of IoT [13]**

### **3 CHARACTERIZATION OF THE CITY OF COVILHÃ AND PARKING OPPORTUNITIES**

#### **3.1 A BRIEF HISTORY OF THE CITY**

The history of the city of Covilhã dates back to the period of Romanization of the Iberian Peninsula, when its first inhabitants, mostly shepherds and cattle breeders, settled in the area due to the favourable conditions for practising their trades [14].

It was at the end of the 16th century that the Count of Ericeira, D. Luís de Menezes, inaugurated the first Royal Factory in the city, in Ribeira da Carpinteira. The dynamism and commercial importance of this area, and of Covilhã in particular, was at the time quite central to the economic growth of Portuguese territory. In fact, Covilhã had the fundamental conditions for success in the wool industry. The two streams that run through it, the Carpinteira and the Degoldra, provided the hydraulic energy needed to run the factories, and the cattle breeding that already existed in the area made it possible to obtain raw materials in abundance, such as wool [14, 15].

The 19th century is particularly significant for the history of Covilhã, as it was around this time, specifically in 1870, that it gained city status, largely due to the socio-cultural growth driven by the development of industries [14, 16]. At the turn of the 20th century, Covilhã continued to grow.

Official data from censuses show that in the first half of the century, between 1900 and 1950, the city's population grew by around 54%, from 44,427 inhabitants to 68,522 [17, 18]. The population peaked 10 years later, in 1960, when, according to data from the censuses carried out at the time, Covilhã reached a resident population of around 72,957 [18]. At the beginning of the 1970s, Covilhã, which until then had prospered in social and economic terms, suffered a crisis, mainly as a result of the closure of many of its textile factories and industries [16]. These were not technologically advanced enough to cope with competition from abroad and many even failed to meet safety and compliance standards, which led to their closure [16].

From the 1980s and 1990s onwards, the city spread to a flatter area, where until then there had been a series of plots of land and farms. The so-called 'new part of town' had good geographical characteristics for the construction of buildings, roads and other infrastructure. This newer area attracted outside investment and is, to this day, where the most modern buildings are located. Today, Covilhã is mainly a university and tourist town, as it is the largest urban centre in the Serra da Estrela area [16].

### 3.2 LOCATION AND GEOGRAPHIC CONTEXT

The municipality of Covilhã is located in Beiras and Serra da Estrela (NUT III), more specifically in the district of Castelo Branco, which in turn is bordered to the north by the district of Guarda, to the east by Spain, to the west by the districts of Coimbra and Leiria, and to the south, again, by Spain and also by the districts of Santarém and Portalegre [19]. Covilhã's geographical context, as well as that of the surrounding areas, is also very particular and rare in the Portuguese urban panorama, as it is located on the slopes of a mountain range, Serra da Estrela, which is the highest in mainland Portugal. The city has an average altitude of around 700 metres and is considered the most important urban centre in the Serra da Estrela area [20]. Because of these factors, the city is often nicknamed the 'Snow City'.

### 3.3 POPULATION AND INFRASTRUCTURE DISTRIBUTION

The newer part of the city is characterised by newer, more modern buildings, such as taller, structurally better planned residential buildings with underground garages, attics and basements. The avenues, roads and sidewalks are wider and there are more green and leisure spaces, such as gardens. The population of this area is younger than that of the

old part of Covilhã, since most of the residents of the historic area are older people who were born, grew up and have always lived there. In the old part of Covilhã, on the other hand, we can find historic buildings that date back, in some cases, several hundred years.

### **3.4 IDENTIFICATION OF SOME TRAFFIC AND PARKING PROBLEMS IN THE OLD TOWN**

The Pelourinho area, considered the center of Covilhã, is undoubtedly the main artery in the most historic part of the city and it is also from here that you can access the city's main attractions, public services and leisure facilities. For this reason, the roads leading to Pelourinho are the ones with the biggest traffic problems. It is common for people moving around the city, who are unaware of the existence of parking spaces such as the municipal silos, to waste time on these roads looking for a place to stop or park their vehicle, which aggravates the problem and creates even more embarrassment on these avenues. In order to minimise this embarrassment in the various arteries of the historic area, investment should be made in informing the different users of the city of the possibilities available to them in terms of parking their cars.

There are four avenues that give access to the Pelourinho: Rua Visconde da Coriscada, Rua Rui Faleiro, Rua António Augusto and, finally, Rua Comendador Campos Melo, also known as 'Rua Direita'. In addition to the general problems common to all of them, each of these streets has its own specific problems.

### **3.5 CHARACTERIZATION OF MUNICIPAL PARKING LOTS AND THEIR OPERATION IN THE HISTORICAL AREA OF COVILHÃ**

In the historic area of Covilhã we can find three municipal parking lots. These are all within a 200-metre radius of the Pelourinho [21], which is considered the city centre:

- Covilhã Municipal Market Silo: One of the oldest silos in the city is the one located in the Covilhã Municipal Market building. It consists of just one floor and has a total of 35 parking spaces;
- Sporting Shopping Silo: It was in 1993, more specifically on December 8, that the Sporting Shopping Center and consequently the parking lot of the same name were inaugurated. It is extremely important to this area, as it is one of the largest parking spaces in the historic area, along with the Praça do Município car parking. Consisting of three floors, this space has the capacity to hold 150 vehicles in its entirety;

- Praça do Município Car Parking: Located to the north of the Sporting Shopping silo, on the same street, we can find the Praça do Município car parking. It is the most modern of the three silos in the old town, and was inaugurated on March 8, 2002, in a historic project that redeveloped this area of the city. It has three floors and can hold up to 371 vehicles.

## **4 PROPOSAL OF IDEAS AND POSSIBLE SOLUTIONS**

### **4.1 IMPLEMENTATION OF SENSORS IN MUNICIPAL PARKING LOTS**

The main aim of the proposal described in this chapter is to respond to a series of challenges in the oldest part of the city of Covilhã regarding the parking situation. Some of the underlying problems include the following ones: Lack of information about the existence of the auto silos in this part of the city and how they work, Lack of information about the availability (or not) of vacant spaces and their number in each of the silos, Creation of queues and embarrassment in traffic as a result of drivers looking for long periods of time for a place to park their vehicles and, finally, Badly parked vehicles in the vicinity of the centre, which hinder circulation in this area.

With the intention of modernising the operation of the silos in Covilhã's historic area, and providing users with more efficient responses in terms of the number of spaces available in each of them at any given time, it is necessary to develop a sensor-based system that allows the number of vehicles inside to be counted. This information would then be visible at the entrance to each park. In addition, signs could be installed (in central parts of the city) depicting the three silos in the area and also showing the number of spaces available for each of them, as shown in Figure 3.

**Figure 3 – Example of the design of the mentioned signs (Font: Authors)**

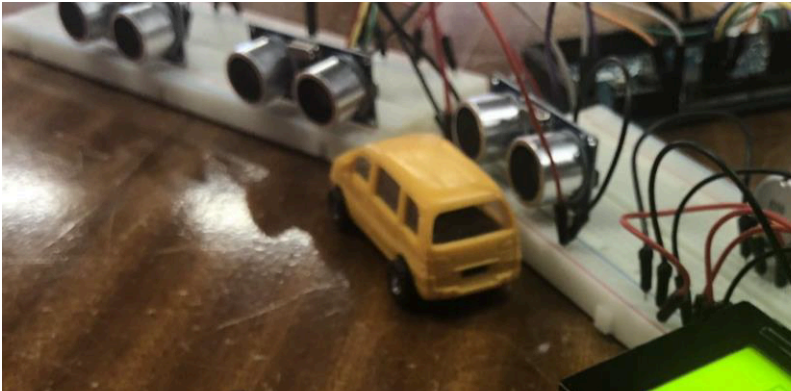
The layout and architecture of a system like this must include a certain type of material. In the case described in this report, these materials were chosen in order to keep the cost of the prototype relatively low, with the aim that this assembly, or derivations of it, can easily be replicated in other situations and contexts. The materials included in the laboratory assembly, in order to simulate a vehicle accounting system, are: Electronic Platform (Arduino), Ultrasonic Sensors, Display (LED), Mounting Board, Variable Resistor, Power Supply and Cable, and finally, Connection Wires.

The materials described above will form part of the architecture of the system that will represent, on a smaller scale, the prototype that is to be assembled with the aim of controlling the waves, in real time, inside each of the silos in the historic area of Covilhã. For practical purposes, only one assembly has been designed, which is universal and can be used in any of the case studies in this document. The set-up, shown in Figure 4, uses three HC-SR04 sensors, each of which is placed in three different parking spaces. The system's assembly architecture follows:

- The Arduino is powered via a cable connected to a computer;
- One of the Mounting Boards (the main one) serves as a base for integrating the Arduino, the LCD display and one of the ultrasonic sensors. The potentiometer, which regulates the brightness of the LCD, is also mounted on this board;
- The other Mounting Board includes two of the three ultrasonic sensors used in the system;
- The Display, in addition to the connections to  $V_{CC}$  and GND, is connected to the Arduino via pins 2, 3, 4, 5, 11 and 12 of the latter;
- The ultrasonic sensors, more specifically the Trigger and Echo pins of each one, are connected to pins 10, 13, 14, 15, 22 and 23 of the Arduino (two connections per sensor used). Each sensor is also connected to GND and  $V_{CC}$ .

**Figure 4 – System assembly for three parking spaces (Font: Authors)**

Figure 5 shows, on a small scale, the desired result when a vehicle (represented by a toy car) is parked in one of the spaces in the silo. When the sensor detects the car, it sends the same signal to the Arduino platform, which then executes the command that prints the information that a parking space is occupied on the LCD (Legend: 'Vagas livr.'= Free spaces; 'Vagas ocup.'= Filled spaces).



**Figure 5 – Small-scale representation of how the system works when one vehicle is parked (Font: Authors)**

#### **4.2 MOTIVATION FOR THE PRIORITISATION OF NON-POLLUTING VEHICLES**

In order to further modernise the silos in Covilhã's historic area, a series of measures could be considered to encourage electric vehicle drivers to use these spaces. Non-polluting vehicles are a greener alternative to combustion vehicles and their adoption should therefore be promoted through benefits for their users. Therefore, some proposals already in force in other contexts will be mentioned, which could be applied to the case studies mentioned above:

- Provision of charging stations inside the parks: Currently, none of the three silos studied in this report have any charging stations for electric vehicles inside them. Furthermore, as mentioned in Chapter 3, the only charging station available to drivers of this type of vehicle in the immediate vicinity is located on Rua António Augusto de Aguiar, and only has the capacity to charge two cars



at the same time. Considering that nowadays more and more people are opting to use non-polluting vehicles, the presence of only one charging station in this area of the city is clearly insufficient to meet the needs of the population and ensure an incentive to adopt this type of alternative;

- Reserving a percentage of seats for electric vehicles: Reserving a certain number of seats within the silo spaces for users of non-polluting vehicles will benefit those who choose to adopt this type of vehicle. From a general point of view, this type of measure is important if we are to increasingly begin to make the transition to a greener future. In the case of the silos in the historic area of Covilhã, and bearing in mind that they vary in terms of the number of spaces inside them, a measure could be adopted in which a certain percentage of the spaces are reserved exclusively for parking electric vehicles;
- Discounts on using the parks and/or charging electric vehicles inside them: Given that there are already a number of incentives from organisations such as the European Union to promote the adoption of electric vehicles, the companies that are in charge of operating this type of space, such as auto silos, could establish agreements with national or European government institutions to benefit from some of this aid. Consequently, this would allow these same companies to provide users of non-polluting vehicles with advantages related to entering the parks, through discounts when using them, or even the possibility of them bearing some of the cost related to charging the vehicles' batteries.

## **5 CONCLUSIONS AND FUTURE WORK**

Nowadays, with the growing use of cars, there is also a growing need to look for alternatives to reduce traffic problems and parking shortages, especially in large cities. In older cities, this problem is exacerbated by the fact that they are not prepared, in terms of infrastructure, to deal with this phenomenon. Existing car parking spaces in these areas need to be modernised at various levels to adapt to trends, such as the increasing demand for electric vehicles. There should also be a greater focus on informing drivers about the possibilities they have to use spaces such as parking lots for their own benefit and in a way that doesn't restrict the flow of traffic on a city's roads.

The main aim of this article is to present a series of proposals, both theoretical and practical, aimed at making it easier for drivers to find the

right parking space without wasting unnecessary time and resources. The report focuses mainly on the historic area of the city of Covilhã, but many of the themes addressed are common to other cases at the national, European and global scene.

In the future, these proposals will be presented to the entity responsible for managing the parks, as well as to Covilhã City Council itself, so that most of them, or slight variations of these proposals, can be applied to the case studies addressed in this document.

In terms of a possible continuation of the work related to the aforementioned themes, it would be interesting to make the number of vacant spaces available inside the parks, or even outdoors, via a cell phone application or via the Covilhã municipality's website. By having access to this type of information anywhere and at any time, it would be possible to plan a walk or a route in the best way possible, without having to go directly to the places where this information is available. This would further reduce issues such as wasted time and excessive expenditure of resources on the part of drivers.

## REFERENCES

- [1] Errouso, H., Ouadi, J. E., Arbi, A. E., & Benhadou, S. (2022). **Dynamic parking space allocation at urban scale: Problem formulation and resolution**. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(10), 9576–9590. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.11.011>
- [2] Vassileva, I., & Campillo, J. (2017). **Adoption barriers for electric vehicles: Experiences from early adopters in Sweden**. *Energy*, 120, 632–641. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.119>
- [3] Ibrahim, H. (2017). **Car parking problem in urban areas, causes and solutions**. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3163473>
- [4] Zavitsas, K., Kaparias, I., & Bell, M. (2010). **Conduits, coordination of network descriptors for urban intelligent transport systems (Tech. Rep. No. 11)**. London: Imperial College.
- [5] Mosannenzadeh, F., & Vettorato, D. (2014). **Defining Smart City. A conceptual framework based on keyword analysis**. *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/2523>
- [6] Biyık, C., Abareshi, A., Paz, A., Ruiz, R. M. A., Battarra, R., Rogers, C. D. F., & Lizárraga, C. (2021). **Smart Mobility Adoption: A Review of the**

**literature.** Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 7(2), 146. <https://doi.org/10.3390/joitmc7020146>

[7] Radziejowska, A., & Sobotka, B. (2021). **Analysis of the social aspect of smart cities development for the example of smart sustainable buildings.** Energies, 14(14), 4330. <https://doi.org/10.3390/en14144330>

[8] Lima, M. F. C. (2017). **Qualidade de vida, sustentabilidade e eficiência na gestão dos recursos: um estudo sobre a adoção do smart parking da ParkWare,** Dissertação de Mestrado na Universidade de Aveiro. <https://ria.ua.pt/handle/10773/23502>

[9] Kozłowski, W., & Suwar, K. (2021). **Smart City: Definitions, dimensions, and initiatives.** European Research Studies Journal, XXIV(Special Issue 3), 509–520. <https://doi.org/10.35808/ersj/2442>

[10] Naveen, S. (2016). **Study of IoT: Understanding IoT architecture, applications, issues and challenges.** ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/330501274\\_Study\\_of\\_IoT\\_Understanding\\_IoT\\_Architecture\\_Applications\\_Issues\\_and\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/330501274_Study_of_IoT_Understanding_IoT_Architecture_Applications_Issues_and_Challenges)

[11] Gaspar, J. G. R. (2016). **Utilização de aplicações móveis na gestão de estacionamento urbano,** Dissertação de Mestrado no Instituto Politécnico do Porto. <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/9352>

[12] **What is the Internet of Things (IoT)?** (n.d.). <https://www.oracle.com/pt/internet-of-things/what-is-iot/>

[13] Rajiv. (2023). **What are the major components of Internet of Things.** RF Page. <https://www.rfpage.com/what-are-the-major-components-of-internet-of-things/>

[14] Contribuidores da Wikipédia. (2023). **Covilhã.** [pt.wikipedia.org. https://pt.wikipedia.org/wiki/Covilh%C3%A3](https://pt.wikipedia.org/wiki/Covilh%C3%A3) [Acedido em 28 de março de 2023]

[15] Construção, R. E. (2021, 3 de janeiro). **Repórteres em Construção.** <https://www.reporteresemconstrucao.pt/2021/01/03/manchester-portuguesa/>

[16] Muralhas, C. D. (2020, 31 de outubro). **Breve história da Covilhã.** Casa das Muralhas. <https://www.casadamuralhas.pt/post/breve-hist%C3%B3ria-da-covilh%C3%A3>

[17] **O que mudou no seu município em 10 anos?** (n.d.). Pordata. <https://www.pordata.pt/censos/quadro-resumo-municipios-e-regioes/covilha-545>

[18] **O que mudou no seu município em 10 anos?** (2021). Pordata. <https://www.pordata.pt/censos/quadro-resumo-municipios-e-regioes/covilha-545>

[19] Infopédia. (n.d.). **Covilhã - infopédia.** infopedia.pt - Porto Editora. [https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$covilha](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$covilha)

[20] Da Covilhã, M. (n.d.). **Contextualização territorial - Município da Covilhã.** Município Da Covilhã. <https://www.cm-covilha.pt/?cix=820&tab=792&curr=813&lang=1>

[21] Google Maps. (n.d.). **Google Maps.** <https://www.google.com/maps/>



**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# MECHANICAL ENGINEERING



## **INFLUENCE OF WATER PERCENTAGE ON PERFORMANCE AND EMISSIONS OF A DIESEL ENGINE FUELLED WITH WATER-EMULSIFIED DIESEL**

OLIVEIRA, PEDRO (1); BRÓJO, FRANCISCO (2); SERÓDIO, ROGÉRIO (3)

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, CENTRE FOR MECHANICAL AND AEROSPACE SCIENCE AND TECHNOLOGIES, E-mail:

[pedro.manuel.oliveira@ubi.pt](mailto:pedro.manuel.oliveira@ubi.pt)

(2) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AEROSPACIAIS, E-mail: [brojo@ubi.pt](mailto:brojo@ubi.pt)

(3) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA, E-mail: [rserodio@ubi.pt](mailto:rserodio@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [pedro.manuel.oliveira@ubi.pt](mailto:pedro.manuel.oliveira@ubi.pt)

### **ABSTRACT**

*To date, diesel engines are one of the most efficient and available energy conversion devices. The better performance of compression-ignition engines is, however, also associated with the worst percentage of exhaust emission gases such as nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and smoke, harmful to human health and the planet. Water-in-diesel emulsion (WiDE) is a technique that can allow the reduction of these exhaust gases without compromising engine performance or requiring engine modification. Emulsions are dispersions containing two immiscible phases, which can be mixed by mechanical shear or chemical processes. In WiDE, small droplets of water are dispersed in a continuous flow (diesel). The mixture is stabilized by the use of surfactants, usually non-ionic. The objective of this work was to compare diesel fuel with emulsions of different percentages of water (8% and 16%) when it comes to performance and emissions gain/loss relationship. Unlike most literature, a hydrophilic formulation was used for the surfactant blend. A four-stroke, single-cylinder direct injection diesel engine (Hatz 1B40) was coupled to an eddy current dynamometer to measure the performance parameters. An exhaust gas analyser (AVL DiTest gas 1000) and an opacimeter (AVL DiSmoke 480) were attached to the engine to measure the emission gases. The tests were performed at 100% of the maximum considered engine load for this case. The results show that the use of emulsions improves engine performance. They also suggest that an increase in water content in the emulsified fuel will lead to a reduction in smoke emissions (43.83% lower for 8% WiDE and 83.67% lower for 16% WiDE compared to diesel), however, with an adverse effect of this increase in engine performance (34.05% lower brake specific fuel*

consumption (BSFC) for 8% WiDE and 7.89% lower BSFC for 16% WiDE compared to diesel).

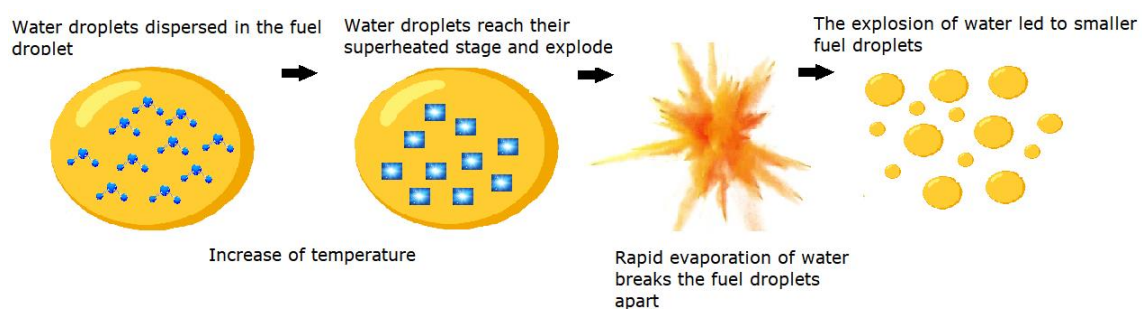
**Keywords:** Water-in-Diesel Emulsion, Hatz diesel engine, micro-explosion, Eddy current dynamometer, AVL DiTest, AVL DiSmoke, Hydrophilic emulsion formulation.

## 1 INTRODUCTION

Over time, governments have consistently failed to address the harmful impacts of pollution on both human health and the environment, despite it being a major cause of health problems and planetary degradation in recent decades. Air pollution, in particular, has been identified as one of the most severe forms of pollution, estimating over 4.2 million deaths annually (GUMY, 2019). Fossil fuels have been identified as the primary contributors to these polluting emissions, accounting for more than 84% of all primary energy sources (BP, 2020). Within the fossil fuel sector, the transport industry is responsible for over 15% of these emissions. In Europe, oil comprises more than 93% of the total energy consumption in this sector, with minimal contributions from biofuels and natural gas (BIOENERGY INTERNATIONAL, 2019; CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS, 2017). Internal Combustion Engines (ICE) are major consumers of fossil fuels and significantly contribute to the high concentrations of greenhouse gases in the atmosphere (AĞBULUT, Ü.; SARIDEMIR, S., 2021). They are widely recognized as one of the most efficient and dependable energy conversion devices currently available, offering superior fuel-to-power conversion efficiency and, consequently, improved fuel economy (RAJAK, U. ET AL., 2023). As a result, ICE are the predominant class of engines used in various applications such as power generation, on-road transportation, agriculture, marine, and military operations (DEBNATH, B. K.; SAHA, U. K.; SAHOO, N., 2015). However, diesel engines are major emitters of harmful exhaust gases, particularly nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and smoke (NAIK, G.G; DHARMADHIKARI H. M., 2023). Water-in-Diesel Emulsions (WiDE) is an innovative technology and fuel designed for use in diesel engines, aiming to enhance combustion efficiency while simultaneously reducing exhaust emission (OLIVEIRA, P.; BRÓJO, F., 2024). WiDE is engineered to be used as a drop-in fuel, meaning no modifications are required to the engine for it to be used, which is cheaper and a huge benefit considering the next emission standards (ACEA, 2020). An emulsion is a mixture that contains two immiscible phases, where droplets of one liquid are dispersed within a continuous flow of another liquid (MARZUKI, N. H. C.; WAHAB, R. A.; HAMID, M. A., 2019). WiDE is composed of diesel as the continuous phase, water as the dispersed phase, and surfactants, which are amphiphilic molecules that possess both lipophilic and hydrophilic properties and are used to stabilize emulsions. By reducing the interfacial tension between two liquids, such as diesel and water, the repellent force between them is lowered, decreasing the attraction between molecules of the same liquid. This results in a spontaneous dispersion of water droplets, contributing to the stability of the emulsion

while countering the coagulation effect in the water phase (EASTOE, J., 2003; OLIVEIRA, P.; BRÓJO, F., 2024; TADROS, T., 2005). The cleaner combustion of emulsified fuels can be attributed to the puffing and micro-explosion phenomena in emulsion droplets. When the emulsion is injected into the combustion chamber, heat is transferred to the surface of the fuel droplets by convection and radiation. This results in the rapid breakup of the parent droplets due to the different volatility of the fuel and water, promoting a secondary atomization that reduces the combustion duration (OLIVEIRA, P.; BRÓJO, F., 2023). At this stage, two phenomena come into play: puffing, which involves the partial ejection of some dispersed water from an emulsion droplet, and micro-explosion, which is the complete breakup of the parent droplet (SAZHIN, S. S. ET AL., 2019). These occurrences enhance the combustion process by improving the effective distribution of fuel droplet sizes, leading to better air-fuel mixing, improved fuel efficiency, and reduced emissions (SHEN, S. ET AL., 2023) Figure 1 shows an example of the micro-explosion phenomenon.

**Figure 1 - Micro-explosion of an Emulsion Droplet**



**Source:** (OLIVEIRA, P.; BRÓJO, F., 2024)

Although the concept is straightforward, there are still many unknowns regarding the optimal characteristics of the emulsion system. In the case of WiDE, selecting the right surfactants and finding the correct balance between them is crucial for ensuring stability and efficiency. The emulsification process and the appropriate water content also play a significant role, as varying percentages can yield different outcomes in terms of performance and emission characteristics (GOWRISHANKAR S. ET AL., 2024).

## 2 MATERIAL, EQUIPMENT, AND METHODS

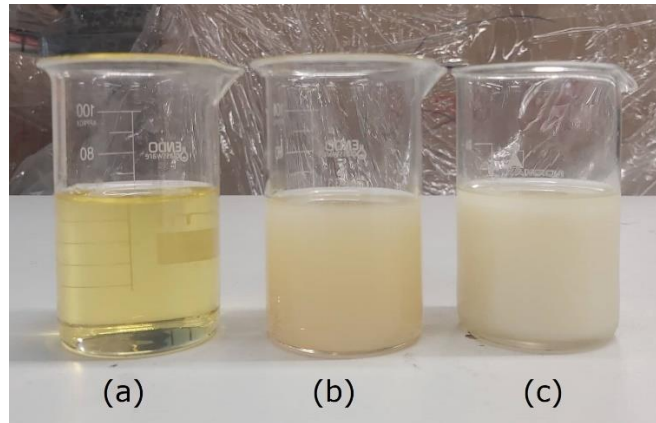
### 2.1 Laboratory testing

Before selecting the most appropriate emulsions, extensive laboratory tests were carried out by using different percentages of diesel, water, and surfactant. A hydrophilic surfactant and a hydrophobic co-surfactant were used for the surfactant blend. In the end, two different emulsions were obtained. The first one composed of 89% (m/m) diesel, 8% (m/m) deionised water, and 3% (m/m) surfactant, and the second one



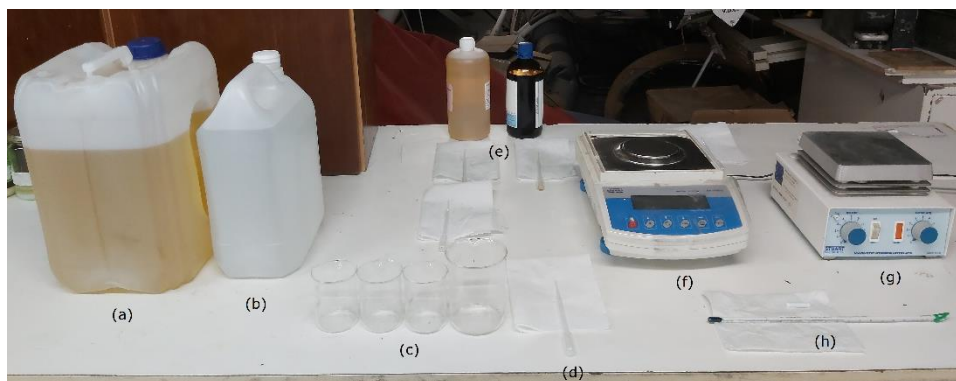
composed of 78% (m/m) diesel, 16% (m/m) deionised water, and 6% (m/m) surfactant. These emulsions are shown in Figure 2. The material and equipment used are shown in Figure 3.

**Figure 2 – Diesel (a), 8% WiDE (b), and 16% WiDE (c) at T = 15°C**



Source: [Own elaboration]

**Figure 3 - Laboratory Material and Equipment: Diesel fuel (a), Deionised water (b), Beakers (c), Pipette (d), Surfactants (e), Analytic Balance (f), Magnetic Stirrer (g), and Thermometer (h)**



Source: [Own elaboration]

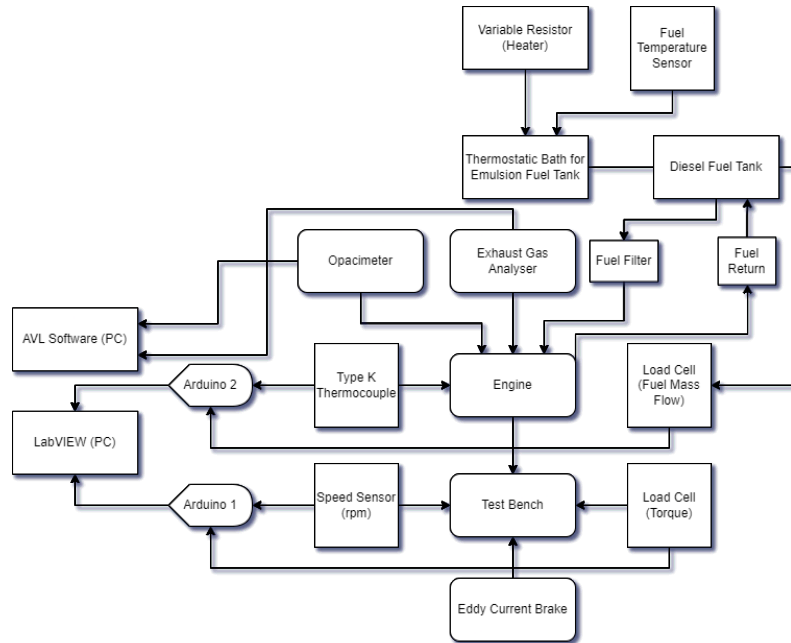
Subsequent tests on the various samples included measurements of density, viscosity, and calorific value. A hydrometer was used for density measurements, an Oswald viscometer was used for viscosity measurements, and a bomb calorimeter, model 6050 from Parr for calorific value measurements.

## 2.2 Engine testing

After obtaining the two emulsions, the different fuels were reproduced in samples of 500g to be supplied to the engine. During fuel supply, the emulsions were also heated in a thermostatic bath to achieve similar viscosities to diesel fuel so that the injection timing could be similar. A Hatz 1B40 direct injection diesel engine was used to test the different fuels. The engine was placed on a test bench equipped with an eddy current

dynamometer. The measured parameters were velocity, torque, power, fuel flow, and engine temperature at the maximum considered engine load. AVL DiTest gas 1000 was used to measure the exhaust gases concentrations and AVL DiSmoke 480 to measure the smoke opacity. An example of the montage diagram with the equipment, different sensors, and data acquisition devices is shown in Figure 4. Figure 5 shows the engine ready for performance and emissions testing of the different fuels.

**Figure 4 - Bench-test Diagram**



Source: [Own elaboration]

**Figure 5 – Engine Bench-test Setup**



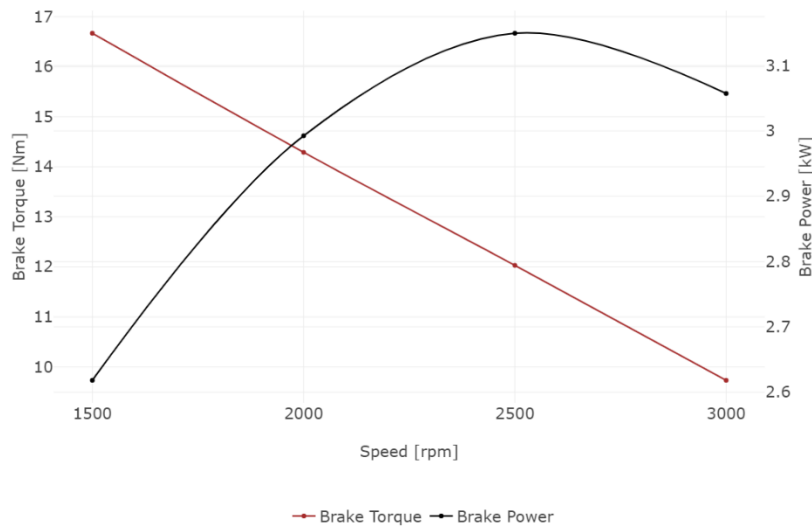
Source: [Own elaboration]

For each fuel test, the engine was manually started, kept in idle condition for a few minutes to reach its normal operating temperature, and then accelerated to 3000 rpm. From this point, a constant load was applied to the dynamometer. After monitoring performance and emissions values at this condition, the engine velocity was decreased to 2500 rpm, 2000 rpm, and 1500 rpm to repeat the process.

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Engine performance

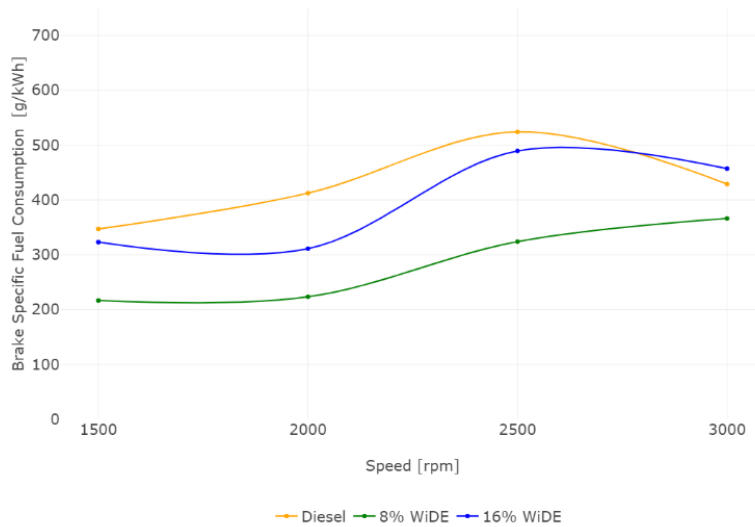
Figure 6 - Brake Torque and Brake Power



Source: [Own elaboration]

As seen in Figure 6, at this load, the brake torque linearly increases with the decrease in engine velocity ( $y = -0.0046x + 25.56$ ,  $R^2 = 0.999$ ). Torque and power are directly proportional to each other. The brake power of the engine is calculated from brake torque and velocity. At this load, the power increases from 1500 rpm to 2500 rpm due to the increase in engine velocity and then starts decreasing until 3000 rpm. From 2500 rpm to 3000 rpm, a decrease in power can be explained due to the increased engine rotations that prevent an optimal air-fuel mixture from filling the cylinder due to the limited time available for air entrance, leading to a drop in volumetric efficiency. The friction effects and increased back pressure due to higher revolutions also start to become significant, reducing the final power output.

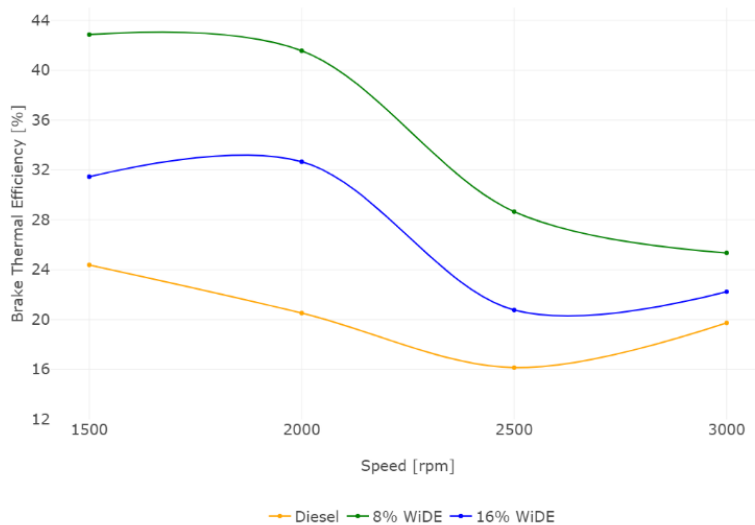
**Figure 7 - Brake Specific Fuel Consumption**



**Source:** [Own elaboration]

As seen in Figure 7, the Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) of 8% WiDE is the lowest of all the fuels at every engine velocity. The BSFC of 16% WiDE is also lower than diesel at every velocity except 3000 rpm where it is slightly higher. The BSFC for 8% WiDE increases with the increase in engine velocity. The BSFC of 16% WiDE decreases from 1500 rpm to 2000 rpm, followed by an increase to 2500 rpm and then decreasing until 3000 rpm. The BSFC of diesel increases until 2500 rpm further decreasing until 3000 rpm. The occurrence of micro-explosions may increase the force acting on the piston during the expansion stroke, reducing the amount of fuel injection needed, and resulting in a more complete combustion.

**Figure 8 - Brake Thermal Efficiency**

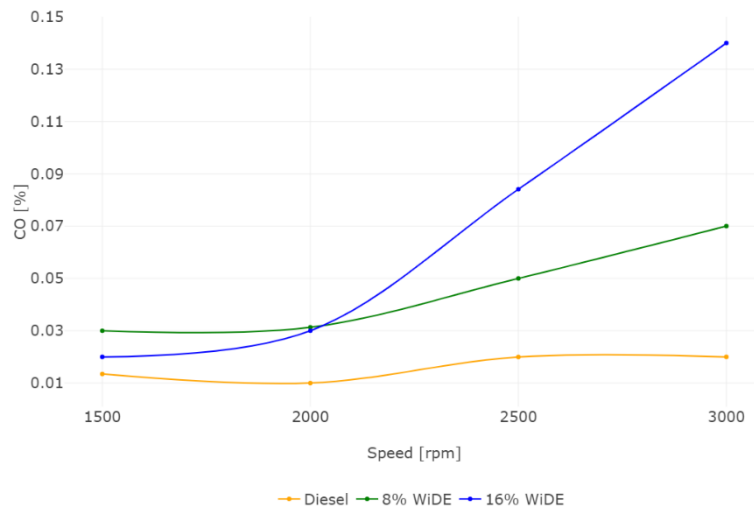


**Source:** [Own elaboration]

Brake Thermal Efficiency (BTE) is inversely proportional to BSFC. As seen in Figure 8, the BTE of 8% WiDE is higher at every engine velocity when compared to the other fuels. This is followed by the BTE of 16% WiDE which is higher than diesel fuel at every engine velocity. The BTE of 8% WiDE increases with the decrease in engine velocity. The BTE of 16% WiDE decreases from 3000 rpm to 2500 rpm, followed by an increase until 2000 rpm, and then another increase until 1500 rpm. For diesel fuel, BTE decreases from 3000 rpm to 2500 rpm and then increases until 1500 rpm. Reduced BSFC and reduced lower heating values for the emulsions are responsible for higher BTE across all engine velocities, as the fuel energy is better harvested.

### 3.2 Engine emissions

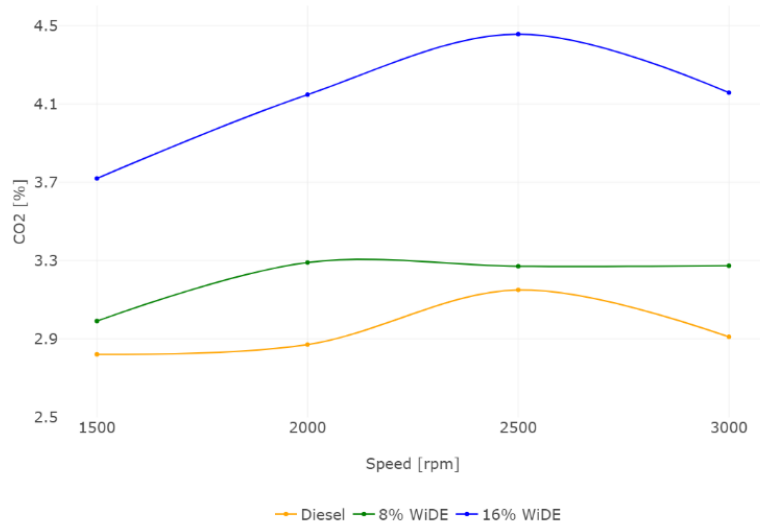
**Figure 9 – Carbon Monoxide Emissions**



**Source:** [Own elaboration]

As seen in Figure 13, Carbon Monoxide (CO) emissions from diesel are lower than the emulsions at all velocities. When compared to 8% WiDE, these emissions are lower for 16% WiDE at 1500 rpm, similar at 2000 rpm, and higher from 2000 rpm to 3000 rpm. For diesel, these emissions decrease from 1500 rpm to 2000 rpm, increase from 2000 rpm to 2500 rpm, and remain similar until 3000 rpm. For 8% WiDE, these emissions decrease from 1500 rpm to 2000 rpm, and increase until 3000 rpm. For 16% WiDE, CO emissions increase from 1500 rpm to 3000 rpm. The presence of excess carbon atoms from the surfactants that were not fully combusted, the increased viscosity of the emulsions, and different spray characteristics after the injection may explain this increase.

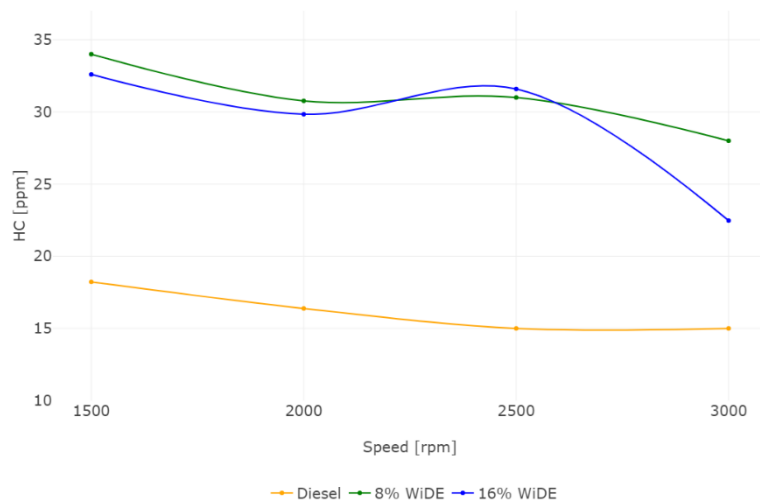
**Figure 10 – Carbon Dioxide Emissions**



**Source:** [Own elaboration]

A complete combustion of a hydrocarbon with oxygen produces Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) and water vapour. As shown in Figure 10, CO<sub>2</sub> emissions from diesel are always lower than the emulsions. For this fuel, they also increase from 1500 rpm to 2500 rpm and decrease from 2500 rpm to 3000 rpm. The CO<sub>2</sub> emissions of 16% WiDE were much higher than 8% WiDE at every engine velocity, increasing from 1500 rpm to 2500 rpm, and decreasing until 3000 rpm. For 8% WiDE, CO<sub>2</sub> emissions increased from 1500 rpm to 2000 rpm and remained constant until 3000 rpm. The higher CO<sub>2</sub> emissions can be attributed to the increased oxidation of fuel molecules due to the excess oxygen present in the emulsions.

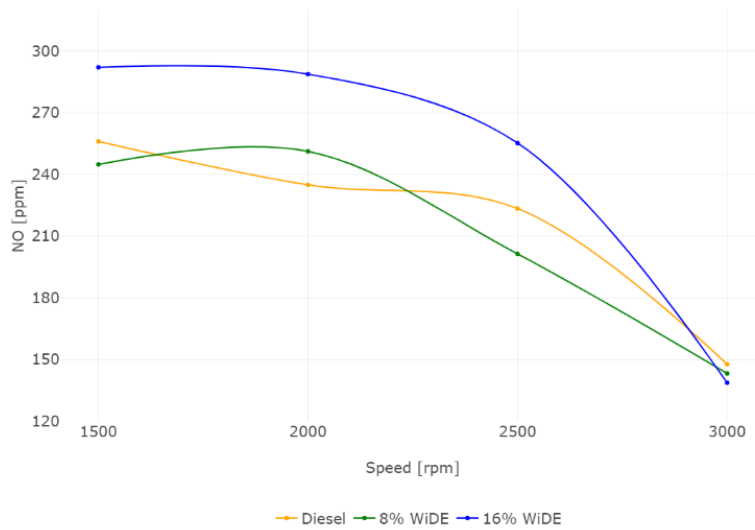
**Figure 11 - Hydrocarbons Emissions**



**Source:** [Own elaboration]

As seen in Figure 11, Hydrocarbons (HC) emissions of diesel are considerably lower than the emulsions. HC emissions for 16% WiDE are also slightly lower compared to 8% WiDE at all velocities except at 2500 rpm where they are slightly higher. For diesel, they decrease from 1500 rpm to 2500 rpm, remaining similar at 3000 rpm. For both emulsions, they decrease from 1500 rpm to 2000 rpm, increase from 2000 rpm to 2500 rpm, and decrease again until 3000 rpm. The presence of excess hydrogen and carbon atoms from the surfactants and spray wall impingement from the increased spray penetration (due to microexplosions) may explain this increase.

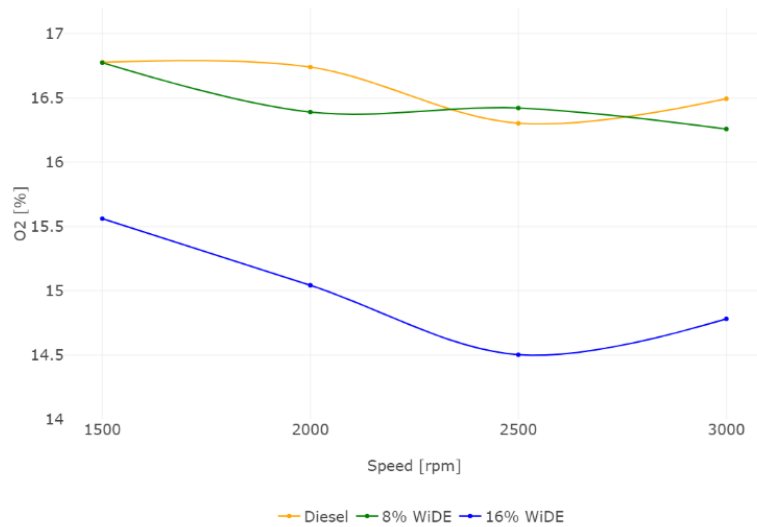
**Figure 12 – Nitrogen Oxide Emissions**



**Source:** [Own elaboration]

As seen in Figure 12, Nitrogen Oxide (NO) emissions of 16% WiDE are higher than the other fuels at every engine velocity except 3000 rpm where they are lower. NO emissions of 8% WiDE are lower than diesel at every engine velocity except at 2000 rpm where they are higher. For diesel fuel and 16% WiDE, NO emissions increase with decreasing engine velocity. For 8% WiDE, they increase from 1500 rpm to 2000 rpm and then decrease until 3000 rpm. The higher NO emissions of 16% WiDE can be due to improved combustion, leading to increased combustion chamber temperatures, surpassing the heat sink effects of water molecules to lower this temperature at all velocities except 3000 rpm. For 8% WiDE, the heat sink effect of water molecules may have lowered NO emissions compared to diesel, except at 2000 rpm.

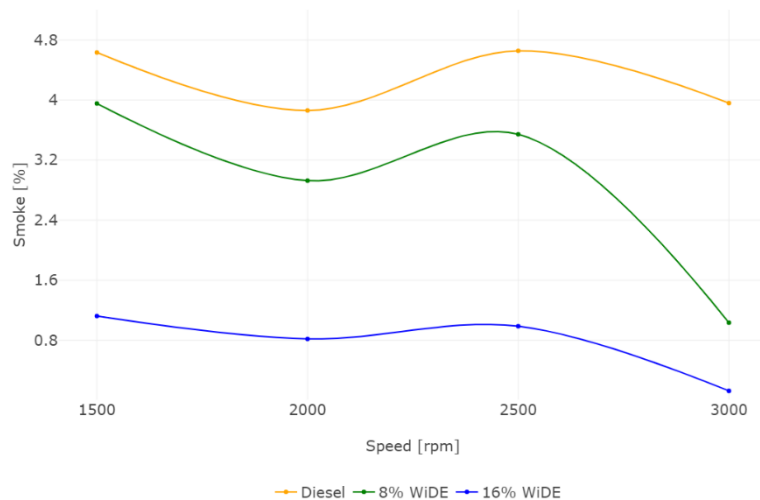
**Figure 13 - Oxygen Emissions**



**Source:** [Own elaboration]

As seen in Figure 13, Oxygen ( $O_2$ ) emissions of 16% WiDE are much lower than the other fuels.  $O_2$  emissions of 8% WiDE are similar to diesel at 1500 rpm, lower than 2000 rpm and 3000 rpm, and higher at 2500 rpm. For 16% WiDE, they decrease from 1500 rpm to 2500 rpm and increase until 3000 rpm. For 8% WiDE these emissions decrease from 1500 rpm to 2000 rpm, increase until 2500 rpm, and decrease until 3000 rpm. For diesel fuel,  $O_2$  emissions remain constant from 1500 rpm to 2000 rpm, decrease until 2500 rpm, and increase until 3000 rpm. The significantly lower  $O_2$  emissions in 16% WiDE may be an indication that the oxygen present in the fuel molecules was properly used to oxidize and form  $CO_2$ .

**Figure 14 - Smoke Emissions**



**Source:** [Own elaboration]



As seen in Figure 14, smoke emissions of the emulsions are significantly lower than diesel. For all fuels, these emissions decrease from 1500 rpm to 2000 rpm, increase from 2000 rpm to 2500 rpm, and decrease again until 3000 rpm. It was also observed that an increase in water content considerably lowers these emissions. This may be explained by a reduction of the fuel-rich zones due to the increased oxygen content of the emulsions, a higher mixing rate due to the secondary atomization, and a longer ignition delay due to the higher viscosity of the fuel.

After observing the different results, it is evident that water-emulsified diesel fuel can be a helpful solution to reduce emissions of NO at certain water percentages and reduce smoke levels from diesel engines, while simultaneously improving the thermal efficiency of the engine. The overall reduction in NO emissions of 8% WiDE was in accordance with most studies (RAHMAN, H. A. ET AL., 2023; ANIL, M. D; HEMADRI, V.B. SWAMY, M., 2023). The reduction of smoke levels in both emulsions is also in accordance with the most recent literature (TAMAM, M. Q. MOHD. ET AL, 2023). This, however, comes with adverse effects on other pollutant emissions, especially CO and HC, which were also found in recent studies (HASSAN, Z. U. ET AL. 2021). Future studies should be directed towards minimising these adverse effects, which may be achieved by adjusting the injection timings to be optimised for specific formulations of the emulsions. These studies should also aim to minimize engine vibrations, which were experienced during tests at different conditions and may reduce efficiency. Adjusting velocity and load conditions to values that would make the engine more stable during operation would be a solution to solving that problem.

#### **4 CONCLUSIONS**

After analysing the various performance and emission results obtained, it is possible to conclude that at very high load conditions, the use of both emulsified fuels is beneficial towards the goal of obtaining lower BSFC and increased BTE values. The best results for these parameters corresponded to the emulsion composed of 8% water. Despite those benefits, it was also observed that regarding CO and HC emissions, the use of these emulsions is detrimental. Regarding CO<sub>2</sub> emissions, an increase in water content leads to higher values of this gas, significantly increased for 16% WiDE. Contrary to the expected, an increase in water content from 8% to 16% led to higher emissions of NO, while the average NO emissions across all engine velocities is slightly lower for 8% WiDE when compared to diesel at this load condition. Regarding smoke emissions, the use of emulsified fuels is very beneficial with significantly lower values for both emulsions when compared to diesel. It was also found that an increase in the water content of the emulsified fuel is responsible for the decrease in these emissions.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology, I.P. (FCT, I.P.) FCT/MCTES through national funds (PIDDAC), under the R&D Unit C-MAST/Center for Mechanical and Aerospace Science and Technologies, reference: Projects UIDB/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00151/2020>) and UIDP/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/00151/2020>).

## REFERENCES

- GUMY, S. Personal Interventions and Risk Communication on Air Pollution. Geneva, 2019.
- BP. Statistical Review of World Energy. London, 2020.
- BIOENERGY INTERNATIONAL. **EU transportation sector still overly dependent on fossil fuels**. 2019. Available in: <<https://bioenergyinternational.com/markets-finance/eu-transport-still-overly-dependant-on-fossil-fuels>>. Accessed: 11 aug. 2024.
- CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS. **Global Emissions**. 2017. Available in: <<https://www.c2es.org/content/international-emissions/>>. Accessed: 14 july. 2023.
- AĞBULUT, Ü.; SARIDEMIR, S. A general view to converting fossil fuels to cleaner energy source by adding nanoparticles. **Int. J. Ambient Energy**, v. 42, n. 13, p. 1569–1574. 2021.
- RAJAK, U. ET AL. Effects of different biofuels and their mixtures with diesel fuel on diesel engine performance and exhausts, **Science of the Total Environment**, v. 903, 166501. 2023.
- DEBNATH, B. K.; SAHA, U. K.; SAHOO, N. A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, v. 42, p. 196–211. 2015.
- NAIK, G.G; DHARMADHIKARI H. M. Methods for reducing NOx and PM emissions in compression ignition engine: A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 72, Part 3, p. 1406-1412. 2023.
- OLIVEIRA, P.; BRÓJO, F. Fuel properties, performance, and emissions of water-emulsified diesel fuel in an IDI diesel engine. **Thermal Science and Engineering**, v. 7, n. 2, 882l. 2024.
- ACEA. Position Paper Views on proposals for Euro 7 emission standard. 2020.
- MARZUKI, N. H. C.; WAHAB, R. A.; HAMID, M. A. An overview of nanoemulsion: Concepts of development and cosmeceutical applications. **Biotechnol. Biotechnol. Equip.**, v. 33, n. 1, p. 779–797. 2019.
- EASTOE, J. Microemulsions. **Surfactant Chemistry**, 2003, p. 59–95.
- OLIVEIRA, P.; BRÓJO, F. An Experimental Study on the Performance and Emissions of an 8% Water-in-Diesel Emulsion Stabilized by a Hydrophilic Surfactant Blend. **Energies**, v. 17, n. 6, 1328. 2024.
- TADROS, T. Applied Surfactants. **Applied Surfactants: Principles and Applications**, 2005, p. 1–22.

OLIVEIRA, P.; BRÓJO, F. Water-in-Diesel Emulsion: Torque, Fuel Consumption and Emission Analysis. In: PROCEEDINGS OF THE ASME 2023 INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION. New Orleans, Louisiana, USA. 2023.

SAZHIN, S. S. ET AL. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets. **Int. J. Heat Mass Transf.**, v. 131, p. 815–821. 2019.

SHEN. S. ET AL. Dynamic details inside water-in-oil (W/O) emulsion droplet and its impact on droplet evaporations and micro-explosion. **Fuel**, v. 338, 127254. 2023

GOWRISHANKAR S. ET AL. Synthesis and characterization of emulsion fuels – Implications to spray and engine studies. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 101, 101133. 2023.

RAHMAN, H. A. ET AL. Implementation of a Non-Surfactant Water-in-Diesel Emulsion Fuel in a Common Rail Direct Injection Diesel Vehicle. **Int. J. Automot. Technol.**, v. 24, n. 5, p. 1349-1358. 2023.

ANIL, M. D; HEMADRI, V.B. SWAMY, M. Experimental investigation on impact of water in diesel emulsion in a single-cylinder research diesel engine. **Int. J. Ambient Energy**, v. 44, n. 1, p. 399–412. 2023.

TAMAM, M. Q. MOHD. ET AL. Performance and emission studies of a common rail turbocharged diesel electric generator fueled with emulsifier free water/diesel emulsion. **Energy**, v. 268, 126704, 2023.

HASSAN, Z. U. ET AL. Use of diesel and emulsified diesel in CI engine: A comparative analysis of engine characteristics. **Sci. Prog.**, v. 104, n. 2, p. 1–19. 2021.



## **APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM GERADOR DE VAPOR PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

BALANUTA, VÍTOR (1); CARREIRA, FERNANDO (2); DUARTE, GONÇALO (3);  
BAPTISTA, PATRÍCIA (4); CASACA, CLÁUDIA (5)

(1) ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, E-mail: [a48448@alunos.isel.pt](mailto:a48448@alunos.isel.pt)

(2) UniRE, ISEL– Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, E-mail: [fernando.carreira@isel.pt](mailto:fernando.carreira@isel.pt)

(3) ISEL– Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, E-mail: [goncalo.duarte@isel.pt](mailto:goncalo.duarte@isel.pt)

(4) IST – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, E-mail: [patricia.baptista@tecnico.ulisboa.pt](mailto:patricia.baptista@tecnico.ulisboa.pt)

(5) CIMOSM, ISEL– Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, E-mail: [claudia.casaca@isel.pt](mailto:claudia.casaca@isel.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [a48448@alunos.isel.pt](mailto:a48448@alunos.isel.pt)

### **RESUMO**

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma aplicação computacional para apoio ao ensino na área da energia e máquinas térmicas, e que permita avaliar os impactos energéticos e ambientais de diferentes condições de operação e combustíveis utilizados num gerador de vapor. A ferramenta computacional utiliza conceitos de termodinâmica, combustão e transmissão de calor para quantificar as trocas térmicas nos vários permutadores de calor que compõem um gerador de vapor. A aplicação tem a potencialidade de testar vários tipos de combustível e razões ar-combustível, assumindo combustão completa em regime de excesso de ar. Recorrendo a parâmetros de funcionamento de uma central, permite analisar aspetos como a temperatura de chama, estequiometria, caudal de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>. A transferência térmica em cada permutador de calor tem em conta as propriedades termodinâmicas do vapor (pressão e temperatura), de acordo com as condições típicas de operação de um gerador de vapor. As trocas térmicas entre os permutadores de calor e os gases de combustão ocorrem de forma adiabática. A validação da aplicação computacional desenvolvida recorreu aos dados da central termoelétrica do Ribatejo, assumindo como combustível o metano, utilizando dados conhecidos tais como: potência útil do ciclo a vapor

(176 MW); pressão do gerador de vapor (12,5 MPa); e caudal mássico de gases de combustão (655 kg/s). O vapor sobreaquecido do gerador de vapor atingiu a temperatura de 567 °C, proveniente da transferência de calor dos gases de combustão, cuja temperatura diminuiu cerca de 150 °C. A água de alimentação do circuito água-vapor foi de 146 °C, atingindo uma temperatura 10 °C inferior à temperatura de saturação na entrada dos painéis de vaporização. Nestas condições verificou-se que a maior parcela de calor transferido pelos gases de combustão ocorreu nos painéis de vaporização (36%), seguido do sobreaquecedor (24%), de forma similar ao reportado na literatura.

**Palavras-chave:** Gerador de vapor, aplicação computacional, gases de combustão, combustão.

### ABSTRACT

*This work aiming to develop a computational application for teaching support in energy and thermal machines and allowing to evaluate the energy and environmental impacts of different conditions and fuel used in a steam generator. The computational tool resorts to concepts of thermodynamics, combustion and heat transfer to quantify thermal exchanges in the heat exchangers that constitute a steam generator. The proposed application has the capability to test various types of fuel and air-fuel reasons, assuming complete combustion on air excess mode. Using operation parameters of a plant, the application allows to analyse aspects such as flame temperature, stoichiometry, fuel flow rate and CO<sub>2</sub> emissions. The thermal transfer in each heat exchanger considers the thermodynamic properties of vapor (pressure and temperature), according to the typical operating conditions of a steam generator. The thermal exchanges between heat exchangers and flue gases occur adiabatically. The validation of the developed computational application has performed with data from the Ribatejo thermoelectric plant, assuming the methane as fuel, and using known data such as: useful steam cycle power (176 MW); vapor generator pressure (12.5 MPa); and flue gas mass flow (655 kg/s). The overheated vapor reaches the temperature of 567 °C, achieved from heat transfer from exhaust gases, which the temperature decreased about 150 °C. The supply water of the water-steam circuit was 146 °C, reaching less 10 °C lower than the saturation temperature at the inlet of the vaporization panels. Under these conditions, it was confirmed that the largest heat transfer from exhaust gases occurred in the vaporization panels (36%), followed by the overheater (24%), consistent with findings reported in the literature.*

**Keywords:** Steam generator, computer application, flue gases, combustion.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC) e o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC), Portugal terá de incluir medidas

estratégicas para o processo de descarbonização. Os sectores com um consumo mais intensivo de energia, utilizam fontes não renováveis pelo que a transferência destes consumos para energia elétrica tem sido vista como uma das principais medidas para mitigar a emissão de gases de efeito de estufa (GEE). Contudo, o incremento energético que essa mudança representa, associada à intermitência das renováveis, poderá colocar em causa a implementação do PNEC e o RNC. Por outro lado, a dependência energética externa no país, quer na importação de eletricidade, quer em combustíveis fósseis, deixam o país vulnerável à política externa e flutuação dos mercados associados a estes combustíveis. Deste modo, torna-se urgente implementar melhorias na eficiência do sistema de produção de energia elétrica em modo não intermitente, onde se destacam as centrais térmicas, cujos potenciais impactes incluem: reduzir o consumo de combustíveis fósseis; diversificar o tipo de combustível; reduzir as emissões de GEE; reduzir a pegada ecológica da produção de energia elétrica; contribuir para as metas de sustentabilidade ambiental.

Para satisfazer a maior necessidade de energia elétrica disponível será necessário aumentar a potência do sistema de produção e diversificar a oferta em fontes renováveis para atingir as metas nacionais e europeias de descarbonização. Contudo, é necessário garantir que a intermitência na produção de energia devido às fontes renováveis não ocorre nos períodos de maior necessidade de consumo ou, em alternativa, reforçar a produção das atuais centrais térmicas, aumentando a eficiência ou utilizando combustíveis diferentes: com menos intensidade carbónica ou provenientes de fontes renováveis (Ferreira, et al., 2015). No âmbito das centrais térmicas, o gerador de vapor (GV) é um dos principais elementos no sistema de produção de energia elétrica. Este elemento define as bases de operação do ciclo termodinâmico, no que concerne às pressões de trabalho, temperaturas e transferência de calor libertado na queima de um combustível para o circuito água-vapor (Balmer, 2011).

O aumento da eficiência do sistema de produção de energia elétrica encontra-se relacionado com a interligação entre o processo de combustão e as condições de funcionamento do circuito água-vapor: pressões, temperaturas, e a utilização de sistemas de otimização, como o reaquecimento do fluido de trabalho.

Relativamente aos fenómenos envolvidos na modelação da combustão é necessário considerar uma série de conceitos amplos nas suas várias áreas. Alguns exemplos dessa variedade podem ser analisados pelo modo em que o combustível se encontra: na forma sólida (Schnell, 2001), líquida (Senecal et al., 2003), spray (Beck & Watkins, 2004), gasosa (Versteeg, H.K. & Malalasekera, 2007), pulverizada (Casaca & Costa, 2011); (Lockwood et al., 1980), entre outras. Por outro lado, o tipo de combustível utilizado pode contribuir para a redução dos GEE. Verificou-se, por exemplo, que a utilização de biomassa pode contribuir para uma redução de 6% de GEE, apenas pela substituição de 3,8% do carvão utilizado (Aviso et al., 2020).

Tomando como exemplo a transformação dos transportes, no âmbito da descarbonização, estima-se que em 2035 cerca de 50% da frota circulante na Europa corresponda a veículos elétricos (ACEA, 2023), sobrecarregando a rede elétrica e potencialmente aumentando a dependência externa de Portugal. No âmbito do planeamento do sistema elétrico, tendo em conta as restrições ambientais particularmente no curto prazo, a diversificação do combustível pode apresentar-se como uma solução (Diawuo et al., 2020).

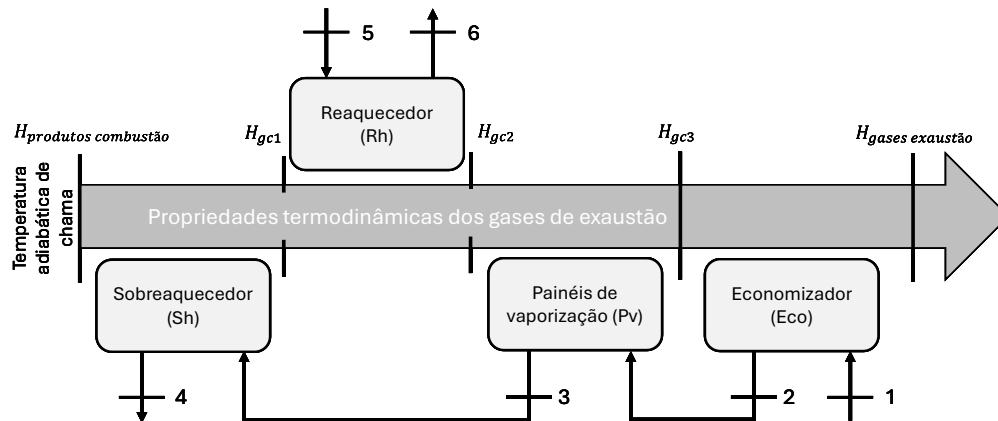
Os modelos de simulação para o GV não têm normalmente em conta a possibilidade de testar diferentes combustíveis e condições de trabalho de forma simultânea. Contudo, existem modelos que podem servir de base à modelação numérica do GV (Pena et al., 1987), (Alobaid et al., 2017), embora não possuam interligação com o processo de combustão, focando-se apenas no processo de vaporização realizado no circuito água-vapor. A implementação de modelos numéricos em aplicações computacionais permite analisar os fenómenos que ocorrem no GV sem recorrer a equipamentos laboratoriais e/ou em escala real e com isso poupar recursos na procura de soluções otimizadas. As aplicações computacionais permitem integrar estruturas de dados e utilizá-los no cálculo dos fenómenos a analisar, facilitando a investigação de diferentes casos de estudo (Gonçalves, 2016). A sua utilização permite modelar fenómenos complexos, como os que existem num GV, e fornecer relatórios energéticos e ambientais para diferentes situações de operação.

Neste contexto, o presente artigo pretende desenvolver uma aplicação computacional para a análise do funcionamento de um GV, baseando-se nas condições de operação do processo e nos combustíveis utilizados. A aplicação integra um modelo numérico que avalia a energia envolvida em cada um dos permutadores do circuito água-vapor e a interação com os produtos de reação provenientes da combustão que ocorrem num GV. O impacto dos fenómenos termodinâmicos que ocorrem devido a diferentes condições de operação do GV, nomeadamente pressão e temperatura são modelados na aplicação. Adicionalmente, a aplicação permite testar diferentes tipos de combustível e razões ar-combustível que permite analisar o seu impacto na temperatura de chama, estequiometria, caudal de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>.

## **2 METODOLOGIA**

As caldeiras aquatubulares representam a configuração mais comum dos geradores de vapor no contexto das aplicações das centrais térmicas. O funcionamento de um GV baseia-se principalmente na utilização de gases de alta temperatura gerados pela combustão, que se deslocam no interior do gerador devido à existência de gradientes de pressão e temperatura. Isto permite a transferência de calor para a água que circula no interior dos permutadores de calor.

A Figura 1 ilustra as trocas de calor no interior do gerador de vapor, nomeadamente o economizador, os painéis de vaporização, o reaquecedor e o sobreaquecedor. Este diagrama apresenta o circuito água-vapor e ar-fumos existente no GV a modelar na aplicação computacional, cujo funcionamento será validado em simulação.



**Figura 1 – Diagrama do circuito água-vapor e circuito ar-fumos no GV**

Fonte: Autores

## 2.1 Circuito água-vapor e circuito ar-fumos

O processo de transformação da água em vapor é realizado no GV, através dos permutadores de calor, nomeadamente economizador, painéis de vaporização, sobreaquecedor e reaquecedor.

A água de alimentação ao GV atravessa o economizador sendo aquecida (no estado líquido comprimido) pela transferência de calor dos gases de combustão a baixa temperatura (entre 350 °C e 400 °C) (Annaratone, 2008). Nos restantes permutadores, as temperaturas de entrada e de saída da água dependem da pressão de funcionamento do gerador de vapor (Kakaç, 1991), no entanto, a sua operação está condicionada por limitações metalúrgicas associadas às elevadas temperaturas e pressões envolvidas no processo (Bhiogade, 2023).

A temperatura de sobreaquecimento encontra-se tipicamente na ordem dos 570 °C. O reaquecedor opera normalmente a um quarto da pressão de operação e eleva a temperatura do vapor para um valor semelhante ao da saída do sobreaquecedor (Oprîş et al., 2020).

A potência térmica fornecida aos permutadores do circuito água-vapor é obtida através do calor transferido no circuito ar-fumos, que decorre de um processo de combustão.

O processo de combustão é realizado através da presença de um combustível (sólido, líquido e gasoso) e de um comburente (ar), que proporciona a energia disponível no circuito ar-fumos. A mistura ar/combustível existente na combustão num GV é tipicamente estequiométrica ou com excesso de ar, sendo este um parâmetro



importante na composição química dos gases de combustão e na temperatura adiabática de chama (Balanuta et al., 2024).

Neste artigo, assumiu-se que não há dissociação e que os produtos obtidos são apenas CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> (dependendo da estequiometria). A temperatura de combustão assumiu-se igual à temperatura adiabática da chama ( $T_{ad}$ ) que é obtida por um processo iterativo da equação 1, até obter  $\Delta H = 0$ . Assumiu-se que os reagentes estão à temperatura de referência, 298 K, por uma questão de simplificação.

$$\Delta H = -PCI \times M_{fuel} \times k + \sum_{Products} n_i [\bar{h}(T_{ad}) - \bar{h}(T_{ref})] - \sum_{Reagents} n_j [\bar{h}(T) - \bar{h}(T_{ref})] \quad (1)$$

onde,

- $\Delta H$  = variação de entalpia no gerador de vapor [kJ];
- $PCI$  = poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg];
- $M_{fuel}$  = massa molar do combustível [kg/kmol];
- $k$  = moles de combustível [kmol];
- $\bar{h}(T)$  = entalpia específica à temperatura T [kJ/kmol];
- $T_{ad}$  = Temperatura adiabática de chama [K];
- $T_{ref}$  = Temperatura de referência [K];

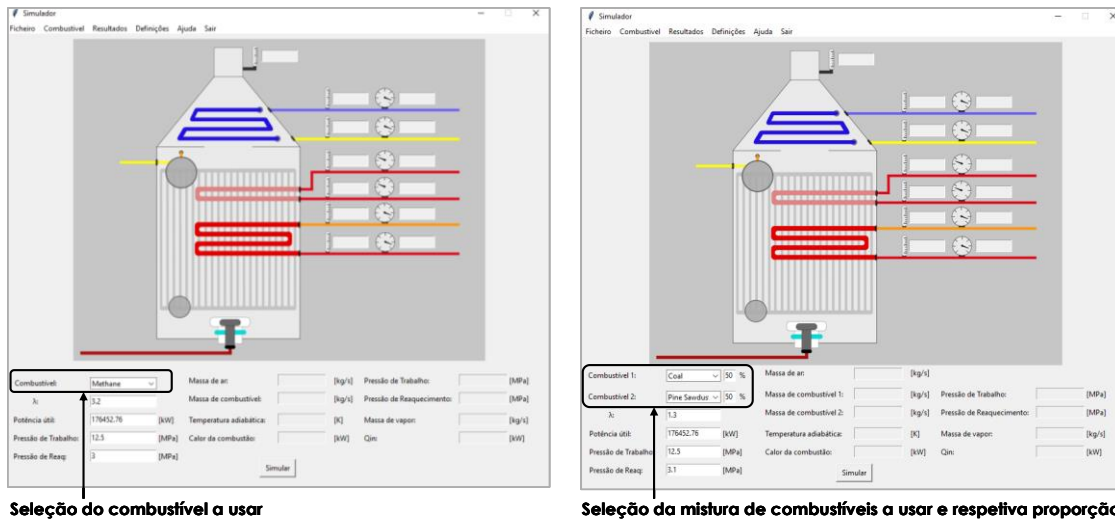
Em função da potência da central em estudo e do combustível utilizado, é possível determinar o caudal de combustível e de vapor. Neste caso, foi considerado o mesmo caudal mássico de vapor em todos os permutadores. O calor a transferir em cada permutador depende da variação de entalpia entre as condições de saída e entrada da água e da energia disponível nos produtos de combustão (Balanuta et al., 2024).

Desta forma, é possível simular diferentes condições de funcionamento do GV, tais como a pressão de funcionamento e de reaquecimento, o tipo de combustível utilizado e o excesso de ar na combustão.

## 2.2 Desenvolvimento da aplicação computacional

Neste artigo foi desenvolvida uma aplicação computacional para análise de diferentes condições de operação do GV, garantindo uma interface com o utilizador com boa interatividade. A aplicação foi desenvolvida em *Python*, uma linguagem de programação amplamente utilizada e de código aberto (Python Software Foundation, 2023).

A aplicação de simulação do GV possui uma GUI (*Graphical User Interface*), desenvolvida com recurso à biblioteca *Tkinter*, que fornece os resultados de diferentes tipos de simulação, considerando a variação de: 1) tipo de combustível utilizado, incluindo a possibilidade de misturar dois combustíveis diferentes; 2) condições de combustão; e 3) condições de funcionamento do circuito água-vapor, nomeadamente: pressão; temperaturas em cada um dos permutadores. A aplicação foi construída com janelas de interface para o utilizador definir a simulação com 1 ou 2 combustíveis (Figura 2).



**Figura 2 – Janela de interface de seleção das condições de combustão**

Fonte: Autores

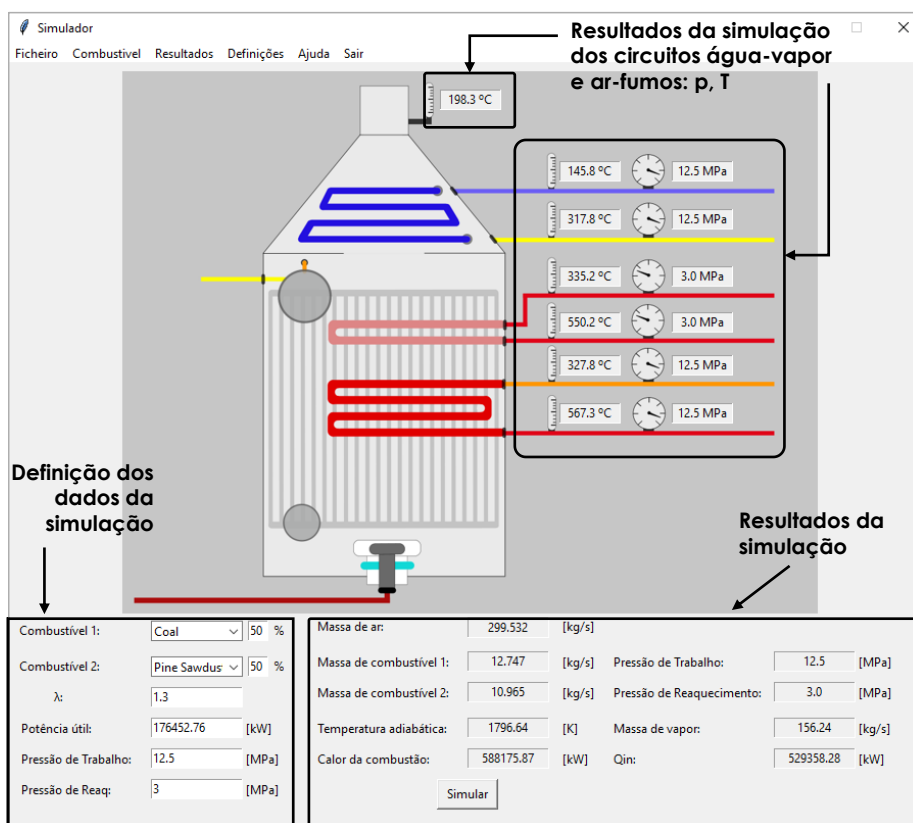
### **Interface de introdução e visualização de dados**

A interface de simulação contém caixas de edição (*Entry*) para introdução de dados numéricos (coeficiente de excesso de ar ( $\lambda$ ), potência da central, pressão de trabalho e de aquecimento) e caixas de seleção (*Combobox*) para o utilizador definir o combustível. A interface contém etiquetas (*Label*) para apresentar texto estático (ex: designação e unidades dos dados) e os resultados fornecidos pelo modelo numérico implementado, nomeadamente o caudal mássico de combustível e de vapor, temperatura adiabática de chama e calor da combustão. No caso de o utilizador selecionar a simulação com 2 combustíveis, a respetiva janela contém objetos para definir o nome de ambos os combustíveis utilizados na mistura e as respetivas proporções, bem como etiquetas para os 2 caudais mássicos obtidos (Figura 3).

O botão Simular executa um algoritmo que verifica se os dados introduzidos pelo utilizador se encontram validados com os valores estabelecidos como limites para o GV. A aplicação considera como válidos as seguintes gamas nos dados de entrada:

- Coeficiente de excesso de ar ( $\lambda$ ) – valor numérico entre 1 e 4;
- Potência útil – valor numérico entre 100 e 300 MW;
- Pressão de trabalho – valor numérico entre 8 e 15 MPa.

No caso de não ser inserido um valor numérico ou fora do intervalo estabelecido do parâmetro, é apresentada uma mensagem de erro.



**Figura 3 – Interface da introdução e visualização de dados**

Fonte: Autores

### **Importação dos dados do combustível**

Uma folha de cálculo armazena dados sobre as propriedades químicas de vários combustíveis (Coelho, 2017), nomeadamente nome, composição química, poder calorífico inferior e entalpia de formação. A importação destes dados foi realizada com recurso à biblioteca *pandas*, como se segue (pandas via NumFOCUS, 2024):

1. Definir tabela `tab_comb` com os dados da folha de cálculo;
2. A lista de nomes de combustíveis a apresentar na caixa de seleção é definida com os dados da coluna "nome" da tabela `tab_comb`;
3. O utilizador seleciona o combustível a usar na simulação;
4. Importar as propriedades químicas do combustível armazenadas na linha da tabela cujo nome definido na coluna "nome" coincide com o nome selecionado na caixa de seleção.

### **Cálculo do circuito ar-fumos**

A determinação do caudal de combustível resulta da potência útil e do excesso de ar introduzidos pelo utilizador. Efetua-se a análise do processo de combustão obtendo-se a composição química dos gases e a energia disponível no circuito ar-fumos.

A temperatura adiabática de chama é determinada através de um processo de cálculo iterativo da equação (1), com os dados das

entalpias de formação dos elementos químicos das tabelas termodinâmicas (Coelho, 2017). Os dados utilizados estão armazenados numa folha de cálculo e são importados para a aplicação com recurso da biblioteca *pandas*. A determinação da temperatura adiabática é obtida através do seguinte algoritmo:

1. Obter a tabela com as entalpias de formação da folha de cálculo.
2. Efetuar o cálculo da equação (1) para todas as temperaturas.
3. Se existir algum resultado com  $\Delta H = 0$ , então, a temperatura adiabática é definida pelo valor da linha correspondente.

Senão:

Definir uma tabela com dados a usar na interpolação:

1ª linha da tabela é definida com os dados da linha da tabela com valor negativo mais próximo de 0.

2ª linha é definida com o valor  $\Delta H = 0$  (restantes células são vazias para armazenar os dados provenientes do método de interpolação).

3ª linha da tabela é definida com os dados da linha da tabela com valor positivo mais próximo de 0.

Determinar a temperatura adiabática de chama pelo método de interpolação.

### **Cálculo das propriedades termodinâmicas do circuito água-vapor**

Os valores das propriedades do fluido dos pontos 1 a 6 da Figura 1 são determinados de acordo com a estrutura definida na Tabela 1. As gamas de pressão e de temperatura são coerentes com o intervalo de valores apresentadas na secção 2.1.

Os dados da Tabela 1 são obtidos a partir das propriedades da água no estado líquido, mistura e vapor, armazenados respetivamente em 3 ficheiros de Excel.

**Tabela 1 – Propriedades termodinâmicas do circuito água-vapor**

Ponto	Pressão [MPa]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]
1	$P_{trab}$	$T_1$	$h_1$	$s_1$
2	$P_{trab}$	$T_2 = T_{sat} - \Delta T$	$h_2$	$s_2$
3	$P_{trab}$	$T_3 = T_{sat}$	$h_{sat}$	$s_{sat}$
4	$P_{trab}$	$T_4$	$h_4$	$s_4$
5	$P_{reaq}$	$T_5$	$h_5$	$s_4 = s_5$
6	$P_{reaq}$	$T_6$	$h_6$	$s_6$

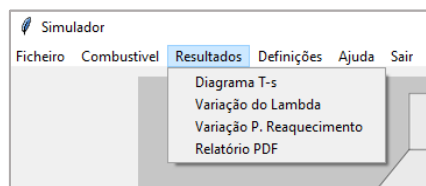
As tabelas das propriedades da água são definidas para diferentes pressões e, por isso nesta aplicação, são armazenadas em diferentes *sheets*, cujos nomes correspondem ao valor da pressão da respetiva tabela (Coelho, 2017). A entalpia e a entropia específicas apresentados na Tabela 1 obtêm-se através do seguinte algoritmo:

1. Ler os nomes das folhas, para determinar a lista de pressões;

2. Se a pressão de trabalho está contida na lista de pressões:  
 Importar a tabela de dados da folha com a pressão de trabalho.  
 Se a temperatura está definida na tabela de dados, extrair os dados da linha da temperatura pretendida.  
 Senão, obter os dados por interpolação entre as temperaturas inferior e superior.
3. Se a pressão de trabalho não está contida na lista de pressões  
 Obter as tabelas das pressões inferiores e superiores.  
 Para cada tabela, verifica:  
 Se a temperatura está definida na tabela de dados, extrair os dados da linha da temperatura pretendida.  
 Senão, obter os dados por interpolação entre as temperaturas inferiores e superior.  
 Aplica método de interpolação entre as pressões inferior e superior, para obter os valores das restantes propriedades.

### **Relatórios de testes e resultados**

A aplicação tem a possibilidade de calcular e apresentar dados provenientes das simulações com diferentes funcionalidades, acedidas a partir da opção do menu apresentada na Figura 4.



**Figura 4 – Menu para acesso ao cálculo dos resultados**

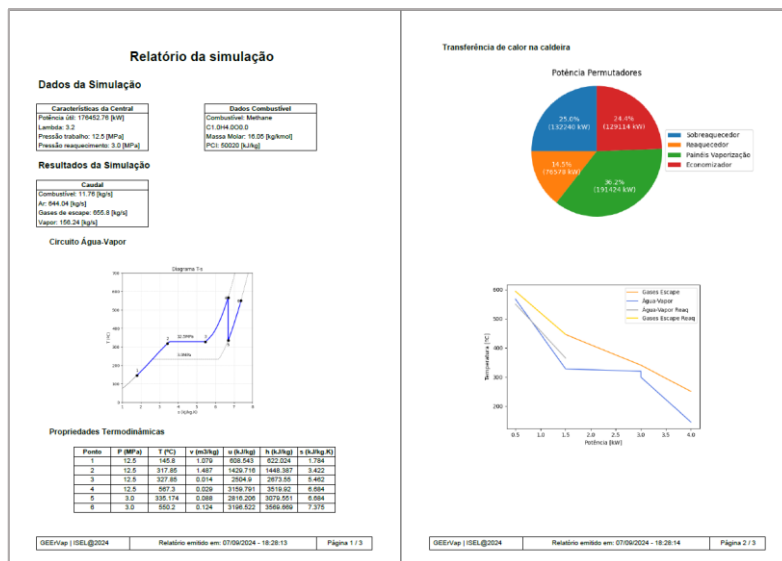
**Fonte:** Autores

A opção “Diagrama T-s” executa o seguinte algoritmo para determinar todos os dados necessários à apresentação do diagrama T-s do GV:

1. Determinar valores das propriedades da Tabela 1 para cada ponto do processo de aquecimento e armazenar em TabCiclo.
2. Para cada ponto  $i$ , definido em TabCiclo, calcular o valor de temperatura ( $T$ ) para um mínimo de 50 iterações aos valores de entropia entre  $s_i$  e  $s_{i+1}$ .
3. Determinar pontos para as linhas isobáricas para a pressão de trabalho e de reaquecimento: calcular o valor de temperatura ( $T$ ) para 150 valores de entropia entre 1 e 8.
4. Apresentar o gráfico de linhas referente aos pontos calculados, com recurso à biblioteca *matplotlib* (Hunter et al., 2024), e adicionar informações auxiliares.

A opção “Relatório PDF” permite elaborar um relatório, em formato pdf, implementado com recurso à biblioteca *fpdf*, onde é possível visualizar a informação completa da simulação realizada (“FPDF for Python”, 2012).

O relatório inclui diversos elementos como texto, arranjos de células e gráficos, conforme exemplificado na Figura 5.



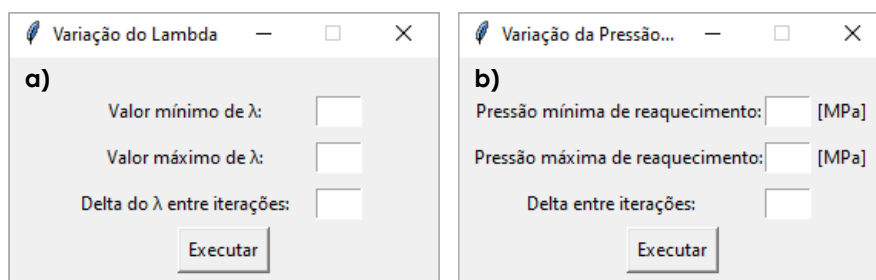
**Figura 5 – Constituição do relatório PDF gerado pela aplicação**

Fonte: Autores

No relatório apresentam-se os parâmetros de funcionamento, o diagrama T-s e as propriedades termodinâmicas do circuito água-vapor do GV, caudal mássico de combustível, ar e vapor, concentrações dos produtos da combustão, potências dos permutadores, entre outros. Neste artigo serão discutidos os resultados obtidos para a simulação de validação da aplicação computacional no capítulo 3, que pretende explorar os resultados apresentados no relatório PDF gerado pela simulação.

As opções “*Variação do Lambda*” e “*Variação P. reaquecimento*” permitem realizar estudos com o objetivo de avaliar a influência da variação do coeficiente de excesso de ar ( $\lambda$ ) ou da pressão de reaquecimento ( $P_{req}$ ), respetivamente, para as características da central em análise.

Quando se seleciona uma destas opções é apresentada uma nova janela onde é necessário definir, para o teste selecionado, os valores mínimo e máximo e o passo de iteração a usar no cálculo (Figura 6).



**Figura 6 – Janela de definição dos parâmetros em teste: a)  $\lambda$  e b)  $P_{req}$**

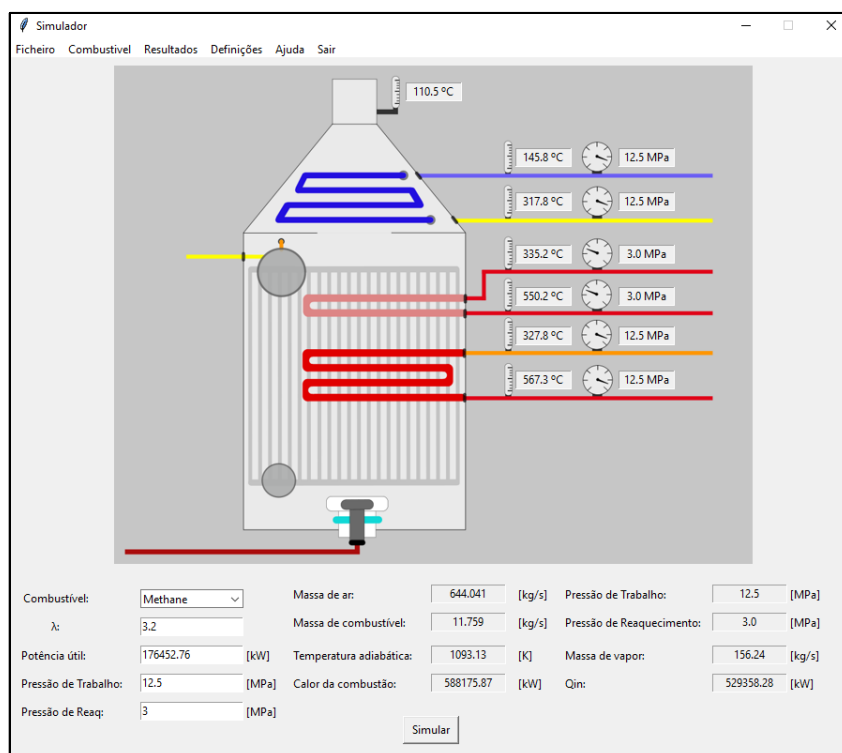
**Fonte:** Autores

Após a definição do intervalo é executado o algoritmo de cálculo iterativo. No final do teste, a aplicação armazena automaticamente os resultados numa folha de cálculo, com recurso à biblioteca *openpyxl* (Gazoni & Clark, 2024).

### 3 TESTES E VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

A validação da aplicação foi efetuada com diferentes testes de modo a comparar desenvolvimento do modelo numérico implementado com os dados da central (Portocarrero, 2015). Os testes de validação foram realizados simulando o funcionamento do GV, utilizando dados da central termoelétrica do Ribatejo. A potência útil do ciclo a vapor é de 176 MW, a pressão do GV é de 12,5 MPa. Assumindo-se metano como combustível, para potência útil designada do GV e um coeficiente de excesso de ar 3,2, obteve-se um caudal mássico de combustível de 11,8 kg/s, de ar 644 kg/s e de gases de exaustão de 655,8 kg/s. Os resultados foram apresentados na aplicação, como se pode visualizar na Figura 7.

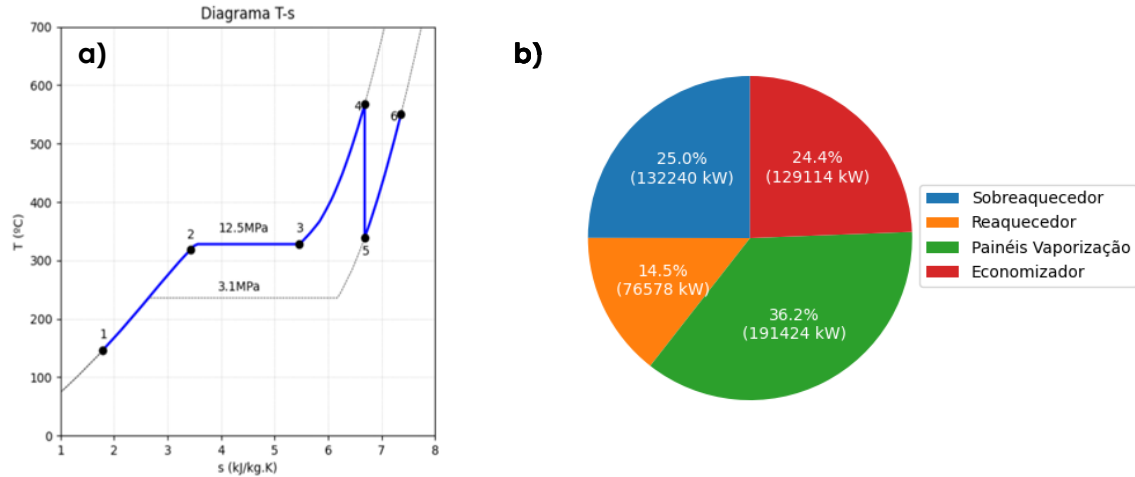
Na interface gráfica (Figura 7), é possível visualizar diversos resultados do circuito ar-fumos, incluindo a temperatura adiabática e o calor libertado durante a combustão. Nestas condições, verificou-se que a combustão atingiu uma temperatura de 1093 K, tendo sido gerado 588 MW de calor da combustão.



**Figura 7 – Interface com os resultados da simulação**

**Fonte:** Autores

As temperaturas obtidas na Figura 7 são também apresentadas no Diagrama T-s do circuito água vapor do GV (Figura 8a), sendo os pontos 1 a 6 obtidos de acordo com as propriedades termodinâmicas apresentadas na Tabela 1. O relatório PDF (Figura 5) gerado pela aplicação contém também a informação que consta na Figura 8.



**Figura 8 – Resultados do circuito água-vapor: a) diagrama T-s e b) potências dos permutadores**

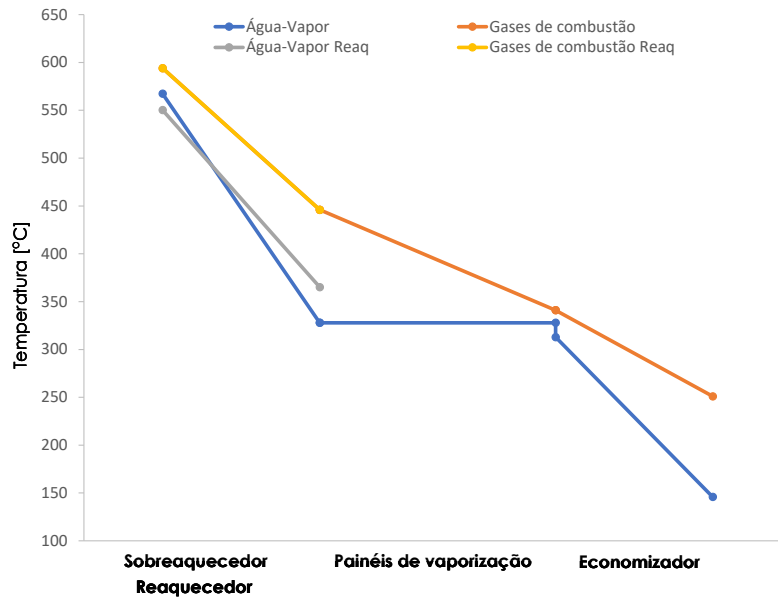
**Fonte:** Autores

A aplicação permite quantificar e visualizar graficamente as potências dos permutadores, como se apresenta na Figura 8b). Nas condições de simulação (Figura 7), verifica-se que a maior transferência de calor ocorre nos painéis de vaporização, com 191 MW, correspondendo a 36% do total, seguido do sobreaquecedor e reaquecedor com 25% e 24%, respetivamente.

Os resultados apresentados na Figura 9 indicam que a água de alimentação foi introduzida a 146 °C no economizador. Nos painéis de vaporização, o calor latente transferido promove a mudança de fase. Observa-se também que o vapor sobreaquecido do GV atingiu uma temperatura de 567 °C. A energia necessária para obter as temperaturas do circuito água-vapor resultam da transferência de calor proveniente dos gases da combustão.

Verifica-se que o maior gradiente de temperatura do circuito ar-fumos ocorre na zona de sobreaquecimento e reaquecimento, correspondendo a 39,5% da transferência de calor no GV. A permuta de calor ocorrida nos painéis de vaporização e no economizador ocorrem com um gradiente de temperatura menos acentuado face ao reaquecedor e sobreaquecedor. No circuito ar-fumos verifica-se uma diminuição da temperatura após a troca de calor com os permutadores de 343 °C.





**Figura 9 – Temperaturas ao longo dos circuitos água-vapor e ar-fumos**

Fonte: Autores

#### 4 CONCLUSÕES

Este artigo consistiu no desenvolvimento de uma aplicação para simulação de GV. A aplicação desenvolvida implementa o modelo de geradores de vapor com reaquecimento, e permite que o utilizador defina os parâmetros do equipamento e do processo de queima, incluindo a possibilidade de misturar 2 combustíveis. Foram realizados testes para validar os resultados pelo modelo implementado, tendo-se verificado que a aplicação fornece resultados consistentes.

Aplicando as características da central do ribatejo, com uma pressão de trabalho de 12,5 MPa, uma potência útil de 176 MW e um caudal de gases de exaustão de 655 kg/s, verificou-se um desvio de -1,5% nas temperaturas do circuito água-vapor, atingindo-se uma temperatura máxima de 567 °C no sobreaquecedor. A maior transferência de calor no circuito ar-fumos observa-se junto aos permutadores sobreaquecedor e reaquecedor, tendo-se verificado uma redução de 150 °C.

A aplicação permitiu analisar os permutadores, com destaque para os painéis de vaporização, que apresentam a maior transferência de calor (36%). A interface gráfica e o relatório gerado pela aplicação proporcionam uma visualização clara dos resultados, facilitando a análise do GV.

#### REFERÊNCIAS

ACEA. (2023). *A mere 10% of combustion engine cars on EU roads set to fall under Euro 7 rules in 2035*. April. <https://www.acea.auto/figure/a->

mere-10-of-combustion-engine-cars-on-eu-roads-set-to-fall-under-euro-7-rules-in-2035/

Alobaid, F., Mertens, N., Starkloff, R., Lanz, T., Heinze, C., & Epple, B. (2017). Progress in dynamic simulation of thermal power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, 59, 79–162. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.11.001>

Annaratone, D. (2008). *Steam Generators Description and Design*. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-77715-1>

Aviso, K. B., Sy, C. L., Tan, R. R., & Ubando, A. T. (2020). Fuzzy optimization of carbon management networks based on direct and indirect biomass co-firing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110035. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110035>

Balanuta, V., Baptista, P., Carreira, F., Duarte, G. O., & Casaca, C. S. S. L. (2024). Assessment of Influential Operational Parameters in the Mitigation of CO<sub>2</sub> Emissions in a Power Plant: Case Study in Portugal. *Clean Technologies*, 6(3), 1169–1180. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6030057>

Balmer, R. T. (2011). *Modern engineering thermodynamics* (Academic Press, Org.). Amsterdam, The Netherlands.

Beck, J. C., & Watkins, A. P. (2004). The simulation of fuel sprays using the moments of the drop number size distribution. *International Journal of Engine Research*, 5(1), 1–21. <https://doi.org/10.1243/146808704772914219>

Bhiogade, D. S. (2023). Ultra supercritical thermal power plant material advancements: A review. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 3, 100024. <https://doi.org/10.1016/J.JALMES.2023.100024>

Casaca, C., & Costa, M. (2011). Detailed measurements in a laboratory furnace with reburning. *Fuel*, 90(3), 1090–1100. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.020>

Coelho, P. (2017). *Tabelas de Termodinâmica*. Edições Técnicas, Lda.

Diawuo, F. A., Scott, I. J., Baptista, P. C., & Silva, C. A. (2020). Assessing the costs of contributing to climate change targets in sub-Saharan Africa: The case of the Ghanaian electricity system. *Energy for Sustainable Development*, 57, 32–47. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2020.05.001>

Ferreira, P. T., Fernandes, U., Casaca, C., Ferreira, M. E. C., Teixeira, J. C. F., & Costa, M. (2015). Particulate matter emissions and fly ash characteristics in a pulverized biomass fired large-scale laboratory furnace. *Proceedings of the 12th International Conference on Energy for a Clean Environment, Lisboa, Portugal, 5–9 Julho*.

*FPDF for Python*. (2012). <https://pyfpdf.readthedocs.io/en/latest/>. <https://pyfpdf.readthedocs.io/en/latest/>

Gazoni, E., & Clark, C. (2024). *openpyxl - A Python library to read/write Excel 2010 xlsx/xlsm files*. <https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/>

Gonçalves, J. P. F. (2016). *Desenvolvimento de aplicação para o cálculo da condução térmica em edifícios*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Hunter, J., Dale, D., Firing, E., Droettboom, M., & Matplotlib development team. (2024). *Matplotlib 3.9.2 documentation*. The Matplotlib development team.

Kakaç, S. (1991). *Boilers, Evaporators, and Condensers*. Wiley.

Lockwood, F. C., Salooja, A. P., & Syed, S. A. (1980). A prediction method for coal-fired furnaces. *Combustion and Flame*, 38, 1–15. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90033-4)

Opriş, I., Cenuşă, V. E., Norişor, M., Darie, G., Alexe, F. N., & Costinaş, S. (2020). Parametric optimization of the thermodynamic cycle design for supercritical steam power plants. *Energy Conversion and Management*, 208, 112587. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112587>

pandas via NumFOCUS, Inc. (2024). *Pandas documentation - pandas 2.2.2*. Hosted by OVHcloud. <https://pandas.pydata.org/docs/index.html>

Pena, R. T., Masada, G. Y., & Flake, R. H. (1987). A Boiler-Turbine Mathematical Model for Power Plant Operation Studies. *IFAC Proceedings Volumes*, 20(9), 681–686. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)55787-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)55787-0)

Portocarrero, M. M. P. T. (2015). *Desempenho económico de centrais termoeléctricas de ciclo combinado: efeito de alguns parâmetros de concepção*. Universidade de Aveiro.

Python Software Foundation. (2023). *Python 3.12.5 documentation*. Python Software Foundation. <https://docs.python.org/3/>

Schnell, U. (2001). Numerical modelling of solid fuel combustion processes using advanced CFD-based simulation tools. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, 1(4), 208. <https://doi.org/10.1504/PCFD.2001.001485>

Senecal, P. K., Pomraning, E., Richards, K. J., Briggs, T. E., Choi, C. Y., McDavid, R. M., & Patterson, M. A. (2003, março 3). Multi-Dimensional Modeling of Direct-Injection Diesel Spray Liquid Length and Flame Lift-off Length using CFD and Parallel Detailed Chemistry. *SAE Technical Paper, SAE World Congress & Exhibition*. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1043>

Versteeg, H.K. & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (Second edition). Pearson Education Ltd.



## **AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO DO SECTOR RODOVIÁRIO PORTUGUÊS**

SALVADOR, JOÃO (1); DUARTE, GONÇALO (2); BAPTISTA, PATRÍCIA (3)

(1) ISEL - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, E-mail:  
[a47326@alunos.isel.pt](mailto:a47326@alunos.isel.pt)

(2) ISEL - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, E-mail:  
[goncalo.duarte@isel.pt](mailto:goncalo.duarte@isel.pt)

(3) IST – INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, E-mail:  
[patricia.baptista@tecnico.ulisboa.pt](mailto:patricia.baptista@tecnico.ulisboa.pt)

### **RESUMO**

Tendo em conta as metas nacionais e europeias de descarbonização, o sector dos transportes possui elevada relevância, considerando que representa cerca de  $\frac{1}{4}$  das emissões de gases de efeito de estufa. O presente trabalho tem como objetivo analisar estratégias de descarbonização no sector dos transportes, de forma a verificar as metas 2050. Foi utilizado um modelo que tem por base o histórico do parque automóvel nacional, as vendas de novos veículos e o abatimento dos mais antigos, para estimar a composição do parque automóvel até 2050. Pela elevada importância da mobilidade eléctrica e considerando a que a partir de 2035 deixarão de ser vendidos veículos com motores de combustão interna, foram analisados cenários de penetração de veículos eléctricos, que cumpram com reduções de 55% de gases de efeito de estufa em 2030 (face a 2005) e 90% em 2050 a nível europeu. Adicionalmente, também serão analisados as premissas do Roteiro para Neutralidade Carbónica, onde se prevê que a mobilidade eléctrica nos ligeiros de passageiros seja superior a 30% até 2030 e atinja os 100% em 2050. OS resultados obtidos indicam que será difícil atingir as metas de descarbonização preconizadas para o setor dos transportes a nível nacional, mesmo num cenário em que os BEV (*Battery Electric Vehicles*) atingem uma quota de mercado de 60% já em 2030 e 85% em 2050. Tal crescimento resulta numa alteração radical do parque automóvel com os veículos eléctricos ligeiros de passageiros a representar cerca de 77% deste em 2050. Com esta transformação será possível reduzir as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> na fase de utilização do veículo em 27% em 2030 e 93% em 2050.

**Palavras-chave:** descarbonização, mobilidade eléctrica, gases efeito estufa, parque automóvel.

## ABSTRACT

Considering the national and European decarbonization targets, the transport sector is highly relevant, as it accounts for around  $\frac{1}{4}$  of greenhouse gas emissions. The aim of this paper is to analyze decarbonization strategies in the transport sector to verify the 2050 targets. A model based on the history of the national car fleet, sales of new vehicles and the disappearance of older vehicles was used to predict the composition of the car fleet by 2050. Considering the high importance of electric mobility and perspective of vehicles with internal combustion engines will no longer be sold from 2035 onwards, scenarios were analyzed for the penetration of electric vehicles, which comply with greenhouse gas reductions of 55% in 2030 (compared to 2005) and 90% in 2050 at European level. Additionally, the assumptions of the Carbon Neutrality Roadmap were also to be analyzed, where electric mobility in passenger cars is expected to exceed 30% by 2030 and reach 100% by 2050. Results obtained indicate that it will be difficult to achieve the decarbonization targets recommended for the transport sector at national level, even in a scenario where BEV (Battery Electric vehicles) reach a market share of 60% by 2030 and 85% by 2050. This growth will result in a radical change in the car fleet, with electric passenger cars accounting for around 77% by 2050. This transformation will make it possible to reduce net CO<sub>2</sub> emissions in the vehicle use phase by 27% in 2030 and 93% in 2050.

**Keywords:** decarbonization, electric mobility, greenhouse gases, car fleet.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as necessidades energéticas do mundo têm aumentado significativamente originando uma preocupação acrescida no que toca ao consumo de combustíveis fósseis e consequente emissão de gases de efeito de estufa. Um dos setores que levanta maior preocupação é o setor dos transportes o qual continua a depender de produtos petrolíferos para quase 91% da sua energia final (International Energy Agency, 2023). Devido a este aumento de preocupação em relação aos consumos energéticos e às alterações climáticas, foram estabelecidas metas para o setor da energia, o que levou os vários países da União Europeia a criarem as suas estratégias para atingir a neutralidade carbónica até 2050. Em 19 de abril de 2023, o Parlamento Europeu adotou o Regulamento (UE (União Europeia))

2023/851 ("REGULAMENTO (UE) 2023/851," 2023) que altera o Regulamento (UE) 2019/851 ("REGULAMENTO (UE) 2019/631," 2019) para reforçar os padrões de desempenho em matéria de emissões de CO<sub>2</sub> para automóveis novos de passageiros e veículos comerciais ligeiros novos. Em particular, a alteração estabelece uma meta de redução de pelo menos, 55% das emissões de gases com efeito de estufa até 2030, em comparação com 1990, para automóveis de passageiros e veículos comerciais ligeiros, com o objetivo final de alcançar a neutralidade climática até 2050. Para além disso, este regulamento define ainda que para alcançar a neutralidade climática, será necessário alcançar até 2050 uma redução global de 90 % das emissões no setor dos transportes. Ainda neste regulamento é definido que a partir de 2035, a meta de emissões de CO<sub>2</sub> para toda a frota da UE, tanto para ligeiros de passageiros como para ligeiros comerciais, é de redução de 100%, o que significa 0 g de CO<sub>2</sub>/km. Esta meta na prática representa uma proibição total das vendas de veículos com motores a combustão. Atualmente as emissões médias de CO<sub>2</sub> dos carros recém-registados na UE-27 é de cerca de 110 g/km (2022), o representa uma descida de 6 g/km comparativamente a 2021. No entanto os níveis médios de emissão de CO<sub>2</sub> em toda a frota variam amplamente entre os Estados-Membros, desde a Espanha e Itália onde o nível médio é superior ao limite médio estabelecido pelo WLTP (*Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure*) (119 g/km) até à Suécia onde a média de CO<sub>2</sub> por km foi 68 g/km. Já em termos nacionais, o nível de emissões médio de CO<sub>2</sub> ficou não só abaixo da meta estabelecida, como também é menor que a média europeia (International Council on Clean Transportation (ICCT), 2024). Portugal assumiu também o objetivo da neutralidade carbónica, tendo elaborado o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) que estabelece trajetórias e linhas de orientação para para setor com intuito de atingir tal objetivo. Ao nível dos transportes, é considerada a eletrificação da frota como principal caminho para a atingir a neutralidade carbónica prevendo-se que a mobilidade elétrica nos ligeiros de passageiros seja superior a 30% até 2030 e atinja os 100% em 2050 (ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA 2050).

Tendo em conta a necessidade de delinear um plano de descarbonização, este trabalho tem como objetivo avaliar cenários de descarbonização do sector rodoviário português tendo em conta não só metas europeias como nacionais. Para tal será desenvolvida uma ferramenta de cenarização com base no consumo energético e emissão de CO<sub>2</sub> de tecnologias de propulsão alternativas, assim como a sua evolução de vendas e peso na frota nacional.

## **2 METODOLOGIA**

Tendo em conta o elevado volume de variáveis a considerar, o modelo divide as variáveis de entrada essencialmente em 3 grandes grupos: evolução da frota, tecnologia de propulsão e fonte energética

## 2.1 Evolução da frota

Os primeiros parâmetros definidos neste conjunto de variáveis estão relacionados com os cenários de vendas. Para tal foi consultado da o arquivo da ACAP (ACAP - Associação Automóvel de Portugal, 2024) que permite obter dados históricos de vendas de todo o tipo veículos. Com estes é possível perceber que o crescimento médio nos últimos 30 anos teve, no máximo, uma variação de  $\pm 2\%$  no máximo.

Algo que também está diretamente relacionado com as vendas é a taxa de motorização. A taxa de motorização representa o número de veículos por 1000 habitantes e pode ser definida por uma curva sigmoide que se ajusta à evolução da frota desde o aparecimento do mercado, até ao mercado automóvel em expansão, acabando por fim na saturação do mercado. Um dos pressupostos deste modelo é considerar que, apesar do crescimento ligeiro da taxa de motorização nos últimos 10 anos o mercado aproxima-se da saturação, muito devido às previsões de crescimento da população que indicam uma diminuição de cerca de 8% em relação à população atual. Sendo assim, o valor adotado para a taxa de crescimento das vendas em cada ano foi ajustado de modo a manter a taxa de motorização relativamente constante.

Para além da taxa de crescimento atual do mercado automóvel, é ainda necessário definir as curvas de sobrevivência. Estas curvas podem ser definidas como o número de veículos que já não se encontram em circulação após  $k$  anos. Neste caso foi usada uma distribuição de Weibull, representada na equação (1) para descrever este fenómeno.

$$\varphi(k) = \exp\left(-\left(\frac{k+b}{T}\right)^b\right) \quad (1)$$
$$\varphi(0) = 1$$

Em que:

$k$ =idade do veículo

$b$ =inclinação da curva

$T$ =tempo de vida previsto

Dentro dos novos veículos que entram na frota é ainda necessário fazer a divisão por tipo de tecnologia. Esta diferenciação vai ser importante para o cálculo da energia total consumida por cada tipo de automóvel.

## 2.2 Tecnologia de propulsão

Tendo em conta o cenário de evolução do parque automóvel, é necessário considerar variáveis relacionadas com cada tipo de sistema de propulsão como quilometragem anual, consumo específico por km e emissões específicas.

Os dados para a quilometragem anual de tecnologias como ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle) e HEV (Hybrid Electric Vehicle)

(km/ano) podem ser retirados do “National Inventory report”, produzido pela APA (Agência Portuguesa do Ambiente) (“NATIONAL INVENTORY REPORT 2023”, [2024]). No entanto, segundo estes dados os veículos a gasóleo aparentam percorrer muitos mais quilómetros que os restantes veículos sendo a diferença maior em relação aos veículos a gasolina ( $\approx 40\%$  superior). Este fenómeno poderá dever-se aos veículos a diesel serem preferencialmente utilizados em meio profissional e empresarial onde tendencialmente percorrem mais distância anualmente. Isto aliado à falta de dados concretos em relação a tecnologia mais modernas como BEV, PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*) e FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicles*) levaram à decisão de considerar um número de quilómetros anuais percorridos igual para todas as tecnologias e resultante da média ponderada em relação ao número de veículos de cada tecnologia.

O cálculo da energia consumida por tecnologia, foi obtido tendo em conta a correlação com as emissões de  $\text{CO}_2$  (no caso do ICEV), que são contabilizadas no relatório da APA ( $\text{CO}_2/\text{km}$ ). Segundo dados da UNECE (Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa) (UNECE, 2014) são emitidas cerca de  $2650 \text{ gCO}_2$  na combustão de  $1 \text{ L}$  de gasóleo e  $2300\text{-}2400 \text{ gCO}_2$  na combustão de gasolina. Com estes fatores de emissão e com as emissões por km é possível calcular o consumo energético em  $\text{L}/100\text{km}$  de acordo a equação (2).

$$\frac{EC \times 100}{f} = e \quad (2)$$

Em que:

EC= emissões de  $\text{CO}_2$  ( $\text{g}/\text{km}$ )

f= fator de emissão ( $\text{g}/\text{L}$ )

e= Consumo de combustível ( $\text{L}/(100 \text{ km})$ )

Por sua vez, este consumo pode ser transformado em  $\text{MJ}/\text{km}$  multiplicando o mesmo pela densidade do combustível e pelo seu poder calorífico (Equação (3)).

$$E_{\text{consumida}} = \frac{e}{100} \times \rho_{\text{combustível}} \times \text{PCI}_{\text{combustível}} \quad (3)$$

Em que:

$E_{\text{consumida}}$  = Energia consumida ( $\text{MJ}/\text{km}$ )

$\rho_{\text{combustível}}$  = Massa específica do combustível ( $\text{kg}/\text{L}$ )

$\text{PCI}_{\text{combustível}}$  = Poder calorífico inferior do combustível ( $\text{MJ}/\text{kg}$ )

No caso dos BEV e PHEV a abordagem teve de ser diferente. Para os BEV, foram recolhidos os dados de consumos de energia dos 10 modelos mais vendidos na Europa e adotado um valor médio. Para os PHEV foi considerada uma proporção de aproximadamente 50/50 entre



eletricidade e gasolina. Esta proporção foi obtida comparando consumos de modelos de automóveis que possuem versões PHEV e ICEV.

### **2.3 Fonte energética**

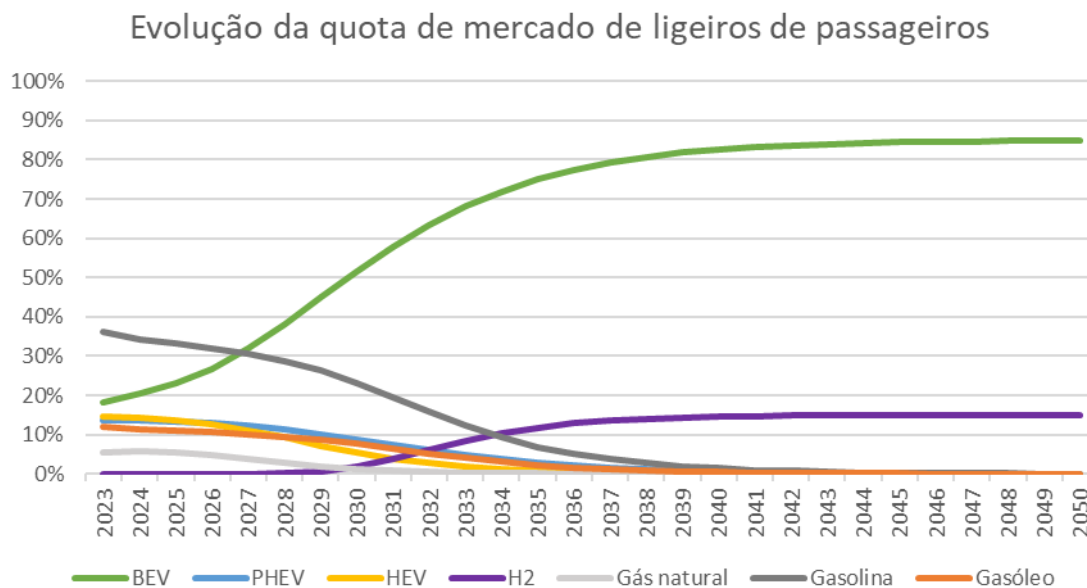
Por fim é ainda necessário considerar variáveis relacionadas com a fonte energética de cada sistema de propulsão. Isto porque, para além das emissões diretas do escape dos veículos a combustão, há que contabilizar as emissões associadas à transformação da energia primária em energia final - emissões *Well-to-tank* (WTT). Para tal foram definidos fatores de emissão que relacionam a energia produzida (MJ) com a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido (gCO<sub>2</sub>). A maioria destes fatores foram diretamente retirados de um estudo realizado para a Comissão Europeia ("JEC (JRC-Eucar-Concawe) Well-To-Wheels report v5", [2020]) onde são analisado os fatores de emissão no panorama atual da EU (União Europeia).

No caso da eletricidade o fator de emissão é altamente dependente da forma como esta é produzida. Para obter um valor o mais próximo possível ao da realidade atual em Portugal, foi consultado um estudo da *European Environment Agency* onde são definidos os fatores de emissão para a eletricidade produzida em cada país da UE, sendo atualmente o fator para Portugal 48,1 gCO<sub>2</sub>/MJ.

No entanto uma das premissas do cenário aqui construído é que a produção de energia elétrica passa a ser feita com recurso a fontes 100% renováveis logo a partir de 2040, sendo ainda mais ambicioso que a meta de 2050 proposta no RNC2050. Ora isto na prática representa uma diminuição progressiva do fator de emissão até atingir as 0 gCO<sub>2</sub>/MJ em 2040.

### **2.4 Cenário de descarbonização**

No cenário desenhado, os BEV são a principal aposta para cumprir com as normas de emissões cada vez mais restritas e atingir a neutralidade carbónica em 2050. A Figura 1 apresenta o cenário de penetração de tecnologias de propulsão considerado ao longo do tempo



**Figura 1 - Evolução da quota de mercado de ligeiros de passageiros**

Fonte: Autores

Uma das hipóteses prende-se com a quota de mercado de mercado deste tipo de veículos que cresce rapidamente atingindo os 52% em 2030 e os 85% em 2050. É importante referir ainda que neste cenário a fraca aposta em combustíveis líquidos alternativos e os impostos mais elevados sobre os combustíveis convencionais levam ao gradual desaparecimento não só dos veículos a combustão convencionais, como também de qualquer outro tipo de veículo híbrido como os PHEV e os HEV. Estes últimos atingem uma quota de mercado nos ligeiros de passageiros de 9% e 5,5% em 2030, respetivamente, sendo que a partir de 2040 não são vendidos praticamente nenhum tipo de veículo com motor de combustão interna. Para além dos BEV foi considerado ainda a introdução de FCEV a partir de 2029-2030. A intensa eletrificação leva à necessidade de introduzir o hidrogénio principalmente como forma de armazenamento de energia elétrica. Sendo assim assume-se os planos definidos no RNC2050 se concretizam, começando a produção de hidrogénio verde por volta de 2030, sendo que só a partir daí é que os FCEV começam realmente a entrar no mercado. Estes veículos desde a sua adoção atingem uma quota de mercado de 15% nos ligeiros de passageiros em 2050.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Parque automóvel

Para um cenário onde os BEV representam cerca de mais de metade das vendas totais de veículos já a partir de 2030, espera-se que o parque automóvel sofra uma grande alteração. Isto é de facto o que se observa com este tipo de tecnologia a ser principal constituinte do parque de ligeiros de passageiros, como se verifica no Quadro 1.

**Quadro 1 – Evolução da constituição da frota nacional de ligeiros**

	2022	2030	2040	2050
BEV	1%	12%	49%	77%
ICEV	96%	78%	35%	8%
PHEV	1%	5%	6%	2%
HEV	2%	5%	5%	1%
FCEV	0%	0%	6%	12%

O crescimento do número de BEV na frota é acompanhada pelo decaimento do número de veículos com motores a combustão o que inclui não só os ICEV convencionais como os PHEV e HEV.

No caso dos veículos híbridos, estes atingem o pico de representação entre 2030 e 2040, onde constituem cerca de 11% da frota total de ligeiros, sendo que a contínua diminuição e sua eventual extinção faz com que, em 2050, representem os mesmos 3% que representavam em 2022. Já os ICEV começam a perder representatividade no parque rapidamente deixando de ser a tecnologia com mais representatividade já em 2040.

#### 3.2 Emissões de CO<sub>2</sub>

A transformação drástica do parque apresentada no Quadro 1 tem um enorme impacto ao nível das emissões de escape (emissões *tank-to-wheel* (TTW)). Com este tipo de evolução é possível diminuir as emissões de escape totais em 28%, face a 2022, já em 2030 (Quadro 2). A partir desse ano verifica-se a entrada dos veículos elétricos ajuda a reduzir de forma exponencial as emissões de GEE (Gases com Efeito de Estufa) atingindo uma redução de 93% em 2050.

**Quadro 2 - Evolução das emissões TTW de CO<sub>2</sub>**

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO <sub>2</sub> (Mton)	13,5	9,9	4,1	0,9
Varição face a 2022	-	-26%	-70%	-93%

Apesar da diminuição nas emissões TTW associadas ao aumento de veículos sem emissões de gases de escape, é ainda necessário considerar as emissões associadas à produção de energia elétrica. Se o fator de emissão de produção elétrica atual (valor de 2023) se mantivesse até 2050 seria possível atingir uma diminuição total das emissões WTT de 50% o que na prática resultaria numa redução de 82% nas emissões totais de CO<sub>2</sub> – Emissões *Well-to-wheel* (WTW). Este resultado ficaria aquém das metas definidas no RNC2050 onde o objetivo é assegurar a eletricidade renovável até 2050 (redução de 99% face a 2005).

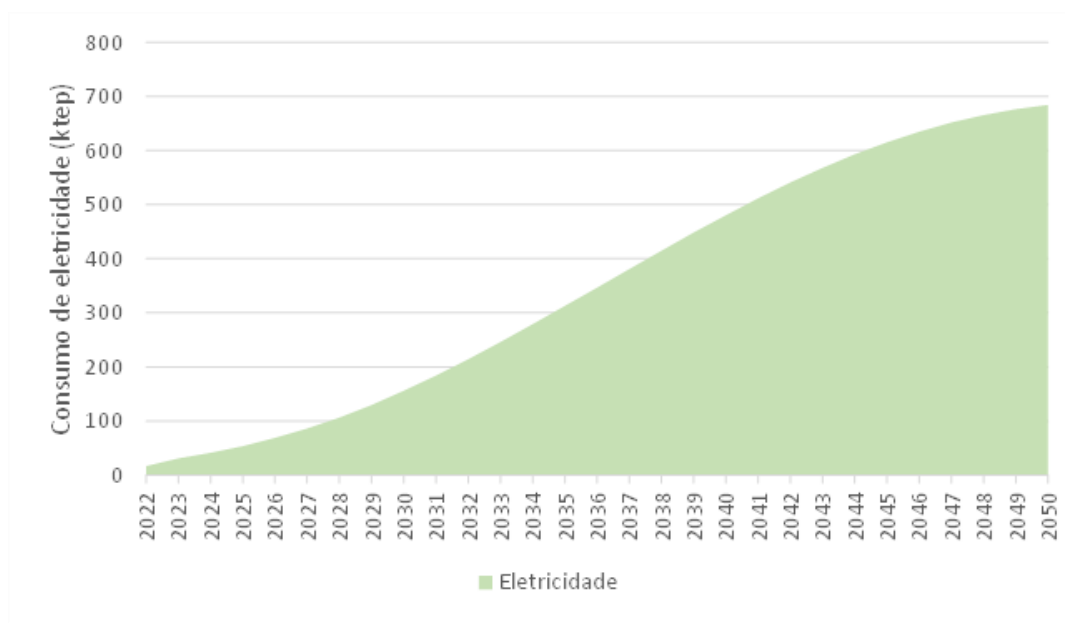
Por esse motivo neste cenário considerou-se um panorama mais otimista em que a eletricidade produzida por via totalmente renovável ocorre em 2040. Desta forma, verifica-se por uma diminuição de cerca de 90% nas emissões WTT e 93% nas emissões WTW em 2050 em relação aos níveis atuais (Quadro 3). Este resultado apesar de não alcançar os 98% de redução no setor dos transportes definidos no RNC2050, já cumpre o objetivo geral definido a nível europeu de reduzir as emissões de GEE em 90%. Outro objetivo a curto/médio prazo definido é uma redução de 40% das emissões de GEE já em 2030, algo que também não é atingido pelo menos no grupo dos veículos ligeiros alcançando estes apenas uma redução das emissões WTW de 26% em 2030.

**Quadro 3 - Evolução das emissões WTW de CO<sub>2</sub>**

	2022	2030	2040	2050
Emissões de CO <sub>2</sub> (Mton)	15,4	11,4	4,6	1,11
Varição face a 2022	-	-26%	-70%	-93%

### 3.3 Energia

Como seria de esperar, o aumento das vendas de veículos elétricos causa um aumento significativo na procura por eletricidade. Comparativamente a 2022, o consumo de eletricidade no setor dos transportes representava menos de 1% da energia total consumida pelos veículos ligeiros enquanto em projeta-se que representará cerca de 58% (685 kTep) da energia final (Figura 2)



**Figura 2 - Evolução do consumo de eletricidade**

Fonte: Autores

Em termos de energia total, a maior eficiência dos BEV é a principal responsável pela diminuição progressiva do consumo energético chegando a representar uma diminuição face ao ano base de 2022 de 23% em 2030 e 72% em 2050 (Quadro 4).

**Quadro 4 - Variação da energia total consumida**

	2022	2030	2040	2050
Energia total (kTep)	4216	3258	1869	1173
Variação face a 2022	-	-23%	-56%	-72%

Outro resultado relevante está relacionado com o nível de incorporação de energias renováveis. Um dos objetivos definidos no PNEC (PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA), [2023]) é atingir uma quota de energia renovável no transporte de 23% em 2030. Neste cenário, e mesmo com uma elevada adoção de BEV e rápida transição para eletricidade verde, esta meta só é atingida em 2035 sendo o valor em 2030 cerca de 16%.

### **3.4 Viabilidade do Roteiro Nacional**

Com os resultados apresentados é possível confirmar a hipótese já colocada anteriormente de que os objetivos definidos para 2030 serão difíceis de alcançar especialmente numa situação em que a mobilidade elétrica é a única solução para alcançar a neutralidade carbónica. Este cenário adota premissas semelhantes às utilizadas no RNC2050 com a mobilidade elétrica a ser o principal agente responsável pela diminuição das emissões de GEE nos transportes em geral. Sendo assim a diferença entre ambos os resultados deve-se principalmente que serão difíceis de alcançar. No que concerne ao número de veículos elétricos em circulação, o RNC2050 prevê que a mobilidade elétrica represente cerca de 36% de todos os veículos ligeiros de passageiros, atingindo os 100% já em 2050. Quando se compara estas metas ambiciosas com os resultados deste trabalho, torna-se difícil de acreditar que tal transformação será algo viável tendo em conta as taxas típicas de crescimento de vendas. Nesse caso, o número total de BEV no parque nacional é de apenas 12% em 2030 e 77% em 2050. A concretização do RNC iria implicar um aumento extraordinário do número de veículos vendidos anualmente especialmente nesta próxima década sendo que quase 100% destes seriam BEV.

Para além disso um dos principais impedimentos para a transformação do parque é a curva de sobrevivência dos veículos existentes. Uma das formas de acelerar a transição seria através de algum tipo de incentivo ao abate de veículos ICEV mais velhos e substituição por novos elétricos. No entanto a média de idade de 14 anos mostra que quer seja por impossibilidade financeira quer seja outro por motivo, existe uma dificuldade em trocar de automóvel com frequência.

### **3.5 Previsões Europeias**

Os resultados apresentados podem ser ainda comparados com outras previsões feita a nível europeu. No cenário *Net Zero Emissions* (NZE) projetado pela IEA (International Energy Agency, 2021) no qual se atinge a neutralidade carbónica em 2050, a eletrificação desempenha também um papel central na descarbonização dos veículos rodoviários. Neste cenário, a redução do preço das baterias leva ao aumento do número de vendas de BEV os quais atingem uma quota de mercado de  $\approx 50\%$  em 2030 e de  $90\%$  em 2050. Apesar desta evolução de mercado ser bastante semelhante à utilizada neste trabalho as reduções de CO<sub>2</sub> alcançadas pela IEA são superiores às calculadas neste trabalho como demonstra o Quadro 5.

### Quadro 5 – Comparação de redução de emissões CO<sub>2</sub>

	2022	2030	2040	2050
Redução de CO <sub>2</sub> (IEA)	-	-38%	-78%	-95%
Redução de CO <sub>2</sub> (cenário em estudo)	-	-26%	-70%	-93%

Uma das principais razões para esta diferença, é a baixa taxa de renovação de frota em Portugal sendo um dos países com a média de idade mais elevada nos veículos ligeiros (14 anos). Esta dificuldade histórica em trocar de veículo, dificulta a transição para a mobilidade elétrica e coloca em causa a viabilidade de cenários que requeiram uma renovação radical do parque automóvel.

A comparação da evolução do mercado dos BEV e da redução de emissões de CO<sub>2</sub> resultante entre a evolução de mercado prevista pela IEA e a evolução utilizada neste trabalho, ajuda mais uma vez a demonstrar a dificuldade em atingir as metas nacionais definidas, especialmente a curto prazo (2030).

#### 4 CONCLUSÕES

A transição para mobilidade 100% elétrica requer uma alteração drástica do parque automóvel nacional com uma taxa de substituição de ICEV por BEV muito acentuada. Neste cenário mesmo considerando um aumento percentual médio de 5% ao ano na quota de mercado de BEV entre 2022 e 2035, estes apenas representarão cerca de 25% da frota total de ligeiros em 2035. Assim considerando as curvas de sobrevivência dos veículos atuais apresentadas e visto que a redução de emissões de CO<sub>2</sub> neste cenário está diretamente ligada à introdução de BEV, não é difícil perceber a dificuldade para atingir a neutralidade carbónica em 2050 apenas recorrendo a BEV.

No entanto ao comparar estes resultados com as metas estabelecidas tanto no PNEC2030 como no RNC 2050, é importante ressaltar que os objetivos definidos no PNEC e no RNC são para a totalidade do setor dos transportes (o que inclui grupos como veículos pesados, transporte ferroviário e aviação). A falha em atingir as metas no setor rodoviário não implica a impossibilidade de alcançar tais objetivos recorrendo a reduções noutros meios de transporte. Mesmo assim o setor rodoviário representa mais de 70% das emissões totais do setor das quais os veículos ligeiros são responsáveis por mais de metade das emissões totais de CO<sub>2</sub> na UE (European Environment Agency (EEA) [2021]).

## REFERÊNCIAS

- [1] ACAP - Associação Automóvel de Portugal. (2024). *Estatísticas mercado automóvel*. <https://www.acap.pt/pt/home>.
- [2] European Environment Agency (EEA). (2023). *Greenhouse gas emissions*
- [3] <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport?activeAccordion=>.
- [4] [International Council on Clean Transportation (ICCT). (2024). *EUROPEAN VEHICLE MARKET STATISTICS*. <https://eupocketbook.org>
- [5] International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/)
- [6] International Energy Agency. (2023, julho 11). <https://www.iea.org/energy-system/transport>.
- [7] *JEC Well-To-Wheels report v5*. ([s.d.]). <https://doi.org/10.2760/100379>
- [8] *NATIONAL INVENTORY REPORT 2023*. ([s.d.]).
- [9] *REGULAMENTO (UE) 2019/631*. (2019).
- [10] *REGULAMENTO (UE) 2023/851*. (2023).
- [11] Revisão, A. /. ([s.d.]). *PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030)*.
- [12] *ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA 2050 (RNC2050) ESTRATÉGIA DE LONGO PRAZO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA DA ECONOMIA PORTUGUESA EM 2050 PT Ambiente*. ([s.d.]).
- [13] UNECE. (2014). *Accurate fuel efficiency and CO2 test for new cars (WLTP)*. Em <https://unece.org/press/unece-adopts-more-accurate-fuel-efficiency-and-co2-test-new-cars-wltp>.





## AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO DO IOGURTE

MANDULO, ARLÉZIA JOSEFINA JAMBA (1); PIRES, LUÍS CARLOS CARVALHO (2); SILVA, PEDRO NUNO DINHO PINTO (3)

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-mail: [arlezia.mandulo@ubi.pt](mailto:arlezia.mandulo@ubi.pt)

(2) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-mail: [pires@ubi.pt](mailto:pires@ubi.pt)

(3) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-mail: [dinho@ubi.pt](mailto:dinho@ubi.pt)

### RESUMO

Várias questões desafiam o setor industrial de uma forma geral, e a redução do consumo de energia é uma delas. A indústria látea é um setor intensivo no consumo de energia, já que para processar os produtos o leite precisa de ser submetido a sucessivos processos de aquecimento e refrigeração, de maneira a garantir os requisitos de segurança alimentar e a variedade de produtos existentes. Para reduzir o consumo de energia e melhorar a competitividade do setor, torna-se necessário quantificar, o mais próximo possível da realidade, o consumo de energia neste setor, contemplando processos e produtos individuais; assim sendo, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise energética do processo de pasteurização do iogurte – um processo fundamental na indústria látea, que consiste em aquecer o leite até uma temperatura próxima aos 100°C, para eliminar microrganismos presentes no leite cru, prejudiciais à saúde humana e que causam deterioração do produto – aplicando as leis da termodinâmica ao pasteurizador, com base nos dados de produção recolhidos numa unidade fabril em Portugal. O estudo pode ser um contributo ao conhecimento existente na literatura sobre o consumo energético na indústria látea; fornecendo dados que podem ser usados como base para a tomada de decisões que visam melhorar a eficiência na produção e a competitividade do setor.

**Palavras-chave:** Pasteurização, Análise Energética, Produção de iogurte, Indústria Látea.

### ABSTRACT

*Several issues challenge the industrial sector in general and reducing energy consumption is one of them. The dairy industry is an energy-intensive sector, since to process products, milk needs to be subjected to successive heating and cooling processes to guarantee food safety requirements and the variety of existing products. In order to reduce energy consumption and improve the sector's competitiveness, it is necessary to quantify energy consumption in this sector as closely as possible to reality, looking at individual processes and products; Therefore, the aim of this study is to carry out an energy analysis of the yoghurt pasteurization process - a fundamental process in the dairy industry, which consists of heating milk to a temperature close to 100°C in order to eliminate microorganisms present in raw milk that are harmful to human health and cause the product to deteriorate - applying the laws of thermodynamics to the pasteurizer, based on production data collected at a factory in Portugal. The study can be a contribution to the existing knowledge in the literature on energy consumption in the dairy industry; providing data that can be used as a basis for decision-making aimed at improving production efficiency and the sector's competitiveness.*

**Keywords:** Pasteurization, Energy Analysis, Yoghurt Production, Dairy Industry.

## 1 INTRODUÇÃO

A alimentação é parte essencial da vida do ser humano. Entre os alimentos que fazem parte da dieta da maioria da população mundial estão os laticínios, por serem ricos em proteínas, lípidos, carboidratos, vitaminas, minerais, probióticos e pre-bióticos (GARCÍA-BURGOS et al., 2020). Além dos nutrientes conhecidos, alguns estudos têm avaliado a possibilidade da utilização de alguns laticínios, principalmente os fermentados, para o tratamento e prevenção de doenças (RALSTON et al., 2012)(SCHWINGSHACKL et al., 2017). Estes indicam uma nova perspectiva sobre o futuro da produção e consumo de laticínios e sugerem que mais estudos relacionados sejam feitos, de maneira a adequar os produtos aos gostos e necessidades dos consumidores(GARCÍA-BURGOS et al., 2020).

A indústria de laticínios está bem consolidada nos países desenvolvidos e está em expansão nos países em desenvolvimento devido ao desenvolvimento económico, aumento da população e mudanças nos padrões alimentares (ADESOGAN; DAHL, 2020). A indústria, é igualmente importante para o desenvolvimento económico; em 2020, na União Europeia, a indústria alimentar foi responsável por 2% do PIB e gerou um volume de negócios de 1,112 bilhões de euros. Por outro lado, a indústria de laticínios é o terceiro subsetor principal da indústria alimentar, responsável por 16% do volume de negócios gerado pela indústria alimentar e 9% do total de empregos gerados (FOOD DRINK EUROPE, 2023).

Paralelamente à posição económica, o setor industrial é também um dos que mais consome energia. Em 2021, 25% da energia consumida na União Europeia foi para o setor industrial, dos quais 11,6% foram para a indústria alimentar e de bebidas (TWEET, 2024). A maior parte desta energia foi produzida a partir do carvão, gás natural e petróleo bruto, juntos fazem 68,4%; de fontes nucleares, 12,7% e fontes renováveis, 17,4%. No entanto, 91,7% das necessidades de petróleo, 83,4% das necessidades de gás natural e 37,5% das necessidades de combustíveis fósseis sólidos, foram satisfeitas por importações (EUROSTAT, 2019); indicando uma elevada dependência energética. Outro ponto importante a considerar, relativamente ao consumo de energia proveniente dos combustíveis fósseis, é o impacto ambiental. Segundo o relatório anual de emissões de gases de efeito de estufa, do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, as emissões de gases de efeito de estufa aumentaram entre 0,8% - 1,5% em 2022, tendo sido registados um total de 57,4 Gt de dióxido de carbono equivalente. As emissões provenientes da utilização de combustíveis fósseis foram responsáveis por 2/3 das emissões totais; os setores de produção de energia e industrial, são os setores com as taxas de emissão mais elevadas, com 36% e 25% do valor total, respetivamente (UNEP, 2023).

A indústria de laticínios utiliza quantidades significativas de energia, desde a receção do leite até a obtenção do produto final. Os laticínios

são processados a partir do leite cru, que é composto por uma grande variedade de micro-organismos prejudiciais à saúde e que comprometem a qualidade do leite (MELINI et al., 2017). Para controlar a produção e crescimento destes micro-organismos, o leite cru é submetido a vários processos de aquecimento e refrigeração; além disto, para processar os diferentes tipos de produtos é necessário separar ou concentrar os sólidos que compõem o leite e este processo de separação exige grandes quantidades de energia, dependendo do tipo de produto (XU; FLAPPER, 2009).

O setor de laticínios é um dos mais importantes dentro da indústria alimentar, sempre foi ao longo dos anos e é igualmente um dos que mais consome energia (LADHA-SABUR et al., 2019). Apesar disto, existem poucos estudos que caracterizam o uso de energia no setor. Existe uma lacuna de informações sobre o uso de energia na indústria látea, a falta de ferramentas e profissionais nas indústrias para monitorizar o consumo de energia é uma das principais causas para essa lacuna (XU; FLAPPER, 2009). Num de seus estudos (LADHA-SABUR et al., 2019) afirmam que para que reduções significativas sejam alcançadas na procura de energia, os pontos críticos precisam de ser identificados primeiro.

Para caracterizar corretamente o setor de laticínios, todos os produtos precisam de ser contemplados assim como os respectivos processos; os principais estudos existentes não caracterizam os processos nem os produtos todos detalhadamente. (RAMÍREZ; PATEL; BLOK, 2006) avaliaram a eficiência energética da indústria de laticínios em quatro países da União Europeia, avaliaram o consumo e identificaram oportunidades de melhoria com base nas diferenças da intensidade energética; (XU; FLAPPER, 2009) caracterizaram o uso de energia no processamento de leite líquido; (BRIAM; WALKER; MASANET, 2015) compararam diferentes métricas para o cálculo da intensidade energética no fabrico de soro de leite e queijo e apresentaram a quantidade de energia necessária para produzir os produtos. Outros estudos que caracterizam de alguma maneira o consumo de energia do setor, são as análises de ciclo de vida (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2013) (ÜÇTUĞ, 2019) (VASILAKI et al., 2016). No entanto, estes não quantificam o uso de energia, apenas situam o impacto do uso de energia dentro de todos os outros impactos ambientais causados pela indústria látea. Diferentes avaliações termodinâmicas sobre perda de exergia também caracterizaram em algum grau a utilização de energia no setor láteo (JOKANDAN; AGHBASHLO; MOHTASEBI, 2015); e, finalmente estudos associados a tecnologias emergentes (ATKINS; WALMSLEY; MORRISON, 2010) (HUSNAIN et al., 2022) (TIGABE; BEKELE; PANDEY, 2022).

Existem poucos estudos que caracterizam o consumo de energia na indústria de laticínios e que apresentam em detalhe os consumos associados aos processos de produção dos mais variados produtos. Nos anos passados, até 2015, houve mais estudos sobre este aspeto e essa necessidade foi apresentada pela literatura na época; no entanto existem poucos estudos recentes (LADHA-SABUR et al., 2019). Os estudos

apresentados na presente revisão, apresentam maioritariamente dados referentes aos anos anteriores a 2005 e carecem de uma atualização. Os produtos mais estudados foram o leite líquido para consumo e o queijo, pelo que é necessário contemplar os outros produtos. A preocupação sobre o cumprimento das metas de sustentabilidade foi a principal motivação para a realização dos estudos que existem, não obstante a isso o conhecimento real sobre o consumo energético permitirá também que as indústrias melhorem a sua competitividade. Portanto, este estudo sobre avaliação energética do processo de pasteurização de iogurte, pode ser um contributo ao conhecimento existente na literatura, fornecendo dados concretos que podem ser usados como base para a tomada de decisões que visam melhorar a eficiência na produção.

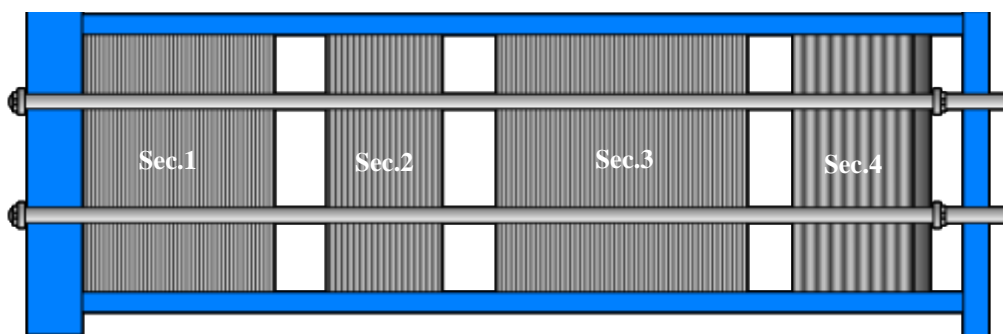
## **2 MATERIAIS E METODOLOGIA**

O trabalho foi realizado com base nos dados recolhidos durante os processos de pasteurização, realizados numa unidade industrial em Portugal, nos dias 30 e 31 de maio do ano de 2023.

### **2.1 Descrição do sistema**

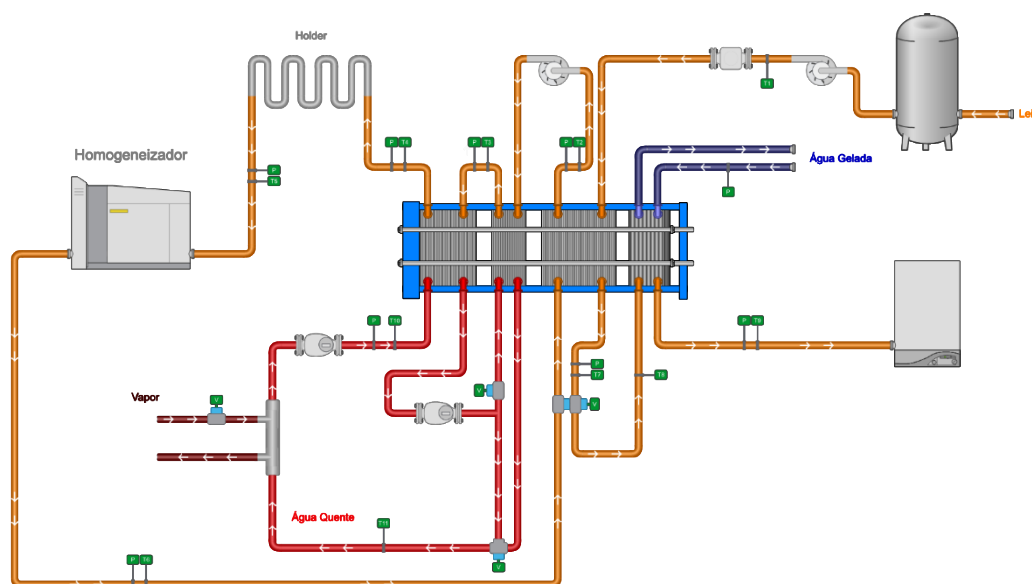
Durante o processo de produção de iogurte, o leite cru é submetido a vários processos de aquecimento e refrigeração e um dos processos fundamentais é a pasteurização. A pasteurização consiste no aquecimento e arrefecimento rápido de todas as partículas do leite; com a finalidade de eliminar os micro-organismos presentes. No caso de estudo apresentado, o leite chega ao pasteurizador a uma temperatura inferior a 6°C, é aquecido até atingir 95°C, faz um "holder" de 8 minutos para garantir o tempo de pasteurização, em seguida vai ao homogeneizador. Depois da homogeneização o leite volta ao pasteurizador onde é novamente arrefecido até uma temperatura determinada para o tipo de iogurte a preparar – 38°C para iogurtes não gelificados, e 5°C para gelificados – em seguida sai do pasteurizador e segue para a etapa da inoculação ou armazenamento.

O pasteurizador é um permutador de calor de placas, possui várias entradas e saídas nas quais se podem criar circuitos para circulação de diferentes fluidos de transferência de calor, Figura 1. No caso em estudo, podem circular simultaneamente 3 fluidos diferentes: o produto (leite), água quente e água gelada, Figura 2.



**Figura 1 - Corte transversal do pasteurizador**

Fonte: Adaptado do diagrama da instalação



**Figura 2 - Circuito de pasteurização**

Fonte: adaptado do diagrama da instalação

### 2.1.1 Fases de aquecimento

Antes de mais, passaremos a esclarecer algumas terminologias relacionadas ao processo.

*Holder*: O holder é um circuito em forma de serpentina, que dura 8 minutos a ser percorrido. Serve para garantir que o leite está a 95°C durante 8 min. Tendo em conta o caudal que circula e o diâmetro das condutas, foi dimensionado um comprimento que dure um determinado tempo a ser percorrido, no caso o tempo necessário para pasteurização. Assim sendo, depois de atingir 95°C o leite percorre o holder e no final dele, se permanecer a 95°C, o leite está pasteurizado.

*Água termizada*: a água termizada é a água quente reaproveitada depois de transferir calor ao leite. Na Figura 2 podemos observar que depois do primeiro processo de transferência de calor, a água quente é

novamente bombeada para a segunda seção do pasteurizador e só depois volta ao permutador tubular onde é aquecida novamente com o vapor.

Para uma melhor compreensão das temperaturas registadas em cada ponto, o pasteurizador foi dividido em duas fases. A primeira vai desde a entrada do leite no pasteurizador, vindo dos depósitos de armazenamento, até à saída do homogeneizador; a segunda fase começa imediatamente depois da homogeneização, quando o leite retorna ao pasteurizador para começar o processo de arrefecimento. Os sensores de temperatura presentes nos diferentes pontos do circuito, bem como os respetivos set-points, são identificados na *Tabela 1*.

**Tabela 1 - Sensores de temperatura ao longo do percurso**

Temperaturas		
Código	Descrição	Set point
T1	Temperatura do leite na entrada do pasteurizador	4°C – 6°C
T2	Temperatura do leite na primeira saída do pasteurizador	-
T3	Temperatura do leite na segunda saída do pasteurizador	-
T4	Temperatura do leite na terceira saída do pasteurizador (depois de ser aquecido com água quente)	95°C
T5	Temperatura do leite depois do holder	95°C
T6	Temperatura do do leite na primeira entrada (2ª fase – retorno ao pasteurizador)	-
T7	Temperatura do leite na primeira saída (2ª fase – retorno ao pasteurizador)	12°C – 5°C
T8	Temperatura do leite na segunda entrada (2ª fase – retorno ao pasteurizador)	12°C – 38°C
T9	Temperatura do leite na saída do pasteurizador	38°C – 5°C
T10	Temperatura da água quente na entrada do pasteurizador	96°C
T11	Temperatura da água quente na entrada do permutador tubular	-

Existem três fases de aquecimento do leite durante a pasteurização, nas duas primeiras fases há uma troca térmica entre o leite frio à entrada e o leite já pasteurizado depois do homogeneizador.

A transferência de calor entre o leite à entrada e o leite no final da pasteurização dá-se na seção 3 do pasteurizador; dessa transferência resulta um aumento na temperatura inicial do leite frio de mais de 50°C e

uma redução no leite anteriormente a 100°C de mais de 90°C. Na segunda fase, o leite a 60°C, segue para a segunda seção do pasteurizador, onde ocorre mais uma transferência de calor entre o leite e a água termizada, que permite elevar a temperatura do leite de 60°C para 75°C. Depois das duas fases de aquecimento, o leite é aquecido com água quente, na secção 1 do pasteurizador, até atingir 95°C.

## 2.2 Balanço de energia

Considerando insignificantes as transferências de calor para a vizinhança e as variações nas energias cinética e potencial dos fluídos, a equação geral de balanço energético aplicada ao pasteurizador dá-nos:

$$q = \dot{m}_q \times c_{pq} \times (T_{qentrada} - T_{qsaída}) \quad (1)$$

$$q = \dot{m}_f \times c_{pf} \times (T_{fentrada} - T_{fsaída}) \quad (2)$$

Onde,  $q$  = taxa total de transferência de calor entre os dois fluídos

$\dot{m}$  = caudal mássico

$c_p$  = capacidade calorífica

$T$  = temperatura do produto

Os índices f e q referem-se ao fluído frio e quente, respetivamente. Como os caudais medidos são caudais volúmicos, as equações 1 e 2 ficam:

$$q = Q_q \times \rho_q \times C_{pq} \times (T_{qentrada} - T_{qsaída}) \quad (3)$$

$$q = Q_f \times \rho_f \times C_{pf} \times (T_{fentrada} - T_{fsaída}) \quad (4)$$

Onde,  $Q$  = caudal volúmico

$\rho$  = massa específica

O leite tem uma composição variada, as suas propriedades físicas dependem das propriedades físicas dos seus componentes, pelo que o conhecimento exato das propriedades torna-se complexo. Segundo a literatura consultada, (HU et al., 2009) (GUIGNON; REY-SANTOS; SANZ, 2014)(KAILASAPATHY, 2016), adotaremos para o leite os vales:  $C_p = 3,98$  kJ/kgK para toda a gama de temperaturas;  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> para temperaturas acima de 30°C e, para temperaturas iguais ou inferiores a 30°C,  $\rho = 1028$  kg/m<sup>3</sup>.

Os iogurtes tipo I e tipo II, são iogurtes batidos; os iogurtes tipo III e tipo IV são iogurtes líquidos. Os valores de temperatura, caudal e pressão correspondem à média dos valores medidos durante os processos.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira etapa de aquecimento ambos os fluídos, quente e frio, são leite. A temperatura inicial do leite a ser aquecido é a temperatura registada por T1 e a temperatura final do leite é a temperatura registada por T2. A temperatura inicial do leite quente é a temperatura registada por T6 e a temperatura final é a temperatura registada por T7. Os dados

referentes à primeira fase de aquecimento para cada processo são apresentados na Tabela 2 Tabela 3 Tabela 4 e Tabela 5.

**Tabela 2 -Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo I, primeira fase**

30/05/2023 – 11:50 às 13:55		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
T_entrada(°C)	6,2	99,6
T_saida (°C)	62,6	6,8
Q (L/h)	9394	7421
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1028	1000
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98	3,98

**Tabela 3 – Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo II, primeira fase**

31/05/2023 – 17:08 às 18:43		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
T_entrada(°C)	5,7	99,7
T_saida (°C)	65,6	6,5
Q (L/h)	9393	7608
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1028	1000
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98	3,98

**Tabela 4 – Dadosdo processo de pasteurização do iogurte tipo III, primeira fase**

30/05/2023 – 14:00 às 16:00		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
T_entrada(°C)	6,2	99,3
T_saida (°C)	67,3	6,7
Q (L/h)	9413	7531
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1028	1000
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98	3,98



**Tabela 5 – Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo IV, primeira fase**

31/05/2023 – das 10:07 às 12:10		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
T_entrada(°C)	6,2	99,6
T_saida (°C)	67,8	6,7
Q (L/h)	9434	7548
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1028	1000
C_p (kJ/kg°C)	3,98	3,98

Na segunda etapa de aquecimento, o fluido quente é água reaproveitada (termizada), no entanto não há sensores de temperatura e caudal da água neste troço, o balanço será feito com base nas necessidades do leite apenas. A temperatura de entrada do leite é a temperatura registada por T2 e a temperatura de saída é a temperatura registada por T3. Os valores referentes à segunda fase de aquecimento, são apresentados na Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9.

**Tabela 6 - Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo I, segunda fase**

30/05/2023 – 11:50 às 13:55	
Propriedade	Leite Frio
T_entrada(°C)	62,6
T_saida (°C)	75
Q (L/h)	9394
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
C_p (kJ/kg°C)	3,98

**Tabela 7 – Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo II, segunda fase**

31/05/2023 – 17:08 às 18:43	
Propriedade	Leite Frio
T_entrada(°C)	65,6
T_saida (°C)	75,0
Q (L/h)	9393
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
C_p (kJ/kg°C)	3,98

**Tabela 8 – Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo III, segunda fase**

30/05/2023 – 14:00 às 16:00	
Propriedade	Leite Frio
T_entrada(°C)	67,3
T_saida (°C)	75,1
Q (L/h)	9413
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98

**Tabela 9 - Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo IV, segunda fase**

31/05/2023 – das 10:07 às 12:10	
Propriedade	Leite Frio
T_entrada(°C)	67,8
T_saida (°C)	75
Q (L/h)	9434
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98

Na terceira fase de aquecimento, o leite é aquecido com água quente até atingir a temperatura de pasteurização. A temperatura de entrada do leite é registada por T3 e a temperatura de saída é registada por T4. A temperatura de entrada da água é a temperatura registada por T10 e a temperatura de saída consideramos a temperatura registada por T11. Os dados referentes a terceira fase, são apresentados na Tabela 10, tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

**Tabela 10 – Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo I, terceira fase**

30/05/2023 – das 11:50 às 13:55		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
T_entrada(°C)	75	96,1
T_saida (°C)	95	81,1
Q (L/h)	9394	35490
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000	961
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98	4,21

**Tabela 11 – Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo II, terceira fase**

31/05/2023 – 17:08 às 18:43		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
T_entrada(°C)	75	102,9
T_saida (°C)	95	90
Q (L/h)	9393	35590
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000	956
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98	4,22

**Tabela 12 – Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo III, terceira fase**

30/05/2023 – das 14:00 às 16:00		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
T_entrada(°C)	75	97,1
T_saida (°C)	95	83,5
Q (L/h)	9413	35490
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000	960
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98	4,21

**Tabela 13 – Dados do processo de pasteurização do iogurte tipo IV, terceira fase**

31/05/2023 – das 10:07 às 12:10		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
T_entrada(°C)	75	99,8
T_saida (°C)	95	86,4
Q (L/h)	9434	35660
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000	958
C <sub>p</sub> (kJ/kg°C)	3,98	4,22

Os produtos apresentam o mesmo padrão de variação na temperatura, caudal, temperatura da água quente e pressão, durante o processo. Considerando apenas a quantidade de energia que os produtos recebem, a tabela 14 resume os resultados da avaliação energética.

**Tabela 14 - Potência térmica consumida pelo leite em cada fase**

Produto	Fase 1 (kW)	Fase 2 (kW)	Fase 3 (kW)	Total (kW)
logurte tipo I	602,7	128,3	207,7	938,7
logurte tipo II	639,9	97,7	207,4	945,0
logurte tipo III	653,9	80,5	207,3	941,7
logurte tipo IV	660,9	75,1	208,3	944,4

Considerando o tempo de pasteurização podemos então determinar a energia consumida durante a pasteurização de cada um dos produtos considerados, os resultados são apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15 – Energia consumida pelo leite em cada fase**

Produto	Tempo de pasteurização (horas)	Fase 1 (kWh)	Fase 2 (kWh)	Fase 3 (kWh)	Total (kWh)
logurte tipo I	2,08	1253,56	266,9	431,9	1952,4
logurte tipo II	1,58	1011,2	154,3	327,6	1493,1
logurte tipo III	2	1307,8	160,9	414,65	1883,35
logurte tipo IV	2,05	1354,8	154,1	427,1	1936

Tendo em conta os caudais dos produtos e os respetivos tempos de pasteurização, colocando de lado as etapas de recuperação de calor, a energia necessária para pasteurizar cada litro de produto pode ser obtida dividindo a energia total consumida, pelo total de litros pasteurizados, os resultados são apresentados na Tabela 16. Ressaltamos que a energia considerada é energia consumida na terceira fase de aquecimento, onde a energia térmica provém da água aquecida com vapor da caldeira.

**Tabela 16 - Energia consumida por litro de leite pasteurizado**

Produto	Tempo de pasteurização (horas)	Caudal (L/h)	Total de litros pasteurizados	Energia (kWh)	Energia/litro (kWh/l)
logurte tipo I	2,08	9394,3	19540,5	431,9	0,022
logurte tipo II	1,58	9393,1	14841,1	327,6	0,022
logurte tipo III	2	9413,5	18827	414,6	0,022
logurte tipo IV	2,05	9434,5	19340,8	427,1	0,022

Aplicando a mesma análise a água quente, obtivemos os dados apresentados na Tabela 17. Ressaltamos que não foi possível obter a temperatura a que a água quente sai do pasteurizador, depois de

aquecer o leite, antes de voltar a este na secção 2, como água termizada. A temperatura de saída considerada (T11) para a análise é a temperatura à entrada do permutador tubular, esta é a temperatura resultante da mistura da água quente depois da terceira fase de aquecimento do leite com a água quente, depois da segunda fase de aquecimento. No circuito, Figura 2, depois da água quente a 90°C aquecer o leite, na terceira fase de aquecimento, uma parte é desviada para o pasteurizador na segunda secção, água termizada, outra parte segue o circuito e voltam a misturar-se antes do permutador tubular; portanto os dados apresentados a seguir são referentes ao conjunto água quente e água termizada.

**Tabela 17 - Potência térmica e energia transferida pela água quente**

Produto	Tempo de pasteurização (horas)	Caudal (L/h)	Potência térmica transferida pela água quente (kW)	Energia (kWh)	Energia/litro (kWh/l)
logurte tipo I	2,08	9394,3	599,5	1247,0	0,017
logurte tipo II	1,58	9393,1	533,2	842,5	0,015
logurte tipo III	2	9413,5	543,6	1087,1	0,015
logurte tipo IV	2,05	9434,5	536,9	1100,9	0,015

#### 4. SUGESTÕES DE MELHORIA

Duas etapas fundamentais que ocorrem na pasteurização são as fases de recirculação de água quente no sistema. Este processo poderia ser mais eficiente se o circuito a percorrer fosse encurtado, dessa forma haveriam menos perdas para a vizinhança, conseqüentemente menos necessidade de calor, e o processo seria mais rápido.

O elemento chave do processo é o permutador de calor, a eficiência na transferência de calor entre os dois fluídos depende muito da qualidade do equipamento. Assim sendo, optar por equipamentos mais recentes, mais aprimorados melhoraria significativamente a eficiência do processo. Na primeira fase de aquecimento, por exemplo, há uma diferença significativa entre a energia que o leite quente libera e a energia que o leite frio recebe. Esta energia poderia ser melhor aproveitada com permutadores mais aprimorados, uma vez que o equipamento em causa é antigo. Dessa forma o leite seguiria para a segunda fase com uma

temperatura mais elevada e seria necessário menos energia para atingir a temperatura de pasteurização.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que durante as pasteurizações, a variação das grandezas é mais ou menos igual. A energia térmica gasta por litro de produto pasteurizado é a mesma, 0,022 kWh/l. Relativamente à comparação entre a energia consumida e a energia fornecida, é difícil estabelecer essa diferença, porque não foi possível separar a parcela da água depois da troca térmica principal, da parcela da água reaproveitada. Sem uma diferença de temperaturas exata, não é possível saber precisamente a quantidade de energia térmica transferida da água para o produto.

Ainda há um vasto caminho a percorrer para a caracterização completa do consumo energético na indústria látea, é necessário cobrir outros processos dentro da linha de produção.

## REFERÊNCIAS

ADESOGAN, A. T.; DAHL, G. E. MILK Symposium Introduction: Dairy production in developing countries. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 11, p. 9677–9680, 2020.

ATKINS, M. J.; WALMSLEY, M. R. W.; MORRISON, A. S. Integration of solar thermal for improved energy efficiency in low-temperature-pinch industrial processes. **Energy**, v. 35, n. 5, p. 1867–1873, 2010.

United Nations Environment Programme (2023). Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). Nairobi.

<https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>. BRIAM, R.; WALKER, M. E.; MASANET, E. A comparison of product-based energy intensity metrics for cheese and whey processing. **JOURNAL OF FOOD ENGINEERING**, v. 151, p. 25–33, 2015.

EUROSTAT. Energy statistics - an overview. **Statistics Explained**, n. May, p. 1–21, 2019.

FOOD DRINK EUROPE. EU Food and Drink Industry: Data and Trends - 2023 Edition. p. 31, 2023.

GARCÍA-BURGOS, M. et al. New perspectives in fermented dairy products and their health relevance. **Journal of Functional Foods**, v. 72, n. May, p. 104059, 2020.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Environmental life cycle assessment of a dairy product: The yoghurt. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 4, p. 796–811, 2013.

GUIGNON, B.; REY-SANTOS, I.; SANZ, P. D. Determination, analysis and prediction of the volumetric behavior of milk at high pressure. **Food**

**Research International**, v. 64, p. 336–347, 2014.

HU, J. et al. Determination of specific heat of milk at different fat content between 1 °C and 59 °C using micro DSC. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 3, p. 395–399, 2009.

HUSNAIN, S. N. et al. Energy and Exergy Based Thermal Analysis of a Solar Assisted Yogurt Processing Unit. v. 10, n. June, p. 1–15, 2022.

JOKANDAN, M. J.; AGHBASHLO, M.; MOHTASEBI, S. S. Comprehensive exergy analysis of an industrial-scale yogurt production plant. **Energy**, v. 93, p. 1832–1851, 2015.

KAILASAPATHY, K. Chemical Composition, Physical, and Functional Properties of Milk and Milk Ingredients DEFINITION OF MILK AND SAFE PROCESSING OF MILK AT THE FARM MILK AS A FOOD. **Dairy Processing and Quality Assurance**, p. 77–105, 2016.

LADHA-SABUR, A. et al. Mapping energy consumption in food manufacturing. **Trends in Food Science and Technology**, v. 86, n. June 2017, p. 270–280, 2019.

MELINI, F. et al. Raw and heat-treated milk: From public health risks to nutritional quality. **Beverages**, v. 3, n. 4, p. 1–33, 2017.

RALSTON, R. A. et al. A systematic review and meta-analysis of elevated blood pressure and consumption of dairy foods. **Journal of Human Hypertension**, v. 26, n. 1, p. 3–13, 2012.

RAMÍREZ, C. A.; PATEL, M.; BLOK, K. From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry. **Energy**, v. 31, n. 12, p. 1984–2004, 2006.

SCHWINGSHACKL, L. et al. Food groups and risk of hypertension: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. **Advances in Nutrition**, v. 8, n. 6, p. 793–803, 2017.

TIGABE, S.; BEKELE, A.; PANDEY, V. Performance Analysis of the Milk Pasteurization Process Using a Flat Plate Solar Collector. v. 2022, 2022.

TWEET, H. Final energy consumption in industry - detailed statistics the industry sector by energy product , EU ,. n. May, p. 1–6, 2024.

ÜÇTUĞ, F. G. The Environmental Life Cycle Assessment of Dairy Products. **Food Engineering Reviews**, v. 11, n. 2, p. 104–121, 2019.

VASILAKI, V. et al. Water and carbon footprint of selected dairy products: A case study in Catalonia. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 504–516, 2016.

XU, T.; FLAPPER, J. Energy use and implications for efficiency strategies in global fluid-milk processing industry. **Energy Policy**, v. 37, n. 12, p. 5334–5341, 2009.



**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# TEXTILE SCIENCE AND ENGINEERING





## **SUSTAINABILITY AND CIRCULARITY: EMERGING RECYCLING TECHNOLOGIES**

**Barata, Teresa Raquel (1); Santiago, Ana (2); Bicho, Marta (3); Pereira, Madalena (4); Ferreira, Sandra (5); Belino, Nuno (6); Miguel, Rui (7)**

(1) Fiber Materials and Environmental Technologies (Fibentech-Ubi), Universidade da Beira Interior, R. Marquês de D'ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal, E-mail: [traquel@ubi.pt](mailto:traquel@ubi.pt)

(2) Fiber Materials and Environmental Technologies (Fibentech-Ubi), Universidade da Beira Interior, R. Marquês de D'ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal, E-mail: [ana.santiago@ubi.pt](mailto:ana.santiago@ubi.pt)

(3) Fiber Materials and Environmental Technologies (Fibentech-Ubi), Universidade da Beira Interior, R. Marquês de D'ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal, E-mail: [marta.bicho.fernandes@ubi.pt](mailto:marta.bicho.fernandes@ubi.pt)

(4) Fiber Materials And Environmental Technologies (Fibentech-Ubi), Universidade Da Beira Interior, R. Marquês De D'ávila E Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal and Unidcom - IADE/UE, Lisbon, Portugal, E-mail: [madalena.pereira@ubi.pt](mailto:madalena.pereira@ubi.pt)

(5) Fiber Materials and Environmental Technologies (Fibentech-Ubi), Universidade da Beira Interior, R. Marquês de D'ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal, E-mail: [sandra.ferreira@ubi.pt](mailto:sandra.ferreira@ubi.pt)

(6) Fiber Materials and Environmental Technologies (Fibentech-Ubi), Universidade da Beira Interior, R. Marquês de D'ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal, E-mail: [belino@ubi.pt](mailto:belino@ubi.pt)

(7) Fiber Materials and Environmental Technologies (Fibentech-Ubi), Universidade da Beira Interior, R. Marquês de D'ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal and CIAUD-University of Lisbon, Lisbon, Portugal, E-mail: [rmiguel@ubi.pt](mailto:rmiguel@ubi.pt)

### **ABSTRACT**

*In the current context, addressing pre- and post-consumer waste in the textile and fashion industry has become urgent for companies, municipalities, and the global community. Reflecting on the product life cycle and considering recycling as an immediate solution to enhance material circularity is essential for achieving the objectives outlined in the European Green Deal and the Sustainable Development Goals (SDGs).*

*Emerging recycling technologies are fundamental to enhancing sustainability, enabling efficient waste management, and conserving natural resources. Constraints in this area include the applicability of the technology to multi-material products, associated costs, the industrial-scale reproduction of various pilot technologies, and legislation aligned with these developments.*

*This paper will explore the state-of-the-art technologies used for pre- and post-consumer waste in the textile and fashion industry through mechanical recycling, chemical recycling, and bio-recycling, via a literature review.*

*Advanced recycling is not merely a solution for waste but an essential step towards a more sustainable and balanced future. Transforming to a circular system in the textile and fashion industry will not only help mitigate environmental impacts but also promote a more sustainable, circular, and balanced future.*

**Keywords:** Sustainability, Circularity, Recycling, Textile Waste

## 1 INTRODUCTION

In today's world, discussing textiles also involves addressing textile waste management and the importance of proper collection and treatment. Within the textile and apparel sector (EURATEX, 2022; European Commission, 2022), the European Union generates approximately 7.5 million tons of textile waste annually. Of this, roughly 2.5 million tons are collected, with only about 1 million tons being available for recycling. Given the anticipated changes in regulatory frameworks, along with increased environmental awareness and responsibility among consumers, it is projected that post-consumer collection rates will rise significantly from January 1, 2025 (Ambiente, 2017; European Union, 2018; European Union, 2019; European Union, 2022; European Union, 2024a; European Union, 2024b). This will lead to a greater availability of raw materials for recycling. Therefore, it is crucial to identify and apply the most effective recycling technologies, tailored to the type and nature of textile products, with a focus on sustainability and circularity. In this context, researchers should promote trends and innovations aligned with the evolution of technologies, legal requirements, and best practices of leading entities (Juanga-Labayen et al., 2022; Sobuj et al., 2024; Gueye, 2021).

The European Chemicals Strategy for Sustainability (European Commission, 2020), published in 2020, provides a long-term vision for chemicals policy in the European Union. It includes initiatives to support the transition toward climate neutrality and a toxic-free environment, enhancing protection for citizens and the environment from harmful chemicals. Central to this strategy, Safe-and-Sustainable-by-Design (SSbD) emphasizes early intervention in the supply chain to ensure that chemicals, materials, and products are designed to fit into circular economy models (Apel et al., 2024). The SSbD framework aims to support the design and development of safe and sustainable chemicals and materials through research and innovation (Caldeira et al., 2022). Concerning toxic-free material cycles and clean recycling, the European Commission considers that a clean circular economy is crucial for increasing the production and use of secondary raw materials, and that to "ensure that "Recycled in the EU" becomes a benchmark worldwide, it is necessary to ensure that substances of concern in products and recycled materials are minimised. As a principle, the same limit value for hazardous substances should apply for virgin and recycled material." (European Commission, 2020). The development of sustainable technologies is essential, and chemical recycling could play a role if it delivers a positive environmental and climate impact from a full life cycle perspective (European Commission, 2020).

Given the relevance of the topic in the current context, this work aims to:

- Analyze the number of publications, by type of article, including peer-reviewed articles and conference papers, on textile waste, mechanical recycling, chemical recycling and bio recycling since 2019 on Web of Science and Scopus;

- Briefly identify whether the number of articles is keeping pace with the growing (national and EU) waste legislation;
- In terms of recycling (mechanical, chemical or biological), which has the highest number of publications.

## **2 METHODOLOGY**

This article aims to reflect on the analysis of indexed articles available in the SCOPUS and Web of Science Core Collection databases, covering the period from 2019 to the present. These platforms were chosen due to their prominence in academic publishing, including in the field of engineering (Chadegani et al., 2013; Singh et al., 2021; Mongeon & Paul-Hus, 2016).

The bibliographic review technique, often used as a research methodology, is systematized into various stages such as the selection, analysis, and interpretation of scientific articles published within a specific time frame (Ocaña-Fernández & Fuster-Guillén, 2021). This methodology involves planning the review, conducting the review, and analyzing the results (Mongeon & Paul-Hus, 2016).

The search strategy was developed from the available literature on these platforms, using keywords exclusively in English. The search was conducted between August and September 2024. The search strategy in the database was executed within the title, abstract, and keywords fields for "article," "review article," and "proceeding paper."

The decision to include only articles was made due to their peer-review status and easier access to full text compared to other types of scientific communication. A time perimeter from 2019 to the present was established.

## **3 TEXTILE RECYCLING**

### **3.1 Concepts of Textile Recycling**

The impact of consumption on society has led to the permanent creation of needs and ambitions, leading to the production of billions of garments per year worldwide and the need to launch clothing collections on a constant basis. This all means that the life cycle of products is ephemeral, both from the perspective of market trends and consumers (Chen et al., 2021; Khar & Dhaka, 2021).

With statistics becoming available to the public more than ever, companies in the textile and clothing industry began to understand that the increase seen in the amount of textile waste is due to an inefficient and unsustainable production system (Salcedo, 2014).

The planet's natural resources are limited by their ability to renew themselves and it is necessary to take this factor into account when

developing new products. Through this, it is necessary to consider textile recycling strategies (Fletcher & Grose, 2012).

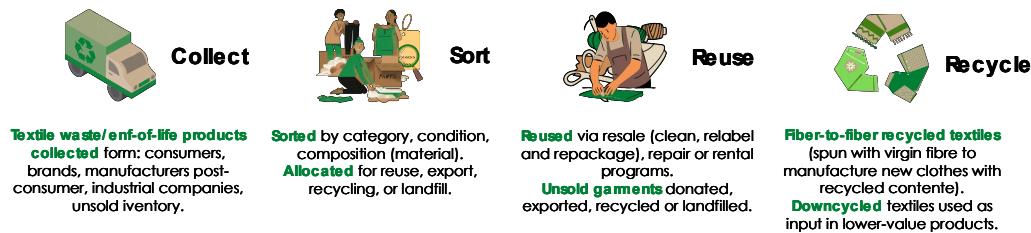
Textile waste represents a high volumetric quantity, which translates into a significant environmental impact. Around 10% of the European Union's environmental impacts are caused by the textile and clothing industry (Cuc et al., 2015; Hawley, 2011).

Textile waste is classified as pre-consumer waste and post-consumer waste. Pre-consumer waste refers to waste that never reaches the consumer and comes directly from factories during the different production processes. Post-consumer waste is generated normally by the consumer, products that have already been used and are disposed of by them (Ali et al., 2021).

The circular economy or circularity involves the reuse, refurbishing, repair, remanufacturing, recycling, or redesign of existing materials and products. Textile recycling is a process that aims to reuse and repurpose textile materials, helping to reduce waste and consequently protect the environment, by conserving natural resources and reducing the carbon footprint (Payne, 2015).

In Figure 1 we can observe a representative scheme of the process that textile waste/end-of-life product goes through until it is recycled.

**Figure 1 – Textile Waste/End-of-life products: process until recycling**



**Source:** Adapted from Khandelwal et al. (2023)

The main challenge in textile waste recycling lies in the variable composition of fibers, dyes, and chemicals, which limits recycling to low-value products. Blended fibers, such as polyester/cotton, are commonly used in the textile industry, making recycling more difficult. One potential solution is the production of monomaterial fabrics (Kikutani et al., 2024).

In most cases, both pre-consumer and post-consumer textile waste contains dyes, complicating separation and recycling efforts. Thus, recycling colored textiles will require new standards for dyes and pigments, with future textile dye selection focusing on compatibility with recycling processes rather than solely on cost-effectiveness (Manian et al., 2024). Efforts have also been made to create new products from textile waste without removing dyes. Esteve-Turrillas and de la Guardia (2017) reported the production of cotton yarns using a mix of colored textile waste, primarily pre-consumer waste, with minimal post-consumer incorporation. They concluded that with the adoption of recovery

technology, which selects recycled materials with compatible colors, it is possible to produce a wide range of colored cotton yarns without dyeing. This method offers environmental benefits by reducing the impacts of cotton cultivation and dyeing, thanks to the use of well-characterized recycled materials (Esteve-Turrillas & de la Guardia, 2017).

Closed-loop supply chain management minimizes textile material waste and facilitates the recovery of post-consumer garments by integrating recovery processes with supply chain activities such as sourcing, manufacturing, assembly, and distribution (Paras & Pal, 2024). The recovery or reuse of returned products depends on their condition, which may involve direct reuse, repair, refurbishing, remanufacturing, salvaging usable parts from non-repairable items, or recycling.

Regenerative manufacturing, SSbD, and digitalization are crucial factors in driving the full transformation of the textile value chain (Paul & Gries, 2024). Regenerative manufacturing represents an innovative approach to clothing production that aligns with circular economy principles. Unlike the traditional linear model, where end-of-life garments are disposed of, the circular economy aims to minimize waste by keeping resources in circulation as long as possible. To achieve this, textiles and clothes must be designed with circular principles from the beginning, incorporating recyclable materials and ensuring durability and versatility to last multiple life cycles. For large-scale success, reverse logistics are essential, enabling companies to collect used clothing for repair, reuse, or recycling.

Slow fashion has emerged as an effective way to enhance sustainability in the fashion industry, offering an alternative to the dominant fast fashion (Centobelli et al., 2022). It emphasizes quality over quantity and encourages slowing down both production and purchasing habits. Slow fashion items are bought with long-term use in mind, allowing consumers to form a connection with the products. As a viable alternative to fast fashion, slow fashion reduces the environmental impact across the value chain (Centobelli et al., 2022). The slow fashion business model is rooted in principles of circularity, low consumption, fair trade, and the sharing economy. It led to waste reduction through promotion of reuse and recycling. Extending the life of textiles is one of the most effective strategies in slow fashion to significantly reduce the environmental and climate impact of garments (European Commission, 2022).

Advances in technology are boosting textile recycling, with the development of new methods and processes to improve recycling efficiency and quality. These concepts highlight the importance of textile recycling not only for industry, but also for the environment and society (Harmsen et al., 2021).

In the textile recycling process, there are two commonly used methods: mechanical and chemical. In mechanical recycling, fabrics are shredded and transformed into fibers that can be reused in the fabrication of new products, such as insulation, upholstery or new fabrics. Chemical recycling is carried out through the chemical decomposition of textile fibers,

enabling the recovery of polymers that can be used in the production of new fibers (Leonas, 2017; Senthil Kumar & Yaashikaa, 2018). More recently, there have been emerging approaches to bio-recycling textiles to provide better solutions to the environmental impact of the textile and clothing industry (Neto et al., 2022).

### **3.2 MECHANICAL RECYCLING**

Mechanical textile recycling is a process that allows textile fibers to be recovered from textile waste, such as used clothes, shreds or other discarded textile materials. This process is fundamental to reducing waste, minimizing the environmental impacts of the textile and clothing industry and promoting a more sustainable product life cycle. (Ali et al., 2021; Ribul et al., 2021).

The mechanical recycling process involves several processes: material collection; sorting by condition, material composition; cleaning through trim removal and washing to remove some odors or stains; splitting by components and cutting in smaller parts; shredding, fiber classification based on their qualities and types; reuse and manufacturing through blending with virgin fibers and production of new products (Dissanayake et al., 2021; Textile Exchange, 2021).

Mechanical recycling has advantages such as lower energy and water consumption, and disadvantages such as reduced fiber length, which limits closed-loop applications (Lanz et al., 2024).

Despite developments achieved until today, there are still challenges, such as the demand for more advanced technologies to improve the efficiency of the process and the importance of consumer consciousness about recycling and responsible consumption.

### **3.3 CHEMICAL RECYCLING**

Textiles chemical recycling is a process that transforms textile materials, usually made from synthetic fibers or fiber blends, into their original chemical structures. This enables these materials to be reused to create new textile fibers, closing the life cycle of fabrics and reducing the need to produce new raw materials (Lanz et al., 2024). Unlike mechanical recycling, which generally involves shredding and reprocessing fabrics to create new fibers, chemical recycling can deal with a larger variety of materials and compounds, including more complex mixtures that make them difficult to recycle mechanically, however, the chemical process is more expensive (Andini et al., 2024; Dissanayake et al., 2021).

Chemical recycling involves several processes: the collection and sorting of textile waste by composition and condition/quality; trimming and separation, which reduces the size of the material to be recycled and removes any trims; chemical decomposition, where textiles are chemically treated using various processes such as hydrolysis, pyrolysis, and oxidation, depending on the type of fiber; purification, to eliminate contaminants; and polymerization, which is used to create new materials

(Andini et al., 2024; Baloyi et al., 2024; Binczarski et al., 2024; Sales Brugnoli da Cunha et al., 2022).

Chemical recycling complements the textile and clothing industry by offering higher value-added solutions for textile waste. Technological advances and research in this area will continue to be crucial for improving these processes, making them more efficient and cost-effective (Damayanti et al., 2021).

### 3.4 BIO-RECYCLING

Textile bio-recycling is an innovative process that transforms textile waste into new raw materials using biological, chemical, or physical processes to minimize the environmental impact of the fashion industry and promote a more sustainable production cycle (Jain et al., 2023). Subramanian et al. (2020) argues that "Emerging textile bio-recycling approaches can address the environmental challenges associated with the end-of-life of clothing."

However, there is a gap in the literature on this topic. Most of the available information focuses on recycling through biological processes that use microorganisms (fungi and bacteria) in controlled environments.

### 3.5 KEYWORD ANALYSIS OF REFERENCES

Table 1 presents the number of indexed publications (Web of Science and Scopus) related to this topic since 2019 until now.

**Table 1 – Number of Indexed Publications about the article subject**

Number of Indexed Publications/ Year		Web of Science Core Collection						Scopus					
Topic (Abstract title, Abstract, Keywords)	Document type	2019	2020	2021	2022	2023	Sept. 13, 2024	2019	2020	2021	2022	2023	Sept. 13, 2024
Textile Waste	Article	158	191	218	197	206	150	84	66	136	144	178	154
	Review	13	19	36	25	27	34	4	7	13	25	21	34
	Conference paper	17	15	5	4	5	2	31	19	24	17	29	19
Mechanical Recycling AND Textile	Article	0	2	2	8	3	8	0	4	2	9	8	12
	Review	0	0	1	3	3	3	0	0	1	3	3	3
	Conference paper	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0
Chemical Recycling AND Textile	Article	2	7	5	12	8	15	6	7	7	12	17	15
	Review	0	1	1	2	6	2	0	3	2	3	6	3
	Conference paper	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
Bio-Recycling AND Textile	Article	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
	Review	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Conference paper	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Source: The authors (2024)

There is a noticeable difference in the number of publications between the two platforms. The term 'Textile Waste,' being broader in scope, includes more entries, highlighting the importance and relevance of the topic.

#### **4 CONCLUSIONS OR FINAL CONSIDERATIONS**

The analysis on "Textile Waste" highlights several trends and gaps in research and development within this field. Key points from the findings are as follows:

A comparison of research outputs from 2019-2021 (WOS: 567; Scopus: 286) with those from 2022-September 2024 (WOS: 553; Scopus: 476) shows a notable rise in articles related to "Textile Waste" in both the WOS and Scopus databases (Table 1). This increase likely reflects growing interest and urgency in textile waste management, driven by stricter regulations and increased environmental awareness.

**Chemical Recycling:** Research on chemical recycling has seen greater dissemination compared to mechanical recycling, indicating a shift toward more advanced and potentially more effective methods for managing textile waste (WOS 2019-Sep 2024: 62; Scopus 2019-Sep 2024: 82).

**Mechanical Recycling:** Despite being a well-established approach, mechanical recycling has received less attention in publications, which may suggest research saturation or less innovation in this area (WOS 2019-Sep 2024: 35; Scopus 2019-Sep 2024: 48).

**Bio-recycling:** The scarcity of studies on textile bio-recycling points to a significant research gap (WOS 2019-Sep 2024: 4; Scopus 2019-Sep 2024: 3). Although bio-recycling holds promise, the lack of research may reflect technical challenges or a lower priority on the research agenda.

The large number of articles compared to reviews and conference papers in "Textile Waste" research suggests that the academic community is focusing more on new results and discoveries than on summarizing existing knowledge. This indicates an active phase of innovation and exploration in the field.

Regulatory initiatives, such as the European Green Deal (2019) and the EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles (2022), have clearly influenced research and development in sustainability within the textile sector. The upcoming End-of-Waste Criteria, which will take effect in 2024, represents a major advancement in textile waste management and may be a key driver of the increased research activity in this area.

The growth in the number of publications and the focus on new recycling techniques reflect a positive response to regulatory pressures and the rising demand for sustainable solutions in the textile sector. However, the lack of research on textile bio-recycling suggests a promising area for future exploration and innovation. As regulations continue to evolve and



environmental awareness increases, these factors will likely shape future trends and priorities in textile waste research.

In our view, one of the most promising sustainable technologies for recycling textile waste is bio-recycling, which uses enzymes and microbes to break down synthetic fibers into their basic building blocks for reuse. This process is highly efficient and environmentally friendly, unlike traditional mechanical recycling. As a result, a significant increase in research into sustainable technologies, including bio-recycling and chemical recycling, is expected in response to regulatory and consumer pressures.

The future points to widespread adoption of circular models, eco-friendly materials, and advanced sorting techniques, driving the textile industry towards a more sustainable, zero-waste approach.

### ACKNOWLEDGMENTS

The authors are very grateful for the support granted by the Research Unit of Fiber Materials and Environmental Technologies (FibEnTech-UBI), through the Project reference UIDB/00195/2020, funded by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP/MCTES through national funds (PIDDAC), and DOI: 10.54499/UIDB/00195/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00195/2020>).

### REFERENCES

- Ali, A. H. M., Elfaky, E. F., Mohammed, S. A., Haroon, H. E., Eshag, I. A., & Hassan, E. (2021). Textile recycling- A review. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 6(3), 69–74. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2021.6.3.0015>
- Ambiente. (2017). "Decreto-Lei n.º 152-D/2017" Diário da República n.º 236/2017, 2º Suplemento, Série I de 2017-12-11, pp. 88 – 135. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/152-d-2017-114337042>
- Andini, E., Bhalode, P., Gantert, E., Sadula, S., & Vlachos, D. G. (2024). Chemical recycling of mixed textile waste. *Science Advances*, 10(27), 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1126/sciadv.ado6827>
- Apel, C., Kümmerer, K., Sudheshwar, A., Nowack, B., Som, C., Colin, C., Walter, L., . . . Soeteman-Hernández, L. G. (2023). Safe-and-sustainable-by-design: State of the art approaches and lessons learned from value chain perspectives. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 45, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100876>
- Binczarski, M. J., Zuberek, J. Z., Cieciora-Wloch, W., Borowski, S., Cieslak, M., Baranowska-Korczyk, A., Witczak, E., & Witonska, I. A. (2024). Textile waste subjected to acid hydrolysis as raw materials for biogas production. *Renewable Energy*, 227(120428), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120428>

Baloyi, R. B., Gbadeyan, O. J., Sithole, B., & Chuniilall, V. (2024). Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review. *Textile Research Journal*, 94(3–4), 508–529. <https://doi.org/10.1177/00405175231210239>

Caldeira, C., Farcal, R., Garmendia Aguirre, I., Mancini, L., Tosches, D., Amelio, A., Rasmussen, K., Rauscher, H., Riego Sintes, J. and Sala, S. (2022). Safe and sustainable by design chemicals and materials - Framework for the definition of criteria and evaluation procedure for chemicals and materials, EUR 31100 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2760/487955, JRC128591.

Centobelli, P., Abbate, S., Nadeem, S. P., & Garza-Reyes, J. A. (2022). Slowing the fast fashion industry: An all-round perspective. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38, 100684. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100684>

Chadegani, A. A., Salehi, H., Yunus, M. M., Farhadi, H., Fooladi, M., Farhadi, M., & Ebrahim, N. A. (2013). A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases. *Asian Social Science*, 9(5). <https://doi.org/10.5539/ass.v9n5p18>

Chen, X., Memon, H. A., Wang, Y., Marriam, I., & Tebyetekerwa, M. (2021). Circular Economy and Sustainability of the Clothing and Textile Industry. *Materials Circular Economy*, 3(12), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00026-2>

Cuc, S., Gîrneatǎ, A., Iordănescu, M., & Irinel, M. (2015). Environmental and socioeconomic sustainability through textile recycling. *Industria Textilă*, 66(3), 156–163.

Damayanti, D., Wulandari, L. A., Bagaskoro, A., Rianjanu, A., & Wu, H. S. (2021). Possibility routes for textile recycling technology. *Polymers*, 13(3834), 1–32. <https://doi.org/10.3390/polym13213834>

Dissanayake, D. G. K., & Weerasinghe, D. U. (2021). Fabric Waste Recycling: a Systematic Review of Methods, Applications, and Challenges. *Materials Circular Economy*, 3(24), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00042-2>

Esteve-Turrillas, F., & De La Guardia, M. (2016). Environmental impact of Recover cotton in textile industry. *Resources Conservation and Recycling*, 116, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.034>

EURATEX. (2022). Facts & Key Figures 2022 of the European Textile and Clothing Industry. EURATEX, Economic and Statistics, Brussels. [https://euratex.eu/wp-content/uploads/EURATEX\\_FactsKey\\_Figures\\_2022rev-1.pdf](https://euratex.eu/wp-content/uploads/EURATEX_FactsKey_Figures_2022rev-1.pdf)

European Commission. (2020). Chemicals strategy for sustainability, towards a toxic-free environment. EC COM (2020), Brussels. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:f815479a-0f01-11eb-bc07-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:f815479a-0f01-11eb-bc07-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF)

European Commission. (2022). EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles. COM(2022), Brussels. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9d2e47d1-b0f3-11ec-83e1-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9d2e47d1-b0f3-11ec-83e1-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF)

European Union. (2018). The Council Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council amending Directive 2008/98/EC on waste. Official Journal of the European Union L 150, 14 June 2018, pp. 109-140. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur178599.pdf>

European Union. (2019). Commission Implementing Decision (EU) 2019/1004 of 7 June 2019 laying down rules for the calculation, verification and reporting of data on waste in accordance with Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Decision C (2012) 2384. Official Journal of the European Union L 163, 20 June 2019, pp. 66-100. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019D1004>

European Union. (2024a). REGULATION (EU) 2024/1781 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC. Official Journal of the European Union, L series, 28 June 2024. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401781](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401781)

European Union. (2024b). DIRECTIVE (EU) 2024/1799 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 on common rules promoting the repair of goods and amending Regulation (EU) 2017/2394 and Directives (EU) 2019/771 and (EU) 2020/1828. Official Journal of the European Union, L series, 10 July 2024. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401799](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401799)

Gueye, S. (2021, June 22). Circular Economy in the Fashion Industry. Ellen MacArthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-trends-and-trailblazers-creating-a-circular-economy-for-fashion>

Harmsen, P., Scheffer, M., & Bos, H. (2021). Textiles for circular fashion: The logic behind recycling options. *Sustainability*, 13(9714), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su13179714>

Hawley, J. M. (2011). Textile Recycling Options: Exploring What Could Be. In A. Gwilt & T. Rissanen (Eds.), *Shaping Sustainable Fashion: changing the way we make and use clothes* (pp. 143–156). Earthscan.

Jain, R., Mundkar, S., & Athalye, A. (2023). Latest Trends in Textile and Fashion Designing Future of Recycling Textile Waste. *Trends in Textile & Fashion Design*, 5(5), 964–969. <https://doi.org/10.32474/LTTFD.2023.05.000223>

- Juanga-Labayen, J. P., Labayen, I. v., & Yuan, Q. (2022). A Review on Textile Recycling Practices and Challenges. *Textiles*, 2, 174–188. <https://doi.org/10.3390/textiles2010010>
- Khandelwal, B., Bhatia, K., Rubel, H., Dalmia, A., Sharma, S., Meyer zum Felde, A., Sidhu A. (2023). *Fashion Industry/Circular Strategies for a Garment's End-of-Life Moment*. Obtained in September 2024 from Boston Consulting Group (BCG): <https://www.bcg.com/publications/2023/end-of-life-recycling-in-the-fashion-industry>.
- Khar, S. S., & Dhaka, A. (2021). Textile Recycling: Of shared responsibility. *Material Recycling*, Oct-Nov, 52–54.
- Kikutani, T., Schriever, S., Lee, S. (2024). Innovations in man-made and synthetic fibres. In, R. Paul & T. Gries (Eds.), *Sustainable Innovations in the Textile Industry* (53-77). The Textile Institute Book Series, Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90392-9.00021-5>
- Lanz, I. E., Laborda, E., Chaine, C., & Bleuca, M. (2024). A Mapping of Textile Waste Recycling Technologies in Europe and Spain. *Textiles*, 4, 359–390. <https://doi.org/10.3390/textiles4030022>
- Leonas, K. K. (2017). The Use of Recycled Fibers in Fashion and Home Products. In S. S. Muthu (Ed.), *Textiles and Clothing Sustainability: Recycled and Upcycled Textiles and Fashion* (pp. 55–77). Springer.
- Manian, A. P., Bechtold, T., & Pham, T. (2024). Dyeing, printing and digital colouration. In, R. Paul & T. Gries (Eds.), *Sustainable Innovations in the Textile Industry* (345-376). The Textile Institute Book Series, Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90392-9.00009-4>
- Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2015). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>
- Neto, G. C. de O., Teixeira, M. M., Souza, G. L. V., Arns, V. D., Tucci, H. N. P., & Amorim, M. (2022). Assessment of the Eco-Efficiency of the Circular Economy in the Recovery of Cellulose from the Shredding of Textile Waste. *Polymers*, 14(1317), 1–15. <https://doi.org/10.3390/polym14071317>
- Ocaña-Fernández, Y., & Fuster-Guillén, D. (2021). The bibliographical review as a research methodology. *Revista Tempos E Espaços Em Educação*, 14(33), e15614. <https://doi.org/10.20952/revtee.v14i33.15614>
- Paras, M. K., & Pal, R. (2024). Sustainable supply chain and logistics of fashion business. In, R. Paul & T. Gries (Eds.), *Sustainable Innovations in the Textile Industry* (457–474). The Textile Institute Book Series, Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90392-9.00007-0>
- Paul, R., & Gries, T. (2024). Sustainable innovations in textiles. In, R. Paul & T. Gries (Eds.), *Sustainable Innovations in the Textile Industry* (1–9). The Textile Institute Book Series, Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90392-9.00013-6>

- Payne, A. (2015). Open-and closed-loop recycling of textile and apparel products. In S. S. Muthu (Ed.), *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing* (103–123). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100169-1.00006-X>
- Ribul, M., Lanot, A., Tommencioni Pisapia, C., Purnell, P., McQueen-Mason, S. J., & Baurley, S. (2021). Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, 326(129325), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>
- Salcedo, E. (2014). *Moda ética para um futuro sustentável*. Editorial Gustavo Gil - GG moda.
- Sales Brugnoli da Cunha, G. C., Fonseca, F. S., Teixeira, J. A., & Oliveira, L. R. A. de. (2022). Utilização da Pirólise como Tratamento dos Resíduos Têxteis de Fibras Natural e Artificial Resultante do Corte na Indústria de Confecção. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*, 15(2), 757–772. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79506>
- Sanjrani, M. A., Gang, X., & Mirza, S. N. A. (2024). A review on textile solid waste management: Disposal and recycling. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy*. <https://doi.org/10.1177/0734242x241257093>
- Senthil Kumar, P., & Yaashikaa, P. R. (2018). Recycled Fibres. In S. S. Muthu (Ed.), *Sustainable Innovations in Recycled Textiles* (pp. 1–17). Springer.
- Singh, V. K., Singh, P., Karmakar, M., Leta, J., & Mayr, P. (2021). The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis. *Scientometrics*, 126(6), 5113–5142. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03948-5>
- Sobuj, N. M., Nishat, R., Alam, N. M. A., Ahmed, N. M. S., Jannat, N. N., & Akter, M. (2024). Willingness of Buyers to Buy Wearable Rejected Clothes from Clothing Manufacturers: Model for Fostering Sustainable Apparel Business. *Tekstilec*, 1–11. <https://doi.org/10.14502/tekstilec.67.2024045>
- Subramanian, K., Chopra, S. S., Cakin, E., Li, X., & Lin, C. S. K. (2020). Environmental life cycle assessment of textile bio-recycling – valorizing cotton-polyester textile waste to pet fiber and glucose syrup. *Resources, Conservation and Recycling*, 161(104989), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104989>
- Textile Exchange. (2021). *Textile Exchange Guide to Recycled Inputs*. <https://textileexchange.org/app/uploads/2021/09/GRS-202-V1.0-Textile-Exchange-Guide-to-Recycled-Inputs.pdf>



## AMAZONIAN BIO-COLOURATION OF SUSTAINABLE SHOES AND SPORTS CLOTHING

PAUL, ROSHAN(1); LANGER, JANNIS(1); WIPPERFUERTH, JULIANE(1); DIDÓ, CEZAR(2); MELHADO, ALEXANDRE (3)

(1) INSTITUTE FOR TEXTILE TECHNOLOGY OF RWTH AACHEN UNIVERSITY, GERMANY, E-MAIL: [ROSHAN.PAUL@ITA.RWTH-AACHEN.DE](mailto:ROSHAN.PAUL@ITA.RWTH-AACHEN.DE)

(2) UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL, E-MAIL: [CEZARDIDO@GMAIL.COM](mailto:CEZARDIDO@GMAIL.COM)

(3) BEPLAST INDUSTRIA E COMERCIO DE PLASTICOS LTDA, BRAZIL, E-MAIL: [ALEXANDRE.M@BEPLAST.COM.BR](mailto:ALEXANDRE.M@BEPLAST.COM.BR)

### ABSTRACT

*The main objective of BioPolyCol project is to develop sustainable bio-dyes with good colour intensity and high fastness for industrial colouration of biopolymers. Currently, the market is dominated by synthetic dyes that can dye polymers with very good fastness, but they release large quantities of difficult-to-treat effluents. In this context, BioPolyCol aims to apply the untapped potential of bio-dyes from the Amazon region, which are derived from renewable plant resources, secondary crops and food industry residues. The plant sources are identified, bio-dyes are extracted and the encapsulated dye powders are produced. Spin-dyed PLA filaments are produced, and white knitted fabrics are dyed using eco-friendly techniques. The results are expected to contribute significantly to the biotransformation of the textile industry.*

**Keywords:** Bio-dyes, Biopolymers, Colouration, Shoes, Sports clothing, Textile Industry, Sustainability

### 1 INTRODUCTION

Textile sector belongs to the world's largest economic sectors (Retail Forum for Sustainability, 2013). Producing textiles is highly energy-, water- and chemical-intensive. Consequently, the textile industry has a strong impact on environment and is regarded as the second largest polluter of clean water (Brigden, et al., 2012). The European textile industry has taken significant steps in developing sustainable manufacturing processes and materials (Euratex, 2015). However, a large quantity of harmful and toxic chemicals is still used in the synthetic fibre and dye manufacture, and the

coloured effluents from dyeing with synthetic colourants remains a serious environmental concern (Staroivoitova and Odido, 2014).

Sustainability is becoming one of the main business drivers of the sector, powered by enlightened consumers. Colourants are the most important additives of the textile fibres since the buying decision of a fabric is strongly affected by its visual appearance (Demirbilek and Sener, 2003). Textile market accounts for more than half of the world dye and pigment market, which consists almost entirely of synthetic colourants (Zaharia and Suteu, 2012). The limited range of natural colourants often fails in the desired colour intensity and light stability and are not provided at the affordable cost (Vankar, 2016).

Nowadays, there is an increasing search and demand for renewable and sustainable resources and this includes natural dyes. Some types of natural dyes are already known and others yet to be discovered (Belino, et al. 2023; Silva, et al, 2010). In this work, an attempt is being made to utilise the Amazon bio-dyes for the colouration of biopolymers and to develop sustainable shoes and sports clothing

## **2 RESEARCH WORK AND DISCUSSION**

### **2.1 Dye extraction and ensapsulation**

Different Amazonian bio-dye plants are identified and the colourants are extracted as in Figure – 1. Further, dye in powder form is developed. In order to dope dye the biopolymers, the dye should be thermal resistant and so they are encapsulated by silica sol-gel process. However, the dye was not fully stable at extrusion temperature.

So, it was thought to encapsulate the dye (Açaí) in different polymers. The polymers evaluated were green ethylene vinyl acetate (EVA) polymer, at processing temperatures between 120 °C and 220 °C, green low-density polyethylene (LDPE) at a temperature of 190 °C, polyvinyl chloride (PVC) at a temperature of 180 °C and polylactic acid (PLA) at a temperature of 220 °C. The materials are being evaluated against these various parameters, and their thermal resistance and weathering behaviour is also being assessed. Figure 2 shows the flowchart of different polymer materials containing Açaí dye. It was found that PLA was the best as it withstands up to 220°C.

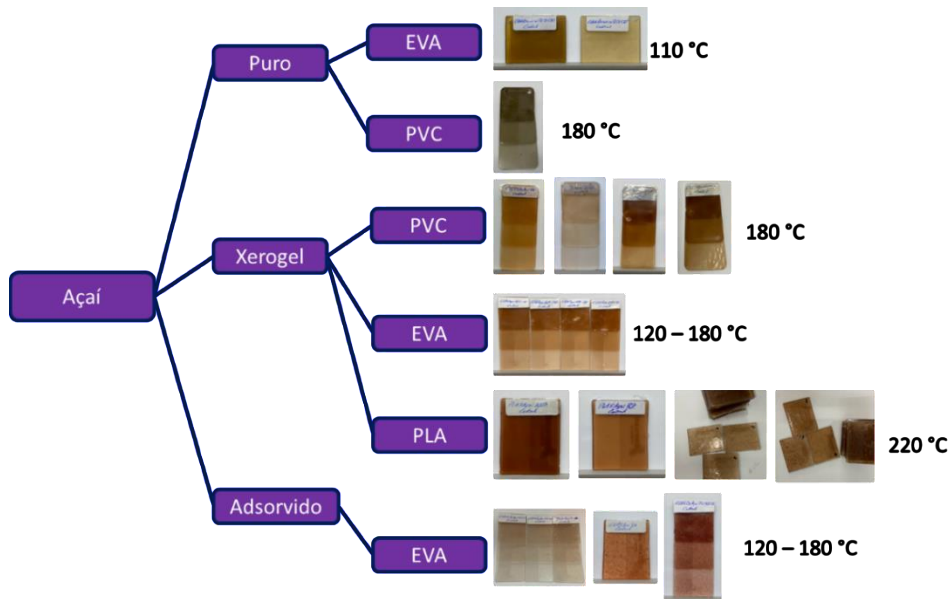
**FIGURE – 1 Dye extraction from amazonian fruits**



**Figure – 2 Flowchart of different polymers containing Açai dye**

## 2.2 Development of monofilaments

The dye from açai berries is tested in compounding and monofilament trials. The powder in Figure - 3 is the dried dye (left) and the dye encapsulated using the silica sol-gel process and thus stabilised (right).



## 2.3 Development of monofilaments

The dye from açai berries is tested in compounding and monofilament trials. The powder in Figure - 3 is the dried dye (left) and the dye encapsulated using the silica sol-gel process and thus stabilised (right).

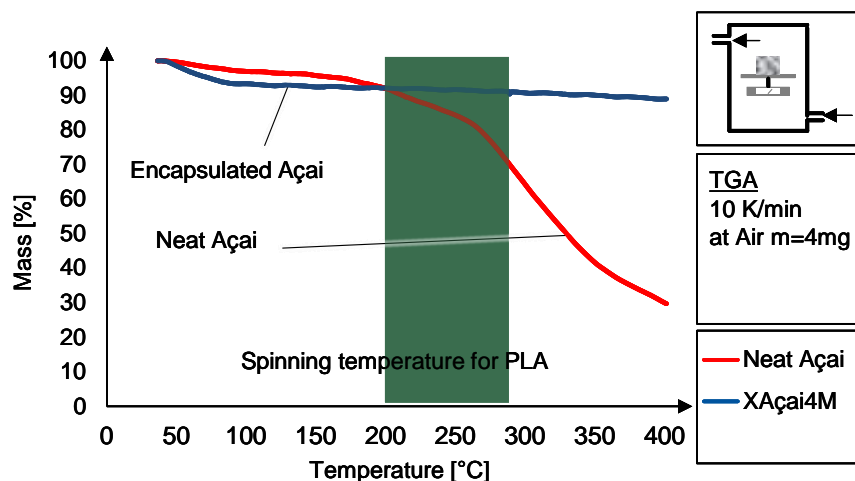


**Figure 3 – Colourant from açai berries. Dried dye (left) and stabilised dye (right).**



As part of the evaluation of the dye for compounding and spinning processes, a thermogravimetric analysis (TGA) was carried out to investigate the thermal behaviour of the material. This analysis made it possible to document the decrease in mass of the dye during heating. The results, shown in Figure – 4 shows the decrease in mass as a function of temperature. The temperature range relevant for the processing of polylactide (PLA) was emphasised. It was found that the mass loss up to about 120°C is mainly due to residual moisture, indicating that the dye exhibits stable behaviour within the PLA processing range.

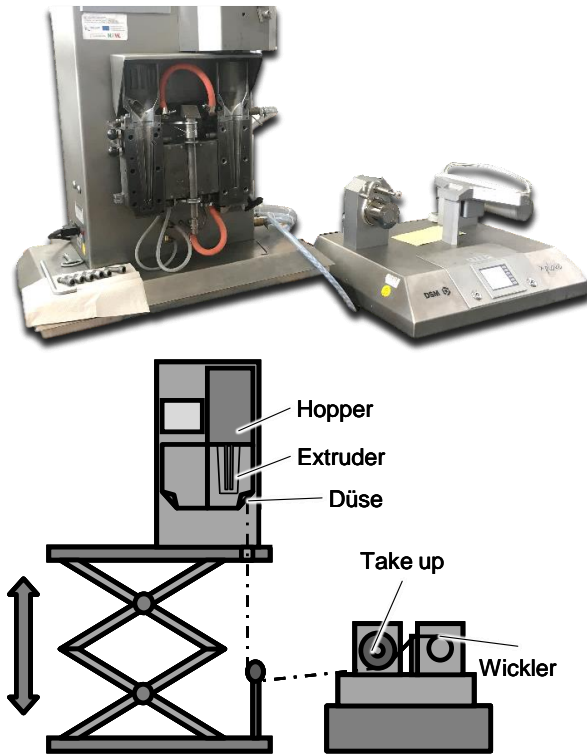
**Figure – 4 TGA results of stabilised and non-stabilised dye from açai berries**



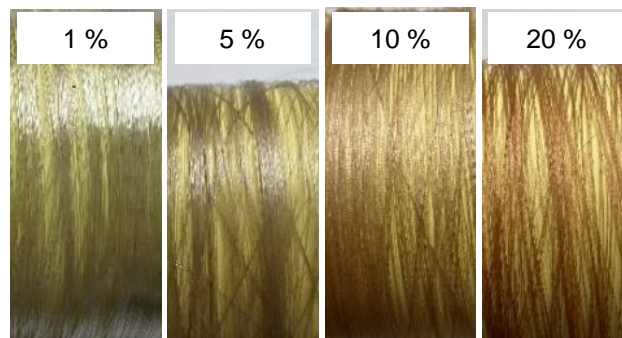
The use of a microextruder (Figure – 5) for initial compounding trials is an important step in material development. This enables the determination of the optimum concentration of additives required for further experiments with a twin-screw extruder and for spinning processes. Such

preliminary tests are crucial to optimise the parameters necessary for the production of high-quality polymer compounds. The microextruder was used to identify a required concentration of colourant.

**Figure 5 - Microextruder for determining the colour concentration**



**Figure 6 - Filaments from the microextruder with different dye contents**

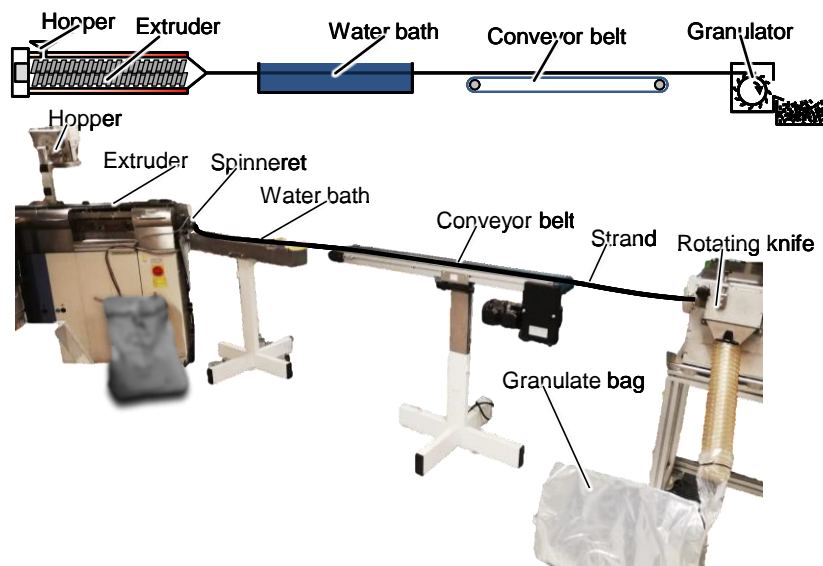


The extruder enables compounding in small quantities, ideal for testing different concentrations. With the ability to process as little as 10 grams of a polymer-dye mixture, different concentrations could be tested even when the dye was in short supply. Closing the nozzle creates an internal circuit that ensures intensive mixing. This is particularly useful to ensure the homogeneity of the end product. Figure – 6 shows the filaments with different colour concentrations.

The observed filaments are characterised by a predominant brownish colour, with only a slight presence of the reddish hue of the açai berries.

Given the limited amount of stabilised dye and the noticeable significant colour change when using a dye concentration of 1%, a compound consisting of PLA and a 1% dye was developed. Compounding was carried out using a twin-screw extruder (Figure - 7).

**Figure – 7 Twin-screw extruder for compounding the PLA colourant blend**



**Figure 8 - Compound made from PLA with colourant (left) and pure PLA granules (right)**



A total of 3.3 kg of the developed compound was produced for the spinning tests. Figure – 6 shows compound made from PLA with the colour. Further, the first monofilaments were extruded from the compound. The filament first solidifies in a water bath before being passed through several duos. An oven between the duos enables the filament to be stretched at a temperature above the glass transition temperature. A subsequently applied spin finish improves the processability of the filament. Optionally,

cold drawing between the duos is possible before the finished yarn is finally wound.

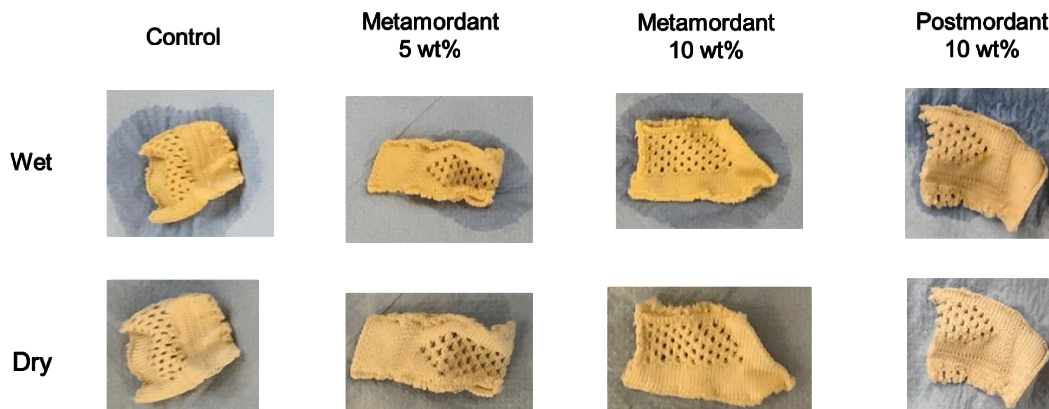
## 2.4 Buriti Dyeing trials

Buriti dye was selected for the dyeing of knitted PLA fabric. The dyeing was carried out in a Mathis Labomat machine at 60 °C for 45 min. Tannic acid, a natural mordant was used for the metamordanting and postmordanting processes. Figure - 9 shows pre-washed (CHT detergent) PLA fabrics and Buriti dye solution. The dyed samples are shown in Figure - 10. Initial results shows that 10% metamordanting process was the best one.

**Figure – 9 Pre-washed PLA fabrics and Buriti dye solution**

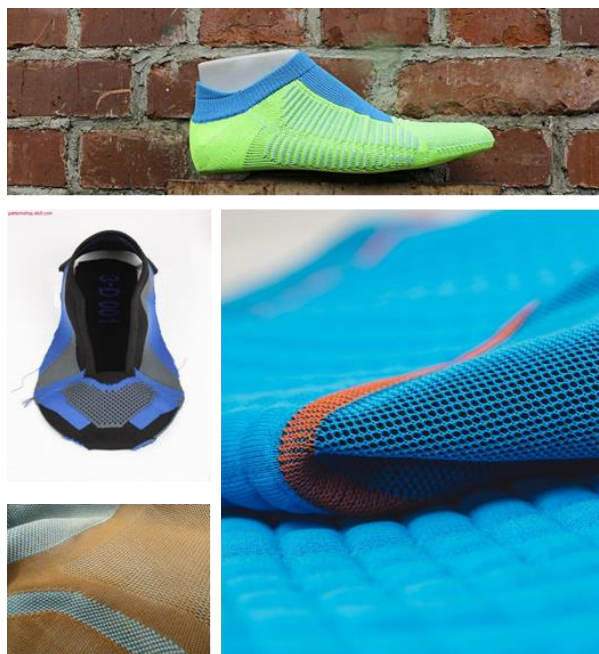


**Figure 10 – PLA dyeing - dyeing procedure: 60 °C, 45 min, mordant: Tannic acid**



The research work is still going on and the Figure - 11 shows the planned final products from BioPolyCol project, such as Amazonian coloured sustainable sports shoes and clothing.

**Figure 11 – Planned final products**



### **3 CONCLUSIONS**

Amazonian bio-dyes from renewable resources with improved colour intensity and thermal stability are used for the colouration of PLA biopolymer. The coloured biopolymer will be used for the development of sports shoes and clothing for niche markets in Germany, EU and Brazil.

### **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors acknowledge with thanks the funding received from the Federal Ministry of Education and Research, and Projektträger Jülich (PtJ) Germany and Finep, MCTI and FNDCT, Brazil for supporting the BioPolyCol project in the "Bioeconomy International 2021" funding program. The support extended by CHT R. Beilich GmbH, Germany by supplying several textile auxiliary chemicals is also acknowledged.

### **REFERENCES**

Belino N., Rodilla J. and Paul R. 2023. Chapter in Other Industries Section: Biodyes: A Sustainable Approach for Textile Dyeing in Natural Secondary Metabolites: From Nature, Through Science, to Industry, Edited by

Carocho M, Heleno S.A. and Barros L., Published by Springer, Germany. ISBN: 9783031185861, pages 893-922.

Brigden K., Labunska, I., Johnston, P., Santillo, D., (2012), Organic Chemical and Heavy Metal Contaminants from Communal Wastewater Treatment Plants with Links to Textile Manufacturing.

Demirbilek O. and B. Sener (2003), Product Design, Semantics and Emotional Response, *Ergonomics*, 46, pp 1346–1360.

Euratex (2015) Taking action for the Future of European Textile & Clothing, [www.euratex.eu/fileadmin/user\\_upload/images/do\\_not.../Euralex\\_brochure\\_2015.pdf](http://www.euratex.eu/fileadmin/user_upload/images/do_not.../Euralex_brochure_2015.pdf)

Retail Forum for Sustainability (2013) Sustainability of textiles; [www.ec.europa.eu/environment/industry/retail/pdf/issue\\_paper\\_textiles.pdf](http://www.ec.europa.eu/environment/industry/retail/pdf/issue_paper_textiles.pdf)

Silva, G.J., Constant, P.B., Figueiredo, R.W., & Moura, S.M. (2010). Formulação e Estabilidade de Corantes de Antocianinas Extraídas das Cascas de Jabuticaba (*Myrciaria ssp.*). *Alim.Nutr.* v.21, n.3, 429-436.

Staroivoitova, D., Odido, D., (2014) Assessment of toxicity of textile dyes and chemicals via MSDS; *Research and Reviews in Biosciences*; 9 (7), pp 241-248.

Vankar, P.S.; (2016) Handbook on Natural Dyes for Industrial Applications, 2nd ed, NPCS Publication Services, India.

Zaharia, C.; Suteu, (2012) D Textile Organic Dyes –Characteristics, Polluting Effects and Separation/Elimination Procedures from Industrial Effluents – A Critical Overview; *Organic Pollutants*.

Brigden K., Labunska, I., Johnston, P., Santillo, D., (2012), Organic Chemical and Heavy Metal Contaminants from Communal Wastewater Treatment Plants with Links to Textile Manufacturing.

Demirbilek O. and B. Sener (2003), Product Design, Semantics and Emotional Response, *Ergonomics*, 46, pp 1346–1360.

Euratex (2015) Taking action for the Future of European Textile & Clothing, [www.euratex.eu/fileadmin/user\\_upload/images/do\\_not.../Euralex\\_brochure\\_2015.pdf](http://www.euratex.eu/fileadmin/user_upload/images/do_not.../Euralex_brochure_2015.pdf)

Retail Forum for Sustainability (2013) Sustainability of textiles; [www.ec.europa.eu/environment/industry/retail/pdf/issue\\_paper\\_textiles.pdf](http://www.ec.europa.eu/environment/industry/retail/pdf/issue_paper_textiles.pdf)

Silva, G.J., Constant, P.B., Figueiredo, R.W., & Moura, S.M. (2010). Formulação e Estabilidade de Corantes de Antocianinas Extraídas das Cascas de Jabuticaba (*Myrciaria ssp.*). *Alim.Nutr.* v.21, n.3, 429-436.

Staroivoitova, D., Odido, D., (2014) Assessment of toxicity of textile dyes and chemicals via MSDS; *Research and Reviews in Biosciences*; 9 (7), pp 241-248.

Vankar, P.S.; (2016) *Handbook on Natural Dyes for Industrial Applications*, 2nd ed, NPCS Publication Services, India.

Zaharia, C.; Suteu, (2012) *D Textile Organic Dyes –Characteristics, Polluting Effects and Separation/Elimination Procedures from Industrial Effluents – A Critical Overview; Organic Pollutants.*



**ICEUBI**  
International  
Congress  
on Engineering  
**2024**

Sustainability and  
Resilience  
Innovation and  
Solutions



**27, 28 e 29 nov**  
Universidade da Beira Interior



# SPECIAL SESSIONS





## **DEVELOPMENT OF NEW PLASMA ACTUATORS BASED ON FLEXIBLE MATERIALS ELECTROSTATICALLY ACTIVATED FOR FLOW CONTROL AND ICE MITIGATION**

MBANGUINE, LEONARDO (1); RODRIGUES, FREDERICO (2); PÁSCOA, JOSÉ (3)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [leonardo.mbanguine@ubi.pt](mailto:leonardo.mbanguine@ubi.pt)

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: [fmfr@ubi.pt](mailto:fmfr@ubi.pt)

(3) Universidade da Beira Interior, E-mail: [pascoa@ubi.pt](mailto:pascoa@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [leonardo.mbanguine@ubi.pt](mailto:leonardo.mbanguine@ubi.pt)

### **ABSTRACT**

*The current investigation aims to present a study about a new type of plasma actuator based on flexible materials that may be electrostatically activated. This novel class of plasma actuators will have a particular interest in applications related to simultaneous ice mitigation and flow control. To demonstrate the feasibility of this new concept, during this work plasma actuators were built using electroactive polymers “EAPs” as a dielectric layer and conductive grease as flexible electrodes. As a comparison base case, conventional plasma actuators based on Kapton with rigid electrodes tape were also fabricated and tested since these are the most common materials used in the literature. The initial tests focused on the characterization of the fabricated plasma actuators' electrical parameters including the analysis of the average power consumption, maximum and minimum charges, and capacitance. In addition, tests were conducted to study the behavior of the flow induced by the different actuators. The obtained results demonstrate that the plasma actuators based on electroactive polymers allow to effectively produce a plasma discharge which, in turn, accelerates the adjacent air and, simultaneously, increases the temperature of the plasma region preventing the ice accumulation.*

**Keywords:** Plasma actuators; Electroactive polymers; Dielectric elastomer.

### **RESUMO**

*O presente trabalho de investigação tem como objetivo apresentar um estudo sobre um novo tipo de atuador a plasma baseado em materiais flexíveis que podem ser ativados eletrostaticamente. Esta nova classe de atuadores a plasma terá particular interesse para aplicações relacionadas com realização simultânea de mitigação de gelo e*

controlo de escoamento. De modo a demonstrar a viabilidade deste novo conceito, durante este trabalho foram construídos atuadores a plasma utilizando polímeros eletroativos "EAPs" como camada dielétrica e graxa condutora como eletrodos flexíveis. Como caso base de comparação, foram ainda construídos e testados atuadores a plasma convencionais a partir de Kapton e fita de cobre uma vez que são estes os materiais mais utilizados na literatura. Os testes iniciais focaram na caracterização dos parâmetros elétricos dos atuadores a plasma desenvolvidos incluindo a análise de potência média consumida, cargas elétricas máxima e mínima, e capacidade. Para além disso, foram realizados testes de estudo do comportamento do escoamento induzido pelos diferentes atuadores. Os resultados obtidos demonstram que os atuadores baseados em polímeros eletroativos permitem gerar eficazmente uma descarga de plasma que, por sua vez, permite acelerar o ar adjacente e, em simultâneo, aumentar a temperatura na região do plasma, prevenindo a acumulação de gelo.

**Palavras-chave:** Atuadores a plasma; Polímeros eletroativos; Elastômero dielétrico.

## 1 INTRODUCTION

*In recent years, there has been a great interest and advance in research on plasma actuators, allowing the study and investigation of their ability for flow control and ice mitigation. Dielectric barrier discharge "DBD" plasma actuators are simple electronic devices that do not require an external part for operation. These devices are known for their several applications inside aeronautics and wind power fields (GUOQIANG et al., 2019). Currently, these devices have been a major target of studies considering their use for simultaneous flow control and ice mitigation, aiming to investigate different construction materials (ABDOLLAHZADEH et al., 2022).*

*The construction of these devices is very simple and inexpensive, they are very lightweight and have the ability to manipulate airflow fields. The configuration consists of two electrodes separated by a dielectric layer, where the electrodes are asymmetrical, and one of the electrodes is exposed and the other is covered. Normally the electrodes are based on copper and the dielectric layer is based on Kapton. Several authors have carried out their studies based on these materials.*

*In the literature, the first experiments were conducted in 1857 by Siemens (BENARD; MOREAU, 2014), where the main objective of the study was to use DBD's for ozone generation from air or oxygen. Since then, various studies have been carried out for the same purpose of ozone generation. Later on, Liu & Roth started to study DBD's for active flow control (CORKE; ENLOE; WILKINSON, 2010) disclosing a new type of application for these devices. During the DBD plasma actuators operation, the DBD plasma actuators create a plasma discharge that pulls the adjacent air toward the surface and accelerates its downstream. In*

general, DBD plasma actuators can induce a body force on gas and heat up that gas (ABDOLLAHZADEH; PASCOA; OLIVEIRA, 2016).

Some authors such as Shcherbakov et al. (SHCHERBAKOV et al., 2000), Roth (PLASMAS; 2003, [s.d.]) and Corke et al. (CORKE; MERTZ; PATEL, 2006) studied the boundary layer control over an airfoil by implementing the DBD plasma actuators in different models. Besides the ability of flow control, DBD plasma actuators are known for their ability for heat generation. The first study about DBD plasma actuators' thermal effects characterization was conducted by Jousot et al (JOUSSOT et al., 2010), who carried out experimental analyses to verify the thermal changes using infrared thermography. Dong et al (DONG et al., 2008) measured the influence of frequency and applied voltage of the discharge on the dissipated power, and they evaluated the plasma temperatures by spectroscopy emission measurements of N<sub>2</sub> molecular bands. Rodrigues et al (RODRIGUES; PASCOA; TRANCOSSI, 2018) carried out several studies on the thermal characterization of DBD plasma actuators. They demonstrated that the plasma allows to produce significant thermal effects which can be used for dicing purposes

Ice formation is a usual problem found in aircraft and wind turbines (ROY et al., 1998). Usually, the aircraft that fly over regions of low temperatures and regions containing clouds overloaded with supercooled water droplets have a high potential for ice formation and accumulation on the surfaces. This accumulation negatively affects the performance of the aircraft since the ice accretion on the aerodynamic surfaces causes disturbances in the flow and degrades the aerodynamic performance by increasing the drag. This results in the reduction of the aircraft lift coefficient which compromises the safety of the flight. On the other hand, high-altitude regions are usually favourable for wind energy generation since they are associated with high wind speeds and high air density due to low temperatures. The combination of these conditions results in 10% more available wind energy than in other regions, however, the low temperatures favour the formation and accumulation of ice in the turbine blades, reducing their performance and lifetime.

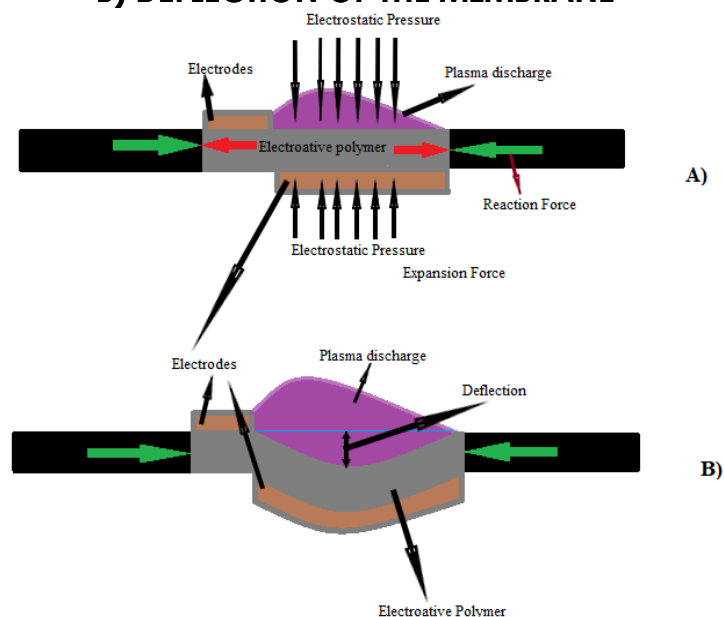
To reduce the negative effects of ice formation and accumulation, various techniques for ice protection have been proposed. These techniques are usually subcategorized into two groups known as passive and active techniques (RODRIGUES; ABDOLLAHZADEH, 2021). The active techniques rely on external systems and external energy for the operation, while passive techniques do not rely on external energy and only involve anti-frost coating systems and biochemical anti-freeze injection systems on the surfaces (GAO et al., 2019). This problem of ice formation and accumulation also motivated several researchers to study and improve different techniques for ice detection (SKRIMPAS et al., 2016). Abdollahzadeh et al (ABDOLLAHZADEH; RODRIGUES; PASCOA, 2020) conducted numerical and experimental studies for the characterization of the DBD plasma actuators in the presence of ice for ice detection purposes. They also conducted studies focusing on the optimization of the

DBD plasma actuators for ice-sensing (ABDOLLAHZADEH et al., 2022). They tested different DBD plasma actuators by changing the main geometrical dimensions and the dielectric material. The present work aims to optimize the DBD plasma actuators for simultaneous flow control and ice mitigation, bringing a new concept based on using an electrically activated material. The optimization consists of taking advantage of the electroactive polymers (EAPs) excitation. These materials have the capability of reacting to the electric field and they can deform their shape when they are activated. They are considered a subclass of smart materials that can convert electrical energy to mechanical energy (GONZALEZ; GARCIA; NEWELL, 2019).

Electroactive polymers have the ability to enlarge the surface area in response when an electric field is applied (BAR-COHEN; CALTECH, 2001), which leads to compression of its thickness and a lateral expansion of the material. During the process of compression of its thickness, these materials may buckle, bend or elongate. Dearing et al (DEARING; MORRISON; IANNUCCI, 2010)(DEARING; MORRISON; IANNUCCI, 2010) showed the feasibility of electroactive polymers for flow control purposes. To apply the electric field normally the EAPs film is positioned between two electrodes on each side of it. When an electric field is applied it's possible to observe certain deformations in the material, which are the result of coulombic electrostatic forces and electrostriction. Normally the EAPs require high voltages between 1 to 10 kV for the activation and use currents below 2 milliamps, resulting in minimal electrical power consumption.

The current work aims to demonstrate the feasibility of using the EAPs operation combined with the plasma discharge, implementing the concept that is represented in Figure 1.

**Figure 1: SCHEMATIC REPRESENTATION OF THE CONCEPT OF DBD PLASMA ACTUATOR BASED ON ELECTROACTIVE POLYMER, A) ACTUATOR OPERATION, B) DEFLECTION OF THE MEMBRANE**



The represented concept consists of using a dielectric elastomer for the dielectric layer and flexible electrodes, in our case a carbon-based conductive grease was used. The process of plasma formation occurs when an AC high-voltage and high-frequency signal is applied to the exposed electrode. During the process the charges deposit in the upper surface of the elastomer, normally the charges travel from the exposed electrode to the elastomer surface, colliding between them, ionizing, and then generating the plasma discharge. The high electric field is responsible for the plasma generation and, with that, an ionic wind that pulls the air toward the elastomer surface and accelerates it downstream. The plasma discharger is a conductive medium, thus, the extended plasma discharge on the elastomer surface acts as an extension of the exposed electrode and works as the upper electrode that sandwiches the elastomer. The electric field generates electrostatic forces that attract the plasma discharge and the lower electrode, forcing the elastomer to compress, and resulting in the expansion of the surface area. Fixing the membrane periphery, the expansion of the elastomer area surface gets restricted, which leads to the accumulation of isotropic compressive stress until it reaches a critical buckling limit. Because of that, a deflection occurs out of the plane, which leads to the formation of a bump or depression depending on the directional bias from an external force structural asymmetry. In this way, the new EAP plasma actuator combines the aerodynamic plasma flow control and the dimple actuation in order to optimize the flow control and ice mitigation by taking advantage of the plasma heat with the movement of the electroactive polymer.

## **2 EXPERIMENTAL SETUP AND PROCEDURE**

To achieve the goal of demonstrating the credibility of the introduced concept, two types of plasma actuators were built for different dielectric barrier thicknesses. One of the plasma actuators was made from conventional materials, Kapton polyamide for the dielectric barrier and copper tape for the conductive electrodes. This actuator served as the base case because in the literature it has already been proven its feasibility. The other plasma actuator was made according to the illustrated concept, using elastomer for the dielectric barrier and flexible electrodes. The used elastomer is from the 3M company model "VHB 4910" which has electro-active characteristics, large elongation at break >600%, dielectric constant ~4.7 and high driving deformation > 100%. For the electrodes, it was necessary to choose a type of electrodes that does not restrict the deformation of the elastomer and consequently its movement. Considering this purpose, a conductive carbon grease model "Lubree" manufactured by "Manchester Nanomaterials Ltd" was selected. In the present work, four DBD plasma actuator models were analysed, consisting of two different dielectric thicknesses for each case (1mm and 2mm for each conventional DBD plasma actuator and EAP plasma actuator).

During the experimental part of this work, the plasma actuators were analysed in three different aspects:

- Electric parameters characterization.
- Flow velocity quantification.
- Flow visualization.

To perform the experimental analysis, it was necessary to use specific electronic instruments that allowed the operation of the plasma actuators and the measurement of the desired parameters. For the actuator's power supply, we used a high voltage and high-frequency power source, "PVM 500" capable of generating voltages up to 20 kV AC peak to peak with frequencies that vary between 20 kHz to 50 kHz and a low current of 10 mA, manufactured by Information Unlimited.

The characterization of the plasma actuators was done according to two known methods of characterization, the electric current method and the electric charge method. The electric method consists of measuring the voltage supplied to the plasma actuators and the voltage across a resistor that is placed in series with the plasma actuator. From the potential difference in the resistor terminals " $V_r$ " and applying the Ohm's law the resistor current can be obtained ( $I_r = V_r/R$ ). Since the actuator is connected in series with the resistor, then the actuator's current ( $I_a$ ) is equal to the resistor's current ( $I_r$ ) ( $I_a = I_r$ ). For this method, we used a resistor with a resistance of 100 Ohms.

The charge method consists of the measurement of the voltage across a capacitor in series with the plasma actuator and, with that, the instantaneous charge can be quantified. This method allows us to calculate the Lissajous curves. The instantaneous charge is calculated by:

$$Q = C \cdot V_c(t) \quad (1)$$

Where,  $Q$  = actuator charge;

$C$  = capacitance of the capacitor.

$V_c(t)$  = measured voltage across the capacitor.

For the capacitor, we used a ceramic capacitor with a capacitance of 10nF and a tolerance of 10%.

For the implementation of both methods, we used the "PicoScope" model "5443A" to ensure the reading and measurement of the electrical signals during the electrical characterization.

To quantify the flow velocity, all the plasma actuators were submitted to velocity measurements. For that, we used the Pitot tube technique which consisted of using a pitot tube with an inner diameter of 1.19 mm and external diameter of 3.18 mm. The measurement was made by varying the Pitot tube upwards by 0.5 mm for each measurement until it reached a height that was not possible to capture the induced flow. For accurate measurement of the height of the pitot tube, a digital pachymeter model "Peclise" coupled to the pitot tube measuring system was used. In

addition, we used the "Extech HD 350 model" differential pressure micromanometer to measure the static and stagnation pressure from the pitot tube, which automatically computed the airflow velocity and transmitted the data to the computer.

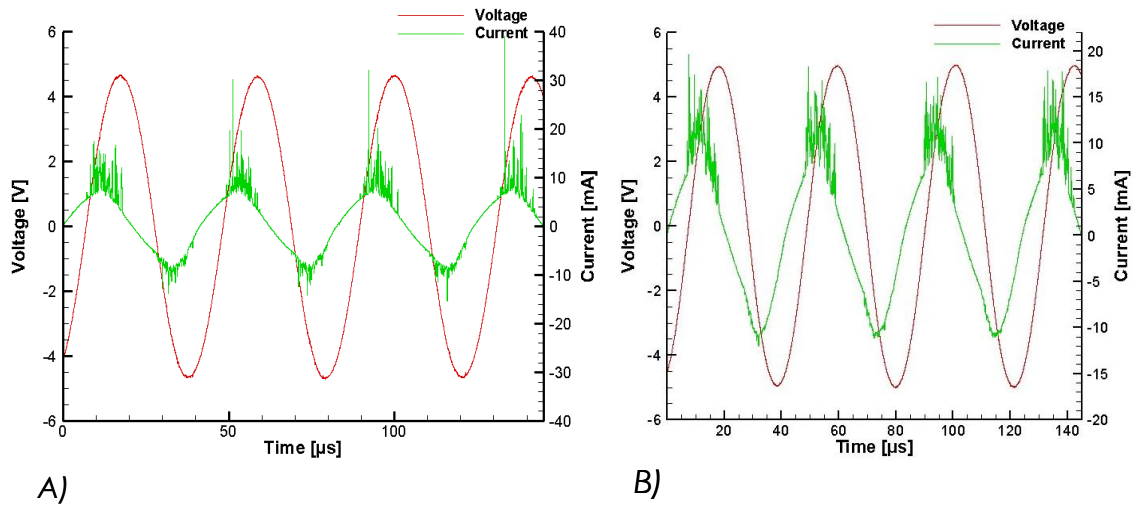
To complete the flow analyses, we performed flow visualizations by using a laser sheet and marker particles. Normally this technique is used on closed spaces with less lighting, ensuring a good capture of the images of the flow. The tests were carried out in an acrylic case that allowed the actuator to be mounted on. The laser used was the "model 1 L2S-SL-660-130-S-A-&o Steam line Laser System" to create the plane visualization where the marker particles are reflected. The laser is powered with a voltage of 5 V and 250 mA. To capture the images, a camera with a wide range and image capture at a short distance was used, model "CCD C10600-10B Orca-R2" with high resolution and high-speed capture. The communication between the camera and the computer was obtained through the "HClmage live software".

### **3 RESULTS AND DISCUSSION**

To verify the feasibility of the chosen materials to operate as EAP plasma actuator, two actuators were built using the dielectric elastomer and the carbon-based conductive grease, and their operation was compared with a conventional plasma actuator fabricated with Kapton and copper tape. These cases were analyzed for two different thicknesses of 1mm and 2mm each, to demonstrate their capacity to generate the plasma discharge and induce a plasma wall jet.

Initially, to analyze the plasma formation, the actuators were tested for different applied voltage levels. The range of these levels was defined accordingly with the dielectric barrier discharge thickness. The electrical signals of each plasma actuator were acquired, and their electrical analysis was performed. Examples of the applied voltage and current waveforms are shown in Figure 2 for 1mm thickness and 10 kVpp, and in Figure 3 for 2mm thickness and 16 kVpp, both figures for a frequency of 24kHz.

**Figure 2: VOLTAGE AND CURRENT WAVEFORMS FOR 1mm BARRIER DISCHARGE THICKNESS, FOR 10kVpp APPLIED VOLTAGE A) KAPTON WITH RIGID ELECTRODES, B) EAP WITH FLEXIBLE ELECTRODES**



The processing of the measured signals, allowed to obtain the voltage and current waveforms that provide insights about the operation of the plasma actuators. As it is known, when a high AC voltage is applied to a plasma actuator, it allows the formation of a plasma layer through the migration of the electrons from the exposed electrode to the dielectric barrier surface and reversing it. During this process of migration, they originate the plasma micro-discharges that consist of the collision of electrons during the migration. The micro-discharges are responsible for the changes in the plasma actuators' impedance that lead to multiple spikes formation in the current waveform, visible in Figures 2 and 3.

In the figure 2 its visible that on both plasma actuators occur the formation of multiple spikes on the current waveform, which means that similarly to the DBD plasma actuators based on Kapton with rigid electrodes, plasma actuators based on EAP with flexible electrodes also have the capability to form and sustain a plasma discharge. Comparing both plasma actuators for 1 mm thickness, the plasma actuator based on Kapton with rigid electrodes presents more evident spikes than the actuator based on the electro active polymer.

As we know the voltage-charge is directly related to the actuator power consumption, by increasing the barrier discharge thickness, the power consumption, and the charges increase as shown in table 1.

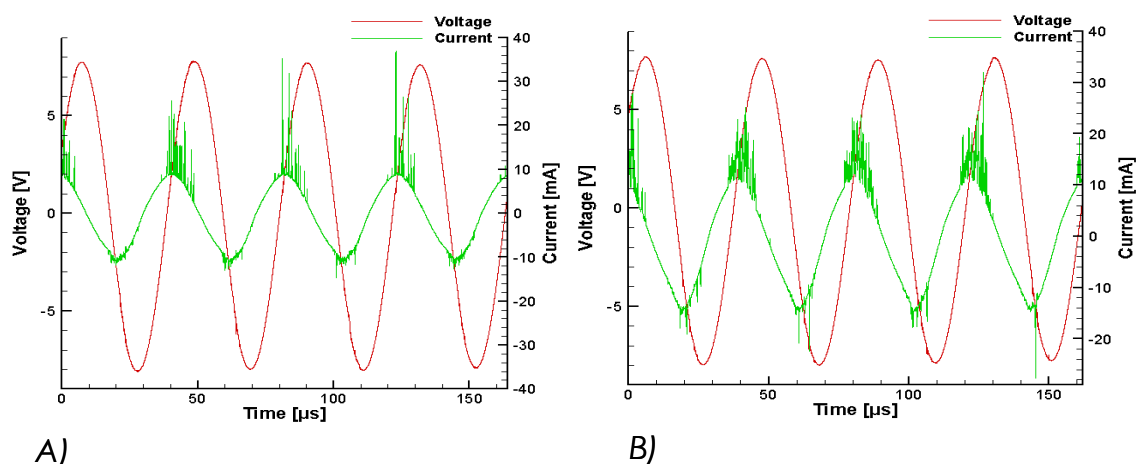


**Table 1: MAXIMUM “MAX” AND MINIMUM “MINI” CHARGES “C” OBTAINED FOR 1mm AND 2mm BARRIER DISCHARGE THICKNESS**

Voltage (kVpp)	1mm				2mm			
	Kapton with rigid electrodes		EAP with flexible electrodes		Kapton with rigid electrodes		EAP with flexible electrodes	
	Max C [nC]	Mini C [nC]	Max C [nC]	Mini C [nC]	Max C [nC]	Mini C [nC]	Max C [nC]	Mini C [nC]
3	13.332	-12.933	9.182	-8.926	6.392	-6.700	7.520	-7.395
4	16.932	-16.235	12.291	-11.772	8.442	-8.814	9.946	-9.769
5	21.019	-20.551	15.235	-15.194	10.717	-10.764	12.491	-12.242
6	25.747	-24.957	19.420	-19.931	12.666	-12.760	14.889	-14.583
7	30.352	-30.563	25.760	-25.531	14.441	-14.626	17.429	-16.851
8	36.645	-34.967	31.856	-32.561	16.610	-17.049	20.624	-19.987
9	39.611	-39.322	39.171	-39.034	19.872	-19.113	24.232	-23.228
10	43.192	-43.801	46.423	-46.822	25.114	-23.444	28.285	-27.279
11	-	-	-	-	27.080	-26.490	31.289	-30.329
12	-	-	-	-	29.392	-29.163	35.484	-34.795
13	-	-	-	-	31.051	-31.567	39.594	-38.524
14	-	-	-	-	33.573	-34.672	43.640	-42.078
15	-	-	-	-	38.418	-37.249	49.626	-48.542
16	-	-	-	-	41.040	-40.230	54.604	-54.683

With the increase of the barrier discharge thickness for 2 mm, as exposed in Figure 3, both tested plasma actuators allowed to sustain and form the plasma discharge when applied 16kVpp voltage and a frequency of 24kHz. The DBD plasma actuators based on EAP with flexible electrodes present the same behavior of showing fewer spikes than the conventional DBD plasma actuator. In addition, they present almost no spikes in the negative half of the AC cycle which indicates a weaker plasma discharge in that phase.

**Figure 3: VOLTAGE AND CURRENT WAVEFORMS FOR 2mm BARRIER DISCHARGE THICKNESS, FOR 16kVpp APPLIED VOLTAGE A) KAPTON WITH RIGID ELECTRODES, B) EAP WITH FLEXIBLE ELECTRODES**



During the DBD plasma actuators operation, they consume a certain amount of power depending on the materials used for their fabrication. For better clarification about the actuators' electrical characteristics, the

average power was quantified as can be seen in Figure 4, which shows a graphic comparing the DBD plasma actuators based on Kapton with rigid electrodes and EAP with flexible electrodes for 1mm and 2mm barrier discharge thickness.

**Figure 4: AVERAGE POWER CONSUMPTION OBTAINED FOR VARIOUS DBD PLASMA ACTUATORS. A) WITH 1mm BARRIER DISCHARGE THICKNESS AND B) WITH 2mm BARRIER DISCHARGE THICKNESS**

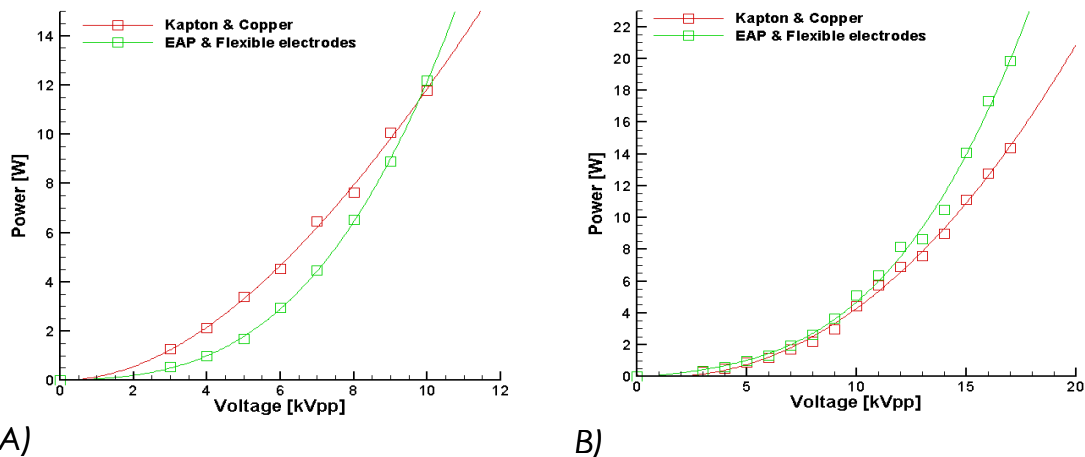


Figure 4, which refers to the DBD plasma actuators with plot A) 1mm and plot B) 2mm thickness, clearly shows that when a lower voltage level is applied, the differences on the power consumption between both DBD plasma actuators are lower, but its notable that when the voltage is increased the DBD plasma actuators based on EAP with flexible electrodes tends to have more power consumption than DBD plasma actuators based on Kapton and copper. For 1mm thickness DBD plasma actuators based on Kapton and copper tends to have more power consumption than DBD plasma actuators based on EAP with flexible electrodes for voltages under 10kVpp, but increasing the voltage from 10kVpp to higher voltages, the DBD plasma actuators based on EAP with flexible electrodes tends to increase the power consumption, consuming more than the other DBD plasma actuators for same applied voltage level's.

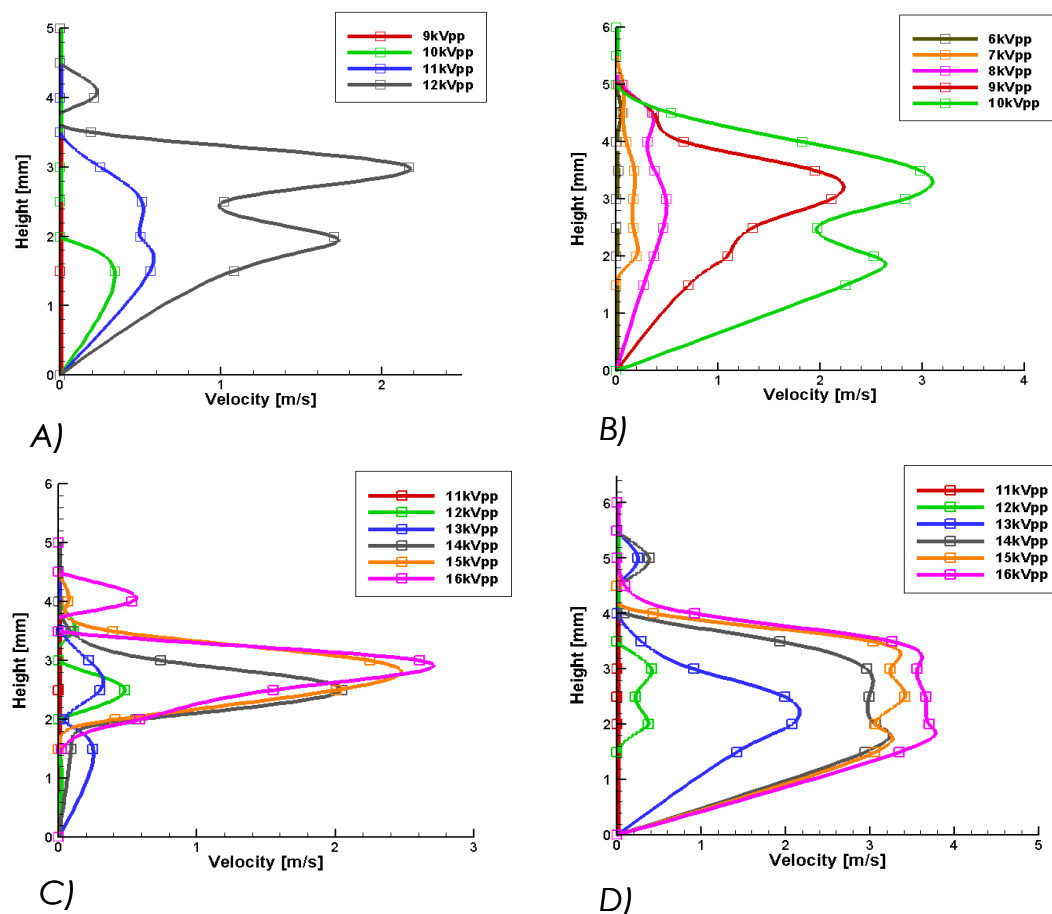
By increasing the barrier discharge thickness to 2mm, the DBD plasma actuators could be operated at higher applied voltages, leading to a better illustration of the difference between both DBD plasma actuators' power consumption. With the rise of the applied voltage levels, it becomes more visible that the plasma actuators based on EAP with flexible electrodes consume more power than the DBD plasma actuators based on Kapton with rigid electrodes when the same voltage is applied.

The analyzed results prove that DBD plasma actuators based on EAP with flexible electrodes are capable of effectively forming and sustaining a plasma discharge.

Having confirmed that EAP with flexible electrodes are materials with the capability of being used to manufacture DBD plasma actuators, the next

objective is to show their ability to induce an ionic wind. For that, a Pitot tube was used to measure the airflow velocity. Analyzing the airflow velocity results, shown in Figure 5, is possible to understand that DBD plasma actuators based on EAP with flexible electrodes need larger voltages to create the ionic wind than the conventional DBD plasma actuators. For the smaller barrier discharge thickness of 1mm was only possible to measure the plasma airflow for applied voltages above 9kV. Due to that, it was necessary to apply voltages up to 12kVpp on this actuator to reach an induced flow velocity of about 2 m/s. However, it is not advisable to exceed the 12kVpp applied voltage since it's close to the limit of the 1 mm thick EAP actuator. By increasing the applied voltage to both DBD plasma actuators, the velocity tends to increase. The maximum airflow velocity was measured at heights between 2.5 and 3.5 mm for the actuators based on EAP with flexible electrodes having reached almost 2.2m/s for 12kVpp and 24kHz. For the Kapton actuator with rigid electrodes, the maximum measured velocity was found at a similar height to the EAP actuator, which was between 3mm and 4mm. Nevertheless, the Kapton actuator reached a maximum velocity of almost 3.4m/s when for an applied voltage of 10kVpp and 24 kHz. Larger voltages were not tested to avoid disrupting the dielectric layer.

**Figure 5: AIRFLOW VELOCITY MEASURED BY PITOT TUBE, 1mm BARRIER THICKNESS FOR A) EAP WITH FLEXIBLE ELECTRODES AND B) KAPTON WITH RIGID ELECTRODES, 2mm BARRIER THICKNESS FOR C) EAP WITH FLEXIBLE ELECTRODES AND D) KAPTON WITH RIGID ELECTRODES**



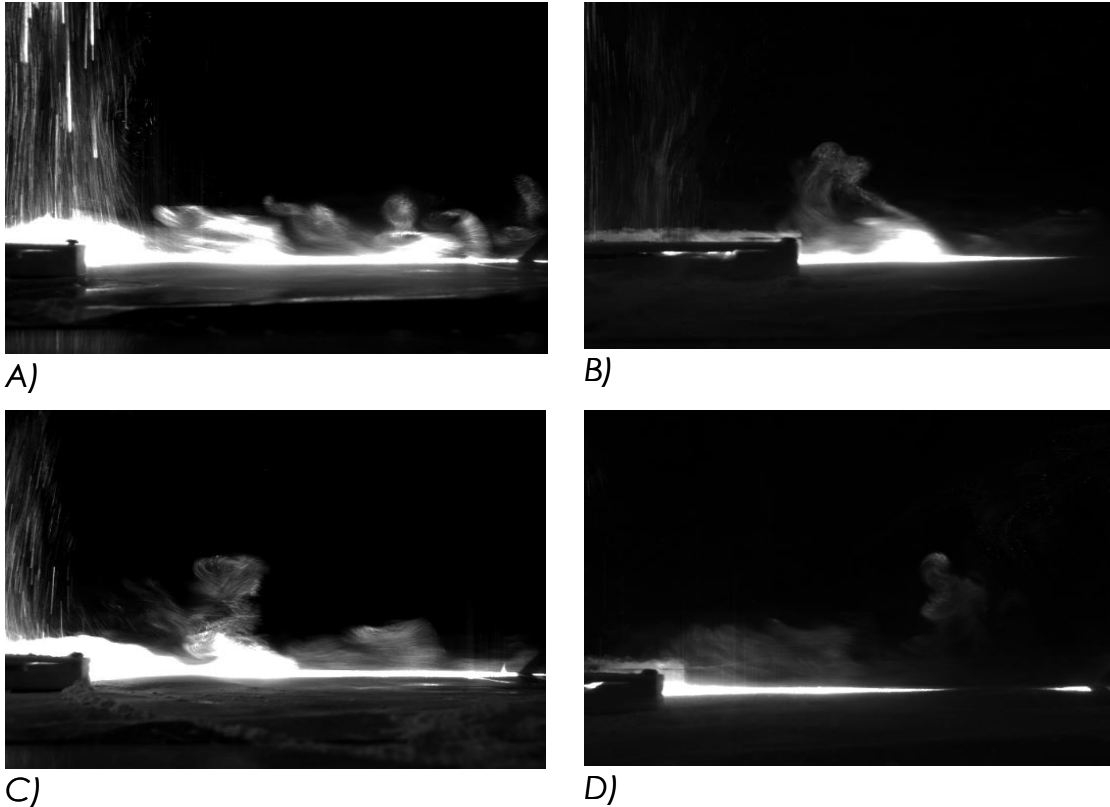
Increasing the dielectric thickness to 2mm, allowed to operate the actuators with higher voltage amplitudes (up to 16kVpp) for both DBD plasma actuators which, in turn, allowed the measurement of larger induced airflow velocities. Both DBD plasma actuators were tested with applied voltages between 11kVpp and 16kVpp and was possible to see that the actuator based on Kapton with rigid electrodes reached a higher airflow velocity of almost 4.8m/s, while the actuator based on EAP with flexible electrodes achieved an airflow velocity of around 2.8m/s.

Comparing both DBD plasma actuators, it's possible to see that the actuator based on EAP with flexible electrodes produces an airflow velocity profile with more fluctuations. This type of behavior relates to the illustrated concept presented in this work and occurs because the EAP actuator peripheric membrane is fixed, forcing the material to buckle and creating airflow oscillations.

Flow visualization measurements were performed using a laser and marker particles to see the orientation of the induced flow for both plasma actuators, as shown in Figure 6. The representative images of the airflow shown in Figure 6 a) and b) refer to both actuators with 1mm thickness and 10kVpp applied voltage, and Figure 6 c) and d) refer to both DBD plasma actuators with 2mm thickness and 16kVpp applied voltage.

The results confirm that EAP with flexible electrodes allows the creation of an induced wall jet and can be used for flow control purposes. However, since the applied power is also converted as a mechanical movement, the induced wall jet is weaker than the one produced by the conventional Kapton actuator. These results corroborate the Pitot tube velocity measurements.

**Figure 6: AIRFLOW VISUALIZATION USING THE LASER AND MARKER PARTICLES TECHNIQUE, 1mm BARRIER DISCHARGE THICKNESS FOR A) KAPTON WITH RIGID ELECTRODES AND B) EAP WITH FLEXIBLE ELECTRODES, 2mm BARRIER DISCHARGE THICKNESS FOR C) KAPTON WITH RIGID ELECTRODES AND D) EAP WITH FLEXIBLE ELECTRODES**



#### **4 CONCLUSION**

*The present work demonstrated the feasibility of new EAP plasma actuators that aim to optimize the conventional DBD plasma actuators for simultaneous flow control and ice removal. The concept of the new EAP plasma actuator consists of using an EAP with flexible electrodes which will allow the mechanical deformation of the dielectric elastomer. EAP materials when submitted to a high electric field will be compressed and, if the peripheric edges are fixed, the material tends to bend or buckle, creating a movement that will promote ice removal.*

*During this work, to prove the concept, actuators based on EAP with flexible electrodes were analyzed experimentally for 1 mm and 2 mm thickness. Initially, they were tested to demonstrate their capability of forming and sustaining a plasma discharge. Then, the electrical analysis was performed and the results showed that these materials consume more power than actuators based on Kapton with rigid electrodes when the applied voltage levels are over 10kVpp.*

*After showing that the selected EAP material is a feasible material to form and sustain the plasma discharge, the induced flow velocities were measured by using a Pitot tube. The results allowed us to conclude that actuators based on EAPs with flexible materials have an oscillating velocity*

profile that translates the concept described in the use of EAPs. However, compared with DBD plasma actuators they present lower velocities. Using a visualization system was possible to see the airflow behavior which corroborated the velocity measurements.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Project “Smart Sustainable Farms Foods and Trade European Digital Innovation Hub”- SFT-EDIH” and by the Portuguese Foundation for Science and Technology through the exploratory project “IceWindSolution” grant no. 2023.15318.PEX (“Centre for Mechanical and Aerospace Science and Technologies (157749UID) | SCIPROJ”, [s.d.]) and through the research unit C-MAST (Center for Mechanical and Aerospace Science and Technology), Research Unit No. 151, project grant numbers UIDB/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00151/2020>) and UIDP/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/00151/2020>).

## REFERENCES

ABDOLLAHZADEH, M. et al. Parametric optimization of surface dielectric barrier discharge actuators for ice sensing application. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 335, p. 113391, 1 mar. 2022.

ABDOLLAHZADEH, M.; PASCOA, J. C.; OLIVEIRA, P. J. Implementation of the classical plasma–fluid model for simulation of dielectric barrier discharge (DBD) actuators in OpenFOAM. **Computers & Fluids**, v. 128, p. 77–90, 10 abr. 2016.

ABDOLLAHZADEH, M.; RODRIGUES, F.; PASCOA, J. C. Simultaneous ice detection and removal based on dielectric barrier discharge actuators. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 315, p. 112361, 1 nov. 2020.

BAR-COHEN, Y.; CALTECH, J. J. Electroactive Polymers as Artificial Muscles - Reality and Challenges. **Proceedings of the 4th Conference on Aerospace Materials, Processes, and Environmental Technology**, 2001.

BENARD, N.; MOREAU, E. Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control. **Experiments in Fluids**, v. 55, n. 11, p. 1–43, 13 nov. 2014.

CORKE, T. C.; ENLOE, C. L.; WILKINSON, S. P. Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 42, p. 505–529, 1 jan. 2010.

CORKE, T. C.; MERTZ, B.; PATEL, M. P. Plasma flow control optimized airfoil. **Collection of Technical Papers - 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting**, v. 19, p. 14707–14719, 2006.

DEARING, S. S.; MORRISON, J. F.; IANNUCCI, L. Electro-active polymer (EAP) “dimple” actuators for flow control: Design and characterisation. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 157, n. 2, p. 210–218, 1 fev. 2010.

DONG, B. et al. Experimental study of a DBD surface discharge for the active control of subsonic airflow. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 41, n. 15, p. 155201, 1 jul. 2008.

GAO, L. et al. A hybrid strategy combining minimized leading-edge electric-heating and superhydro-/ice-phobic surface coating for wind turbine icing mitigation. **Renewable Energy**, v. 140, p. 943–956, 1 set. 2019.

GONZALEZ, D.; GARCIA, J.; NEWELL, B. Electromechanical characterization of a 3D printed dielectric material for dielectric electroactive polymer actuators. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 297, 1 out. 2019.

GUOQIANG, L. et al. Experimental investigation of dynamic stall flow control for wind turbine airfoils using a plasma actuator. **Wind Energy**, v. 185, p. 90–101, 15 out. 2019.

JOUSSOT, R. et al. Thermal characterization of a DBD plasma actuator: dielectric temperature measurements using infrared thermography. **40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit**, 2010.

PLASMAS, J. R.-P. OF; 2003, UNDEFINED. Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a one atmosphere uniform glow discharge plasma. **pubs.aip.org**, [s.d.].

RODRIGUES, F.; ABDOLLAHZADEH, M. An experimental study on segmented-encapsulated electrode dielectric-barrier-discharge plasma actuator for mapping ice formation on a surface: A conceptual. **Journal of Heat Transfer**, 2021.

RODRIGUES, F.; PASCOA, J.; TRANCOSI, M. Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators. **Experimental thermal and fluid science**, 2018.

ROY, S. et al. Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers. **Sensors and actuators a: physical**, 1998.

SHCHERBAKOV, Y. V. et al. Drag reduction by ac streamer corona discharges along a wing-like profile plate. **31st Plasmadynamics and Lasers Conference**, 2000.

SKRIMPAS, G. A. et al. Detection of icing on wind turbine blades by means of vibration and power curve analysis. **Wind Energy**, v. 19, n. 10, p. 1819–1832, 1 out. 2016.





## RESUMO

A acumulação de gelo consiste numa significativa desvantagem no desempenho aerodinâmico quer de aeronaves, quer de turbinas eólicas em condições meteorológicas de clima frio. Desde a década de 90 que os atuadores a plasma de barreira dielétrica de descarga (DBD) são reconhecidos pela sua funcionalidade de controlo ativo de escoamento aerodinâmico, e, mais recentemente, pelas aplicações de anti-/de-gelo. Considerando que cerca de 65 a 95 % da energia total que é fornecida aos atuadores a plasma é dissipada como calor, torna-se natural propor estes mecanismos como métodos de anti-/de-gelo em estruturas erodinâmicas. Tipicamente, as barreiras dielétricas estão restringidas a materiais como vidro de borossilicato e polímeros, por exemplo borracha de poli-isobutileno, poliestireno, Teflon, Kapton e Cirlex. No entanto, novos materiais capazes de resistir à exposição de partículas geradas pelo plasma durante longos períodos são necessários. Pela primeira vez na literatura, diferentes compósitos cerâmicos foram termicamente analisados para propor soluções originais por forma a melhorar a robustez de DBDs de superfície em aplicações de mitigação de acumulação de gelo. Em maior detalhe, amostras cerâmicas de  $Y_2O_3-ZrO_2$ ,  $MgO-CaZrO_3$ , e  $MgO-Al_2O_3$  foram fabricadas, e as suas propriedades térmicas foram analisadas. Adicionalmente, estudos termográficos dos atuadores a plasma de barreira dielétrica cerâmica foram também efetuados. Como previsto, os resultados demonstraram que quanto maior a potência consumida, maior a temperatura de superfície de todos os atuadores a plasma DBD. O atuador  $Y_2O_3-ZrO_2$  apresentou um campo de distribuição de temperatura muito concentrado à volta do elétrodo exposto, atingindo nessa região a temperatura máxima para os diferentes níveis de diferença de potencial testados (155 °C a 10 kVpp). Por sua vez,  $MgO-CaZrO_3$  (62 °C a 10 kVpp) e  $MgO-Al_2O_3$  (47 °C a 10 kVpp) registaram temperaturas de superfície mais baixas, com distribuições de gradiente de temperaturas mais homogéneas em toda a barreira dielétrica. Concluiu-se assim que as temperaturas máximas atingidas por estas cerâmicas validam a sua capacidade, sem precedentes, como barreiras dielétricas de DBDs para a mitigação de acumulação de gelo.

**Palavras-chave:** acumulação de gelo, barreira dielétrica, compósitos cerâmicos, propriedades térmicas, desempenho térmico.

## 1 INTRODUCTION

Ice accumulation is reported to severely decrease the aerodynamic performance of an aircraft due to induced flow separation, drag, and weight increase, which, in turn, diminishes thrust and lift forces [1]. Ice formation, followed typically by ice accumulation phenomena, promotes, for example, wing and engine blade profile modifications on aircraft surfaces. Consequently, in the United States of America, the National Transportation Safety Board [2] has identified aircraft icing as one of the safety concerns that urgently needs to be addressed. Among several reports, in 1994, an Embraer EMB120 aircraft was involved in an accident

resulting from ice accretion on the wing's upper surface, which promoted airflow separation and uncoordinated flight [3]. From 2000 to 2011, carburetor icing was pointed out to be the cause of about 250 accidents, of which two per year were fatal [4]. From 2016 to 2019, Europe and Canada conducted the PHOBIC2ICE project aiming to develop technologies and predictive simulation routines designed to reduce the ice accretion phenomena [5]. Similarly, wind turbine icing fosters aerodynamic performance degradation due to weight imbalances in cold climates. Moreover, ice formation may lead to the automatic shutdown of wind turbines, and therefore, loss of power. Ice falls from the wind turbines may endanger nearby people and infrastructure. Gao and Hu (2021) [6] reported that 19 %, 72 %, and 94 % of wind turbines in Asia, North America, and Europe, respectively, have experienced icing events. Consequently, anti-icing and de-icing technology have vastly improved over the years, e.g., liquid-based; pneumatic, and ultrasonic-based systems; thermal, and electro-thermal systems [7, 8]. Nonetheless, these mechanisms showed associated problems, such as environmental pollution, mechanical damage (foreign object damage hazard), unreliability, or inefficiencies in in-flight conditions due to super-cooled degradation and demanding power conditions [8]. Given the abovementioned, further development of innovative de-icing/anti-icing systems is required.

Dielectric barrier discharge plasma actuators have been subject to numerous studies as mechanisms for active aerodynamic flow control, and more recently, as de-icing/anti-icing technology due to their thermal power loss [8, 9, 10, 11]. Anti-icing processes prevent the formation of ice layers, whereas de-icing processes involve the removal of existing ice layers [7]. Jukes et al. (2007) [12] performed thermal imagery of the gas temperature around the electrode and Mylar dielectric surface temperature, noting that both experienced heating due to the plasma discharge. Jousot et al. (2010) [13] analyzed the thermal characterization of a Kapton/Mylar-based alternating current (AC) DBD plasma actuator via an infrared camera to assess the influence of electric parameters. Likhanskii et al. (2010) [14] proposed dielectric barrier discharge as a de-icing device. The authors remarked that due to both force and heating effects, temperature increase does not interfere with the flow characteristic, nor generates "hot spots". Rodrigues et al. (2018) [15] performed different plasma actuators to study the influence of the dielectric thickness and material for film cooling and de-icing/anti-icing. The results showed that Kapton-, poly-isobutylene-, polylactic acid-, and acetoxysilicone-based dielectrics had average heat generation efficiencies between 57 % and 88 %. Abdollahzadeh et al. (2020) [16] proposed a new self-integrated ice sensor with an AC DBD plasma actuator. More recently, Abdollahzadeh et al. (2022) [17] proposed a parametric optimization for better ice sensing and de-icing performances of surface DBD (SDBD) plasma actuators considering Kapton, PIB rubber, PMMA, and Teflon dielectric layers. It was also shown that the ice sensitivity varied considering the dielectric materials used.

Over the years, although several studies have focused on the de-icing, anti-icing, and ice-sensing capabilities of AC SDBD plasma actuators, the dielectric barrier materials used in these studies have primarily been polymers. Therefore, new materials capable of withstanding long periods of exposure to charged particles are needed. Shvydyuk et al. (2023) [18] manufactured ceramic-based SDBDs and captured infrared images of assembled SDBDs. Three compositions commonly applied in thermal barrier coatings were used as ceramic composites. As a follow-up, in this study,  $Y_2O_3-ZrO_2$ ,  $MgO-CaZrO_3$ , and  $MgO-Al_2O_3$  ceramic composite dielectric barriers were thermally analyzed to propose original solutions for improving AC SDBD robustness for ice accretion mitigation. Specifically, temperature field distributions of produced ceramics were evaluated.

## 2 EXPERIMENTAL PROCEDURE

### 2.1 Dielectric barriers manufacturing and SDBD assembly

In the current study, three ceramic dielectric plates were fabricated from commercially available powders. To produce the  $Y_2O_3-ZrO_2$  dielectric specimen 3 mol% yttria-stabilized zirconia (t-3YSZ) (Tosoh-Zirconia, Japan), 8 mol% yttria-stabilized zirconia (c-8YSZ) (Tosoh-Zirconia, Japan), and monoclinic zirconia (m- $ZrO_2$ ) (Acros Organics, Belgium) powders of high purity (wt%: 99.8, 99.7 and 98.5 for t-3YSZ, c-8YSZ, and m- $ZrO_2$ , respectively) were used. For the  $MgO-CaZrO_3$  ceramic composite system, magnesium oxide (MgO), and calcium zirconate ( $CaZrO_3$ ) (Alfa Aesar, USA) powders of high purity (wt%: 96, and 99.2, respectively) were mixed. Considering the  $MgO-Al_2O_3$  composition, magnesium oxide (MgO) (Alfa Aesar, USA) and aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) (Acros Organics, Belgium) powders of high purity (wt%: 96 and 99, respectively) were applied. The mentioned raw powders were milled – (3 h for  $Y_2O_3-ZrO_2$  and  $CaZrO_3$ ; and 6 h for  $Al_2O_3$ ) – in grinding bowls with 250 mL capacity in a high-energy planetary mill (Fritsch, Pulverisette 6, Idar-Oberstein, Germany) at 500 rpm in cycles of 30 minutes. The milling process was performed with a powder/isopropyl alcohol/balls 1/1/2 ratio. Next, the mixtures were dried in a stove at 80 °C for 24 hours (Carbolite, NR200-F, Hope Valley, UK), and sieved (Retsch, AS200, Haan, Germany) using a 63  $\mu m$  mesh. The sieved mixtures were each compacted with a universal testing machine (Instron 8800, 100 kN capacity, Canton, MA, USA) using rectangular dies of high-strength steel measuring 60 × 60 mm. The sintering process was then conducted in an electrical furnace (Termolab, MLR, Águeda, Portugal) – (at 1450°C for  $Y_2O_3-ZrO_2$  and  $CaZrO_3$ ; and 1600 °C for  $Al_2O_3$ ) with an initial heating rate of 5 °C/min. Lastly, to uniformize the dielectric ceramic plates, polishing with silicon carbide paper was performed (Struers DAPV, Ballerup, Denmark).

After obtaining the three ceramic plates of  $Y_2O_3-ZrO_2$ ,  $CaZrO_3$ , and  $Al_2O_3$  these were assembled into SDBD plasma actuators. Two electrodes – one exposed and one covered (10 mm and 20 mm width, respectively) – were asymmetrically mounted on each side of the ceramic dielectric plates with a 1 mm gap. This way, The total resulting plasma spanwise length was

approximately 30 mm. Moreover, the electrodes were made of copper tape with a thickness of 80  $\mu\text{m}$ . The SDBDs plasma actuators were operated by a sinusoidal AC high-voltage source (PVM 500 model, Information Unlimited, Amherst, USA) – up to 20 kV peak-to-peak (kVpp) and 20 kHz to 50 kHz frequencies. Both voltage and current waveforms were monitored with a digital oscilloscope (PicoScope 5443 A, Pico Technology, UK) connected to a high-voltage probe (MI074 Secondary Ignition Pickup, Lurgan, UK). Power consumptions were measured using the electric current method [19]. The temperature fields induced by heat dissipation through the plasma discharge process were analyzed using a thermal imaging camera (FLIR E50, Teledyne FLIR, USA) with a resolution of  $240 \times 180$  pixels and an uncertainty of 2 %. Since the samples varied in size due to distinct densification processes, the temperature fields were captured at different heights (130 mm for  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ,  $\text{CaZrO}_3$ , and 210 mm for  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). To ensure temperature stabilization, the infrared images were captured after the plasma discharge stoppage, which lasted for 300 seconds. It should be emphasized that the plasma actuators were first painted with black matte ink (emissivity of 0.97).

Additionally, thermal conductivity was determined according to the laser flash analysis standard test ASTM E1461-13 [20]. For that purpose, disc specimens (diameter of approximately  $12.55 \pm 0.5$  mm) were tested on a (LFA 457 MicroFlash, Netzsch, Germany) after applying a high emissivity coating (Kontakt-Chemie 76009-AG, Graphit 33 Spray, Belgium) for improved energy absorption. The ceramic samples' thermal conductivity parameter was tested in a controlled inert atmosphere with a reference material (Pyroc ceramic, Order number 6.256.1–94.0.03, Netzsch, Germany), for calibration aims.

### **3 RESULTS AND DISCUSSION**

The following sections, i.e., AC SDBD consumed power, thermographic analysis, and spatial thermal variations describe the study performed and analysis made.

#### **3.1 AC SDBD consumed power**

The average power consumed by the manufactured and assembled  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ,  $\text{MgO-CaZrO}_3$ , and  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  AC SDBD plasma actuators was computed through the electric current method. Table 1 summarizes the results obtained as a function of applied voltage levels at 24 kHz frequency. The average electric power consumption has an associated error lower than 2 % considering the resistor's tolerance of 1 % and the digital oscilloscope's high resolution. The input voltage varied between 6 kVpp and 10 kVpp since these were the minimum and maximum voltage levels at which the plasma discharge generation started (at 6 kVpp) and before showing unstable behavior (10 kVpp), respectively.

**Table 1 – Average power consumption [W].**

Input Voltage [kVpp]	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub>	MgO-CaZrO <sub>3</sub>	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
6	3.0	2.9	1.7
7	4.8	4.0	2.4
8	8.3	5.7	3.1
9	13.2	7.4	4.2
10	20.7	9.6	5.6

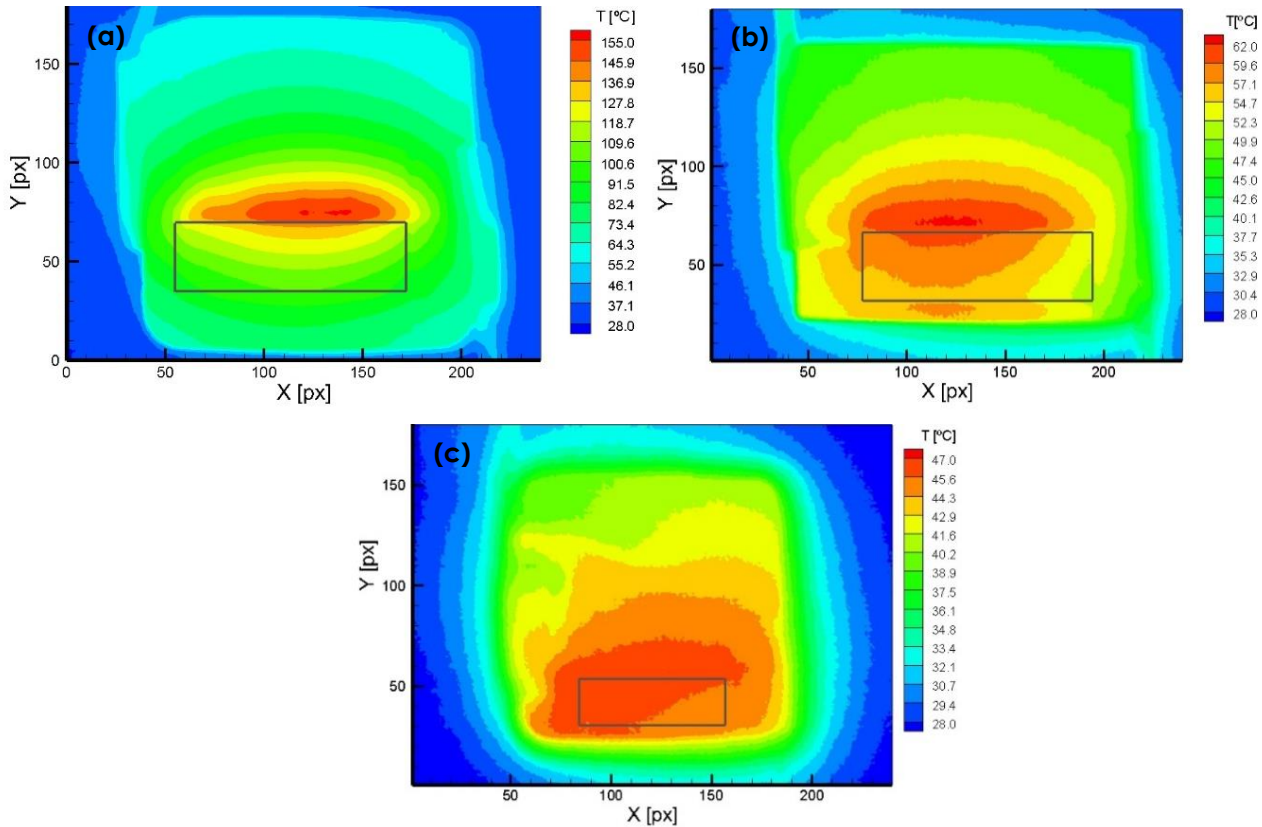
From Table 1, despite the AC SDBD plasma actuator being considered, it is possible to infer that by augmenting the input voltage, the average power consumption tends to increase. The Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> consumed the highest average power, followed by MgO-CaZrO<sub>3</sub>, and then by MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. At the maximum input voltage level of 10 kVpp, the MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5.6 W) and MgO-CaZrO<sub>3</sub> (9.6 W) consumed, approximately, a third and a half of the average power consumed by the Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> (20.7 W). The results mentioned evidence, from a practical point of view, that the MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> shows itself to be the most cost-effective actuator due to the low electric consumption.

### 3.2 AC SDBD thermographic analysis

Infrared thermographic images were taken for the thermal behavior analysis of the Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, MgO-CaZrO<sub>3</sub>, and MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> AC SDBD plasma actuators. To assess the ceramic-based SDBDs' suitability as de-icing/anti-icing/ice-sensing tools, heat generation during plasma actuators' operation must be thoughtfully comprehended. Therefore, Figure 1 presents the thermographic images in quiescent air after a 5-minute temperature stabilization process at 10 kVpp input voltage. It should be noted that evaluating plasma temperature through infrared imaging is not possible due to the plasma's emissivity variation originating from its filamentary and nonuniform nature. Thus, the temperature of the dielectric surface must be considered. The grey rectangle placed in the middle of the images represents the exposed electrode position. Moreover, the asymmetries in the temperature field distributions are justified by the circuit cables connected to the AC SDBD plasma actuators. Overall, different ceiling temperatures were recorded for the three ceramic AC SDBD plasma actuators: approximately, 155 °C, 62 °C and 47 °C for Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, MgO-CaZrO<sub>3</sub>, and MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectively. Besides, the temperature fields of the different ceramic dielectrics showed dissimilarities in function of the dielectric material. These results are justified by the different thermal properties of the studied ceramic composites [21, 22]. Additionally, it is strongly highlighted that the order of the maximum temperature achieved depicted in Figure 1 coincides with the power consumption analyzed in Table 1. The Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> had the highest average power consumption and

ceiling temperature (20.7 W and 155 °C), followed by MgO-CaZrO<sub>3</sub> (9.6 W and 62 °C), and MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5.6 W and 47 °C).

**Figure 1 – Thermographic images of ceramic DBD plasma actuators at 10 kVpp and 24 kHz (a) Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, (b) MgO-CaZrO<sub>3</sub>, and (c) MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.**



The results achieved evince the premise that the heat dissipation – due to plasma discharge phenomena – is responsible for the dielectric surface/its surroundings heating, promoting anti- and de-icing features of SDBD plasma actuators. On top of that, the temperature achieved by Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> is much higher than the ones achieved by typical polymers, e.g., Kapton, used as dielectric barriers [23, 24].

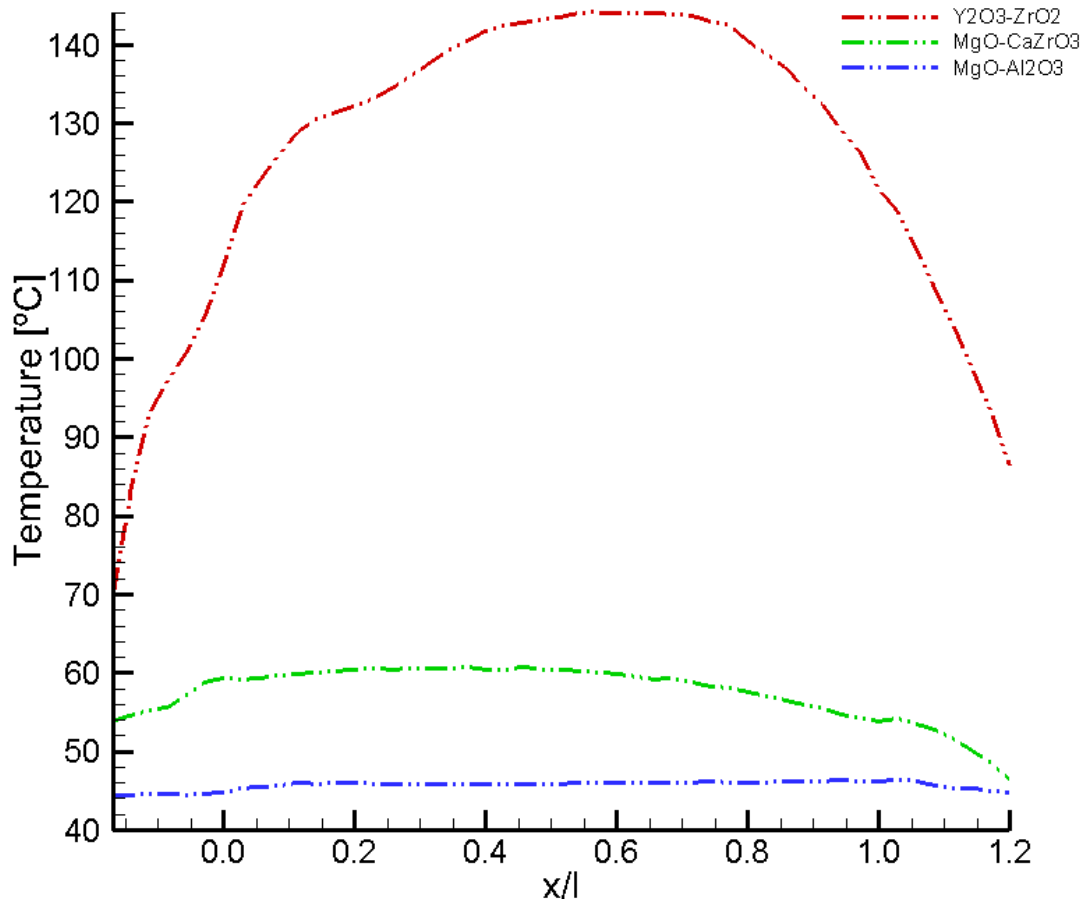
### 3.3 AC SDBD spatial temperature variation

On top of the presented, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, MgO-CaZrO<sub>3</sub>, and MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> AC SDBD plasma actuators analysis of the spatial temperature variation for 10 kVpp and 24 kHz along the x- and y-axis follows below.

Figure 2 represents the temperature spatial variation along the x-axis for the three ceramic-based AC SDBD plasma actuators between  $x/l = -0.2$  and  $x/l = 1.2$  at  $y/w = 0.0$ . In this section,  $l$  is the length of the exposed electrodes, whereas  $0 < x/l < 1$  is their frontal region. The extended interval of  $[-0.2, 1.2]$  was adopted to accomplish a more comprehensive investigation of the x-axis spatial temperature variation. The spatial temperature variations along the x-axis were analyzed on the adjacent

points of the exposed electrode edge, which is considered to be the region where the maximum temperature levels are located.

**Figure 2 – Spatial temperature variation along the x-axis at 10 kVpp of  $Y_2O_3-ZrO_2$ ,  $MgO-CaZrO_3$ , and  $MgO-Al_2O_3$  AC SDBD ceramic plasma actuators.**



For  $MgO-Al_2O_3$  ceramic SDBD, and owing to Figure 2, it is possible to infer that the temperature distribution across the x-axis presented distinctly stable magnitudes. Additionally,  $MgO-Al_2O_3$  depicted a temperature profile with slightly pronounced variation modification in temperature levels from distances of  $x/l$  in the ranges of  $[-0.2, 0.0]$  and  $[1.0, 1.2]$ . Although reaching higher temperatures, the same analysis – as of  $MgO-Al_2O_3$  – can be made for the  $MgO-CaZrO_3$  ceramic AC SDBD, i.e., stable temperature magnitudes with some variations around the  $[-0.2, 0.0]$  and  $[1.0, 1.2]$  interval.

When compared to  $MgO-Al_2O_3$  and  $MgO-CaZrO_3$ , a significant change, however, can be observed for the  $Y_2O_3-ZrO_2$  ceramic. AC SDBD plasma actuator made of  $Y_2O_3-ZrO_2$  had profound dissimilarity between the temperature of the electrode's frontal central region ( $0.2 < x/l < 0.8$ ) and its edges ( $-0.2 < x/l < 1.0$  and  $1.0 < x/l < 1.2$ ). Moreover, in terms of maximum achieved temperatures,  $MgO-Al_2O_3$  does not achieve temperatures above 50 °C,  $MgO-CaZrO_3$  ceramic slightly surpasses 60 °C, whereas  $Y_2O_3-ZrO_2$  reaches over 140 °C.

**Figure 3- Spatial temperature variation along the y-axis at 10 kVpp of  $Y_2O_3-ZrO_2$ ,  $MgO-CaZrO_3$ , and  $MgO-Al_2O_3$  AC SDBD ceramic plasma actuators.**

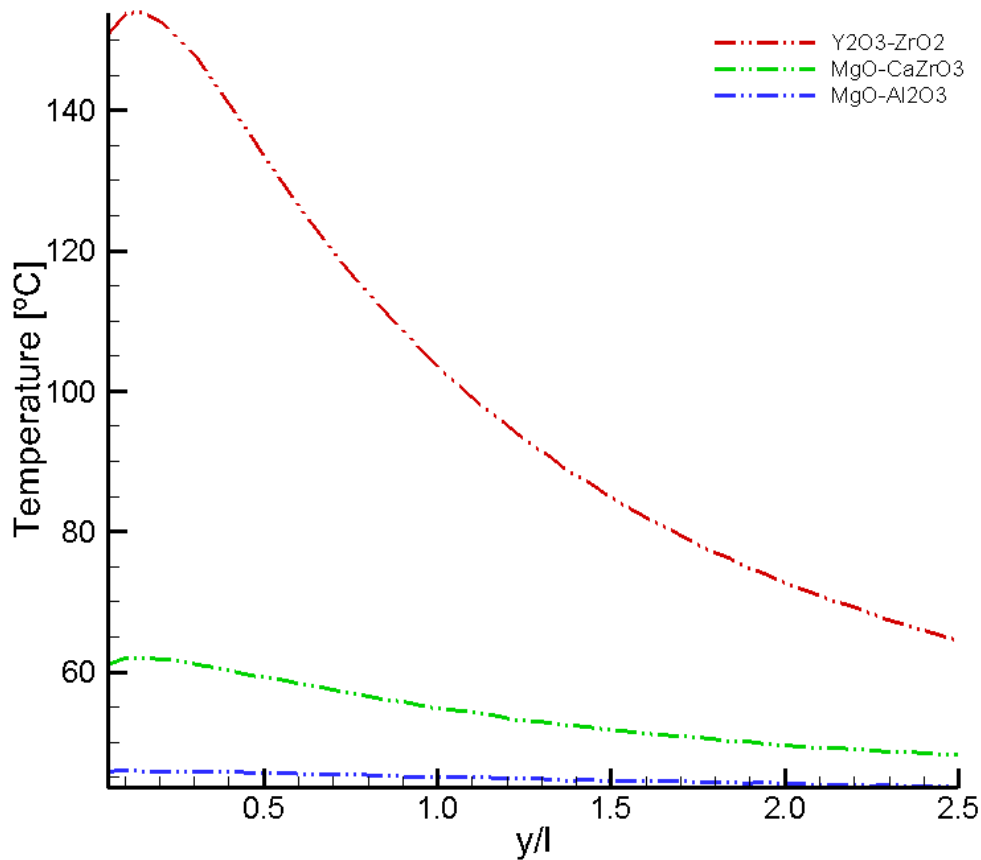


Figure 3 depicts the spatial variation of the temperature across the y-axis (perpendicularly to the exposed electrode length, i.e.,  $x/l = 0.5$  outwards) for the  $Y_2O_3-ZrO_2$ ,  $MgO-CaZrO_3$ , and  $MgO-Al_2O_3$  AC SDBD plasma actuators between  $y/w = 0.0$  and  $y/w = 2.5$ . In this section,  $w$  is the width of the exposed electrodes.

Based on Figure 3 and along the y-axis, the temperature recorded was higher near the exposed electrode edge, i.e.,  $y/w = 0.0$ , at the onset of plasma discharge formation. The main dissimilarities between  $MgO-Al_2O_3$  and  $MgO-CaZrO_3$  plasma actuators and the  $Y_2O_3-ZrO_2$  is that the latest had a much more pronounced temperature initial increase – within the  $0.0 < y/w < 0.2$  – and stepped decrease for the rest of the y-axis –  $0.2 < y/w < 2.5$ .

Lastly, non-uniformities (i.e., steep spikes that indicate that plasma is close to the limit of the dielectric material) caused by hot spots, were not identified in either of these spatial temperature profiles. These non-uniformities are commonly present in other dielectric materials, such as Kapton, PLA, and PIB rubbers [24, 25]. It is thereby emphasized that the absence of non-uniformities shows the good stability of the plasma discharge created on the surface of the  $MgO-Al_2O_3$ ,  $MgO-CaZrO_3$ , and  $Y_2O_3-ZrO_2$  dielectrics.



## 4 CONCLUSIONS

The literature has shown that polymer-based dielectric barriers have been successfully applied to plasma actuators in active flow control research. Even though this approach is reported to work, it has several limitations, including handling difficulties due to discrete thickness, partial discharge between layers, and, more markedly, material rapid degradation. Consequently, ceramic dielectrics appear to be excellent candidates. In this study,  $Y_2O_3-ZrO_2$ ,  $MgO-CaZrO_3$ , and  $MgO-Al_2O_3$  ceramic composite dielectric barriers were thermally analyzed to propose original solutions for improving AC SDBD robustness. Results showed that  $Y_2O_3-ZrO_2$  had the highest average power consumption and ceiling temperature (20.7 W and 155 °C), followed by  $MgO-CaZrO_3$  (9.6 W and 62 °C), and  $MgO-Al_2O_3$  (5.6 W and 47 °C). Moreover, considering the temperatures achieved, and the spatial temperature variations, the heating of the ceramic SDBD plasma actuators can be a smart solution in cold climates for ice accretion mitigation. Heating generation, until now believed to be a limiting factor of plasma actuators technology, can play an important role in ice accretion mitigation for wind turbines and aircraft.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology, I.P. (FCT, I.P.) under the R&D Unit C-MAST/Center for Mechanical and Aerospace Science and Technologies, reference: Projects UIDB/00151/2020 (DOI: (DOI: 10.54499/UIDB/00151/2020)) and UIDP/00151/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/00151/2020). João Nunes-Pereira would also like to thank FCT, I.P., for the contract under the Stimulus of Scientific Employment Individual Support: 2022.05613.CEECIND (DOI: 10.54499/2022.05613.CEECIND/CP1746/CT0001).

## REFERENCES

- [1] "In Flight Icing," EGAST: European General Aviation Safety Team, Köln, Germany, 2015.
- [2] "About the NTSB," NTSB: National Transportation Safety Board, [Online]. Available: <https://www.nts.gov/about/Pages/default.aspx>. [Accessed 25 07 2024].
- [3] "Appendix G-Embraer Icing Guidance/Procedures. Brasília, Embraer EMB120.," NTSB: National Transportation Safety Board, Florida, USA, 1995.
- [4] "Engine Power Loss Due to Carburetor Icing," NTSB: National Transportation Safety Board, Washington, DC, USA, 2015.
- [5] "Super-IcePhobic Surfaces to Prevent Ice Formation on Aircraft," CORDIS-EU, Warsaw, Poland, 2015.

- [6] L. Gao and H. Hu, "Wind turbine icing characteristics and icing-induced power losses to utility-scale wind turbines," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 42, p. e2111461118, 2021.
- [7] C. Kolbakir, H. Hu, Y. Liu and H. Hu, "An Experimental Investigation on the Thermodynamic Characteristics of DBD Plasma Actuations for Aircraft Icing Mitigation," *Plasma Science and Technology*, p. 25, 2022.
- [8] Y. Liu, C. Kolbakir and H. Hu, "A parametric study to explore ns-DBD plasma actuation for aircraft icing mitigation," in *2018 Flow Control Conference*, Atlanta, Georgia, USA, 2018.
- [9] C. Kolbakir, L. Gao, Y. Liu and H. Hu, "A Parametric Study on the Thermodynamic Characteristics of DBD Plasma Actuation and Its Potential for Wind Turbine Icing Mitigation," *SAE Technical Paper 2019-01-2031*, 2019.
- [10] M. Lindner, A. Pipa, N. Karpen, R. Hink, D. Berndt, R. Foest, E. Bonaccorso, R. Weichwald, A. Friedberger, R. Caspari and R. Brandenburg, "Icing mitigation by MEMS-Fabricated surface dielectric barrier discharge," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 23, p. 11106, 2021.
- [11] F. Rodrigues, M. Abdollahzadehsangroudi, J. Nunes-Pereira and J. Páscoa, "Recent developments on dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators for icing mitigation," *Actuator*, vol. 12, no. 1, p. 5, 2022.
- [12] T. N. Jukes, K. S. Choi, T. Segawa and H. Yoshida, "Jet flow induced by a surface plasma actuator," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 222, no. 5, pp. 347-356, 2008.
- [13] R. Joussof, V. Boucinha, R. Weber-Rozenbaum, H. Rabat, A. Leroy-Chesneau and D. Hong, "Thermal characterization of a DBD plasma actuator: dielectric temperature measurements using infrared thermography," in *40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, Chicago, Illinois, USA, 2010.
- [14] A. Likhanskii, M. Shneider, D. Opaitis, S. Macheret and R. Miles, "Limitations of the DBD effects on the external flow," in *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, Florida, USA, 2010.
- [15] F. Rodrigues, J. Páscoa and M. Trancossi, "Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators," *Experimental thermal and fluid science*, vol. 90, pp. 55-65, 2018.
- [16] M. Abdollahzadeh, F. Rodrigues and J. C. Páscoa, "Simultaneous ice detection and removal based on dielectric barrier discharge actuators," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 315, p. 112361, 2020.
- [17] M. Abdollahzadeh, F. Rodrigues, J. Nunes-Pereira, J. C. Páscoa and L. Pires, "Parametric optimization of surface dielectric barrier discharge actuators for ice sensing application," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 335, p. 113391, 2022.
- [18] K. O. Shvydyuk, F. F. Rodrigues, J. Nunes-Pereira, J. C. Páscoa, S. Lanceros-Mendez and A. P. Silva, "Long-lasting ceramic composites for surface dielectric barrier discharge plasma actuators," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 43, no. 14, pp. 6112-6121, 2023.

- [19] D. Ashpis, M. Laun and G. Elmer, "Progress toward accurate measurements of power consumption of DBD plasma actuators," in *50th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition*, Nashville, Tennessee, USA, 2012.
- [20] "ASTM E1461–13: Standard Test Method for Determining Thermal Diffusivity by the Flash Method," ASTM International, 2007.
- [21] K. O. Shvydyuk, J. Nunes-Pereira, F. F. Rodrigues and A. P. Silva, "Review of Ceramic Composites in Aeronautics and Aerospace: A Multifunctional Approach for TPS, TBC and DBD Applications," *Ceramics*, vol. 6, no. 1, pp. 195-230, 2023.
- [22] K. Shvydyuk, J. Nunes-Pereira, F. Rodrigues, J. Páscoa, S. Lanceros-Mendez and A. Silva, "Holistic Characterization of MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO-CaZrO<sub>3</sub>, and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Ceramic Composites for Aerospace Propulsion Systems," *Ceramics*, vol. 7, no. 1, pp. 364-384, 2024.
- [23] F. Rodrigues, J. Páscoa and M. Trancossi, "Experimental thermal characterization of DBD plasma actuators," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Tampa, Florida, USA, 2017.
- [24] J. Nunes-Pereira, F. Rodrigues, M. Abdollahzadehsangroudi, J. Páscoa and S. Lanceros-Mendez, "Improved performance of polyimide Cirlex-based dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control," *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 33, no. 4, pp. 1278-1290, 2022.
- [25] F. Rodrigues, J. Páscoa and M. Trancossi, "Experimental analysis of dielectric barrier discharge plasma actuators thermal characteristics under external flow influence," *Journal of Heat Transfer*, vol. 140, no. 10, p. 102801, 2018.



## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELETROHYDRODYNAMIC JETS BASED ON THE PHASE DOPPLER TECHNIQUE

NUNES, GUSTAVO (1); MOREIRA, MIGUEL (2); RODRIGUES, FREDERICO (3);  
PÁSCOA, JOSÉ (4)

(1) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-MAIL: [GUSTAVO.CAMACHO.NUNES@UBI.PT](mailto:GUSTAVO.CAMACHO.NUNES@UBI.PT)

(2) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-MAIL: [MIGUEL.ANDRE.MOREIRA@UBI.PT](mailto:MIGUEL.ANDRE.MOREIRA@UBI.PT)

(3) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-MAIL: [FMFR@UBI.PT](mailto:FMFR@UBI.PT)

(4) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, E-MAIL: [PASCOA@UBI.PT](mailto:PASCOA@UBI.PT)

### ABSTRACT

*Electrosprays have become increasingly important in various applications, from the automotive industry, especially when talking about painting, to the aerospace area, being particularly used in propulsion. Therefore, the objective of this study is parametric in nature, exploring the formation and behaviour of the Taylor cone in electrospray systems through the observation of the different characteristics of the produced droplets and the influence of different parameters on them to obtain these results, the SpraySpy equipment was used, based on the Phase Doppler technique, which consists of an optical laser technique for particle analysis. The objective of this equipment is to measure and analyse the droplets generated by the electrospray in several study cases. The results obtained include several characteristics of the droplets, such as their velocity, size and distribution. These characteristics were acquired by varying parameters, namely the distance between the emitter and the collector, the liquid flow rate and the diameter of the emitter. With the experimental analysis, by changing the parameters selected for the study, it is possible to verify their action on the formation and behaviour of the Taylor cone. In particular, it is possible to identify a considerable variation on the particle characteristics with the changes of the emitter diameter.*

**Keywords:** *Electrosprays, Taylor Cone, Phase Doppler, Parametric Study.*

### RESUMO

Os eletrosprays têm obtido cada vez mais importância em diversas aplicações, desde a indústria automotiva, especialmente no que toca à pintura, até à área aeroespacial, sendo particularmente utilizado na propulsão. Assim, o objetivo deste estudo é de natureza paramétrica, explorando a formação e o comportamento do cone de Taylor em

sistemas de eletrospray através da observação das diferentes características das gotículas produzidas e a influência dos diferentes parâmetros sobre estas. Para obter estes resultados foi utilizado o equipamento SpraySpy, baseado na técnica Phase Doppler, que consiste numa técnica de laser ótico para a análise de partículas. O objetivo deste equipamento é medir e analisar as gotículas geradas pelo eletrospray em diversos casos de estudo. Os resultados obtidos incluem diversas características das gotículas, tais como a velocidade, o tamanho e a distribuição destas. Estas características foram adquiridas através da variação de parâmetros, nomeadamente, a distância entre o emissor e o coletor, o caudal do líquido e o diâmetro do emissor. Com a análise experimental, alterando os parâmetros referidos para o estudo, é possível verificar a sua ação na formação e comportamento do cone de Taylor. Em particular, é possível identificar uma variação considerável das características das partículas com a mudança do diâmetro do emissor.

**Palavras-chave:** Eletrosprays, Cone de Taylor, Phase Doppler, Estudo Paramétrico.

## 1 INTRODUCTION

Electrospraying consists of a technique where droplets are generated from a conductive liquid passing through a needle with the influence of high voltage. Firstly, the liquid is fed through the emitter at a steady and very low rate. A strong electric field is created at the tip of the emitter, by applying a very high voltage between the emitter and the grounded collector. This causes electrostatic forces to be exerted on the liquid surface, pulling it outward, while the surface tension of the liquid opposes this, keeping it in a spherical shape when in equilibrium. When the electric field reaches a critical value, the electrostatic forces compel the liquid into a conical shape, known as Taylor cone, given its name due to the research done by Sir Geoffrey Taylor (TAYLOR, 1964). From the cone's apex a thin jet of liquid is emitted, which quickly becomes unstable, breaking up into tiny, charged droplets, with a more optimal control and distribution. The formed jets can be separated into different functioning modes, with the main ones being dripping, micro dripping, simple jet, cone-jet, multijet, ramified jet and spindle mode (CLOUPEAU; PRUNET-FOCH, 1994). This study focuses on the Taylor cone formation and the cone-jet mode, which is the most stable mode, despite having a very narrow range of necessary applied voltage (KIM; LEE; HONG, 2022).

This topic was introduced by Zeleny in early 20<sup>th</sup> century while conducting an experiment on the instability of electrified liquid surfaces (ZELENY, 1917, 1920). It was only researched again almost half a century later by Sir Geoffrey Taylor, who further explained the phenomenon (MELCHER; TAYLOR, 1969; TAYLOR, 1964). The research was continued by Hayati et al. (HAYATI; BAILEY; TADROS, 1987), Cloupeau and Prunet-Foch (CLOUPEAU; PRUNET-FOCH, 1989, 1994), De La Mora et al. (DE LA MORA, 1992, 2007; DE LA MORA; LOSCERTALES, 1994), Chen and Pui (CHEN; PUI, 1997), Ganancalvo et al. (GAÑÁN-CALVO, 1999, 2004; GAÑÁN-CALVO et al., 1994,

2018), among others, who studied the effects of the electric field, charge and current, the fluid dynamics, scaling laws, different functioning spraying modes of electrospraying and more specific themes. More recently, modelling has become a focal point of electrohydrodynamic jets, predicting jet performance and studying Taylor cone instabilities (CÂNDIDO; PÁSCOA, 2023, 2024).

The research of electrohydrodynamic jets and Taylor Cone parameters was backed by the need for more detailed control over the produced jet, which is crucial in the development and improvement of diverse applications, such as, the atomization for spectrometry (CHIU et al., 2005; FENN et al., 1989), size distribution optimization (GAMERO-CASTANÕ; MAGNANI, 2019; THUPPUL et al., 2021) and aerospace propulsion (CHIU; DRESSLER, 2007; LENGUITO; GOMEZ, 2014). Nevertheless, one of the most important applications is the deposition of particles, which is used by micro/nanofabrication processes (JAWOREK, 2007; MORAIS et al., 2020), inkjet printing (GUO et al., 2018; YU; AHN; LEE, 2016), painting, coating and material processing (GRACE; MARIJNISSEN, 1994; MAKTABI; CHIAROT, 2016; MIAO et al., 2002; PNDAR et al., 2022), and drug delivery (GUASTAFERRO et al., 2023; RICHARDSON et al., 2010).

According to the literature, the formation and control of the cone-jet electro-spraying process strongly depends on the liquid properties and operating parameters, including the applied potential, liquid flow rate, emitter diameter, viscosity, conductivity and surface tension. Therefore, it is important to further study the parameters and thus optimise the use of this technology in the industry. In such a manner, the current work utilizes the phase-doppler technique of the SpraySpy system to analyse the different created particles by the electrospray. This technique has previously been used, in the 90s, by Tang and Gomez, to study the charge and fission of droplets (GOMEZ; TANG, 1994) and the structure of monodisperse droplets (TANG; GOMEZ, 1994), and by Olumee et al. to study the dynamic changes of droplets (OLUMEE; CALLAHAN; VERTES, 1998). More recently, it was also used by Rosell-Llompарт et al. (ROSELL-LLOMPART; GRIFOLL; LOSCERTALES, 2018) and Sultan et al. (SULTAN; ALLAF-AKBARI; ASHGRIZ, 2020) to study the velocity and size of droplets on the formation of the Taylor cone and the subsequent spray development and how different electrospray modes and the presence of coflowing air impacted the produced droplets.

The purpose of this work is to conduct a parametric study of the cone-jet mode, utilizing a single liquid, acetone. The different parameters, such as the emitter-collector distance, the liquid flow rate and the emitter diameter will be varied in order to determine their impact on the size, distribution and velocity of the produced droplets. To achieve such means, the experimental equipment and techniques used will be explained, followed by a detailed analysis and discussion of the results obtained, which will be summarized in the conclusion of the study.

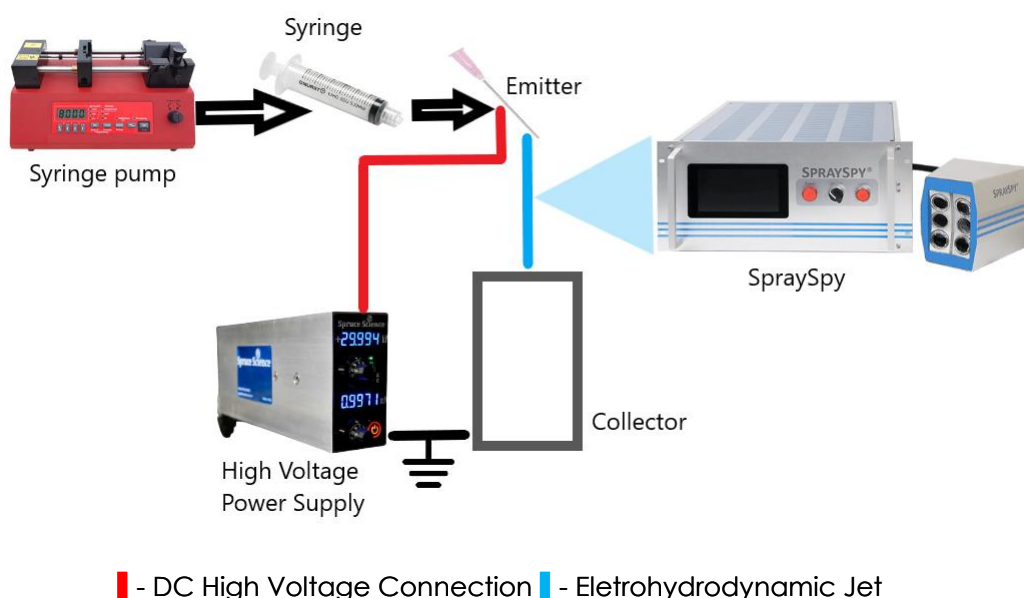
## 2 EXPERIMENTAL SETUP

In general, an electrospray experimental setup is relatively straightforward and requires a conductive emitter and a collector, a supply system for the liquid and a high-voltage power supply. For more detailed experiments other equipment such as high-speed cameras, phase-doppler devices and Faraday cages may be used.

For this experiment, the chosen liquid was based on preliminary experiments involving three liquids, acetone, ethylene glycol and ethanol, where acetone achieved better results with the phase doppler. Acetone's physical properties also came under consideration given its moderate surface tension of 23.7 mN/m, low viscosity of 0.32 mPa·s, very low electrical conductivity and low dielectric constant, which allow for a more stable particle formation.

### 2.1 Eletrospray Setup

Figure 1 – Sketch of the experimental setup



For this experiment, a “Spruce Science” Taylor Cone support was used to hold the emitter, which consists of an electrically conductive needle with various diameters, and the collector. This support is uncomplicated, consisting of an acrylic structure with an adjustable z axis for the variation of the emitter to diameter distance. The liquid supply system consisted of a syringe pump, with a syringe placed on it, acting as a reservoir for the liquid. In turn, this syringe was connected to the emitter with the help of silicon tubing, feeding the liquid at a controlled flow rate to the emitter. The high-voltage power supply was also placed separately, connecting the positive terminal to the emitter and grounding the collector. The power supply allows the creation of the electric field which is needed for the electrospray to function. The “SpraySpy” device was placed at a

distance of 12 centimetres from the created electrohydrodynamic jet, in order to analyse the produced droplets. A sketch of the setup is shown in Figure 1.

## 2.2 Emitter and Collector

The emitter and collector have a significant impact on the produced droplets. Not only the distance between them but also the diameter of the emitter can significantly affect the process. While the collector chosen was a metal plate with a flat surface, the emitter required a more thoughtful selection. While there are many different types of emitters, the three main categories are the externally wetted, porous and internal capillary (DENG et al., 2024). The latter one is the most common and the one chosen for this study, due to its ease of use and simplicity.

**Figure 2 – Needles used with their respective external diameter**



For this study, three different diameters were considered, with emitters of 0.6 mm, 1.1 mm and 2.1 mm diameter, present in figure 2 being chosen. To further examine the effect of the distance between the emitter and the collector on the produced droplets, three set distances of 10, 20 and 30 millimetres were used.

## 2.3 Supply Systems

This experimental setup has two different supply systems, the liquid supply system and the power supply system.

The liquid supply system consists of a syringe pump, model NE-300 from New Era Pump Systems Inc., present in figure 3, capable of holding one syringe up to 60mL, with flow rates of 0.73 $\mu$ L/hr to 1500mL/hr. The device had a syringe inserted into it, with the desired liquid, which was connected directly to the emitter, being held at the Taylor cone support, with the help of a short silicon tube.



**Figure 3 – Syringe pump NE-300**



This equipment is crucial to control the liquid flow rate of the electrospray which is one of the parameters that mostly influence the electrohydrodynamic jet. For this study, this device was set to flow rates of 0.5, 2.5, 5, 7.5 and 10 mL/hr.

**Figure 4 – Lab Mate High Voltage Power Supply**



On the other hand, the power supply system is a Lab Mate High Voltage Power Supply from Spruce Science (figure 4), which can deliver voltages up to 30 kV with a maximum current of 1 mA, with ultra-low ripple, great stability and high accuracy. It was used to create the electric field necessary for electro-spraying, with its positive terminal connected to the

metallic section of the needle, and its negative terminal connected to the collector.

The applied electrical potential was based on the visual stability of the Taylor cone for each experiment conducted, with the values being presented in Table 1.

**Table 1 – Applied Voltage for Taylor Cone Formation**

Parameters		Voltage kV (+/- 0.0001 kV)
Flow Rate	Q=2.5 mL/hr	4.8021
	Q=5 mL/hr	4.5698
	Q=7.5 mL/hr	4.5321
	Q=10 mL/hr	4.4717
Emitter Diameter	d=0.6 mm	3.9321
	d=1.1 mm	4.5321
	d=2.1 mm	5.0132
Emitter to Collector Distance	L=10 mm	3.5921
	L=20 mm	4.5321
	L=30 mm	5.637

## 2.4 SpraySpy

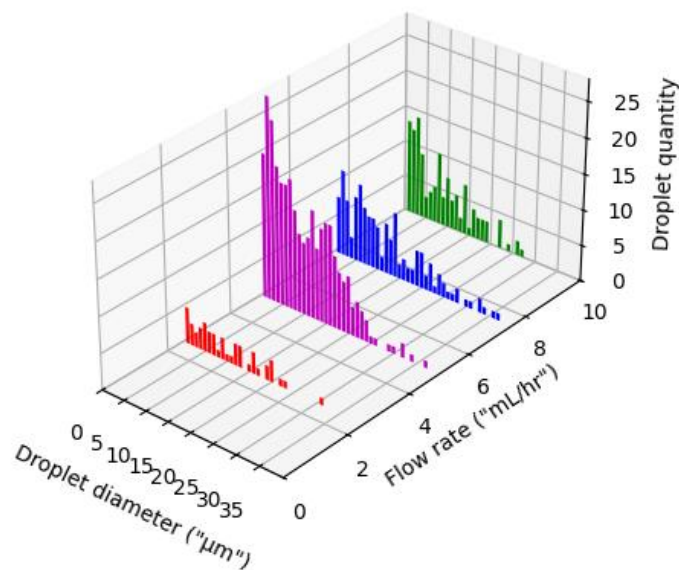
The main equipment that allowed the flow behaviour analysis in the current study is the SpraySpy LabLine. This equipment measures spatially resolved single droplet events, with simultaneous measurement of the size, distribution and velocity of drops, all based on the phase-doppler technique. In this technique, 2 lasers are placed in a way that they intersect each other, forming a set of parallel equidistant fringes. As the droplet intercepts them, it scatters the light which is then received by multiple receptors. These receptors convert the optical signal into a doppler burst. The droplet's size is acquired by the phase shift between two detector's signals and the velocity is obtained through the signals frequency (SIJS et al., 2021). This equipment possesses 2 lasers which meet at a distance of 12 cm from the lenses, and 4 photo-sensitive cells which gather the information from the lasers. This equipment allows to obtain a detailed and easy analysis of the electrospray and its characteristics, with an uncertainty of +/- 0.1  $\mu\text{m}$  for the size and +/- 0.1 m/s for the droplet velocity.

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Flow Rate

The study of the flow rate parameter was achieved by utilizing 5 defined flow rates, 0.5, 2.5, 5, 7.5 and 10 mL/hr. There was no formation of a steady cone-jet at 0.5 mL/hr, leading directly from micro-dripping to multi-jet mode. Also, at 2.5 mL/hr, since the flow rate is still low, the droplet count was inferior when compared to the other values, as shown in figure 5 and 6, in red.

**Figure 5 – Droplet diameter and quantity by flow rate**

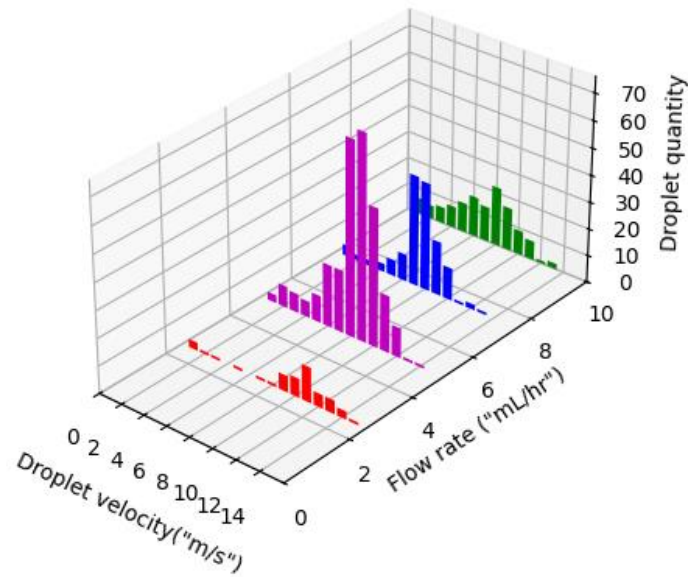


In figure 5, it's possible to see that the diameter of the produced drops tends to stay rather constant throughout the variation of the flow rate, with no major drop or rise in the values, only a slight decrease. With an exception at 2.5 mL/hr, due to the low quantity of droplets obtained. Despite this, we can see a bigger concentration of droplets between 0-5 μm, and a solid distribution from 5-25 μm, and very few to no droplets past that, on all flow rates.

Examining figure 6, it is evident that there is a decrease in the overall velocity of the droplets with the increase of the flow rate. We can see that at 2.5 ml/hr, in red, there is a bigger collection of droplets around 9-12 m/s, meanwhile at 5 ml/hr, in pink, we can see a decrease to 8-10 m/s, and at 7.5 ml/hr another reduction to 6-9 m/s, showed in the blue graphic. At the last flow rate, represented by green, while the bigger concentration of droplets stays similar to the previous flow rate, we can see a slightly higher

distribution at the lower velocities, indicating a decrease in the average velocity.

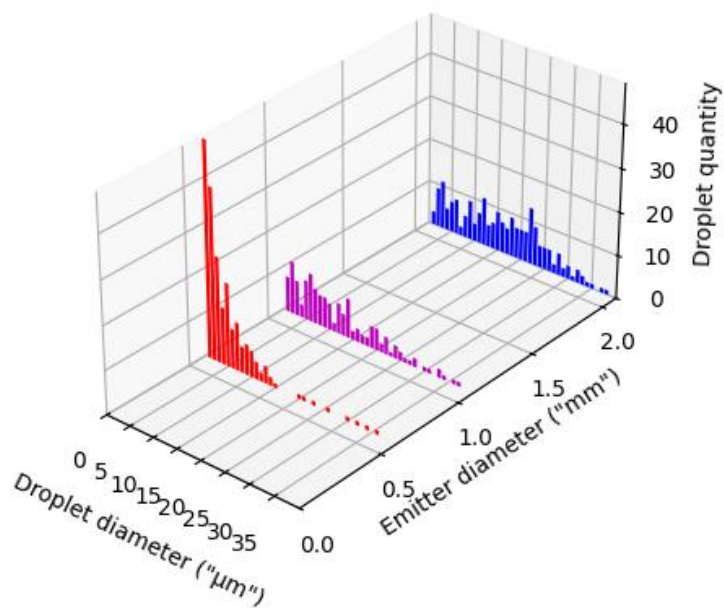
**Figure 6 – Droplet velocity and quantity by flow rate**



### 3.2 Emitter Diameter

In order to study the effect of the emitter diameter in the electro spray results, three diameters of 0.6, 1.1 and 2.1 millimetres were used. Referring to figures 7 and 8, we can see that in the red graphic which represents 0.6 mm, we have a smaller droplet size, with a higher and more distributed velocity.

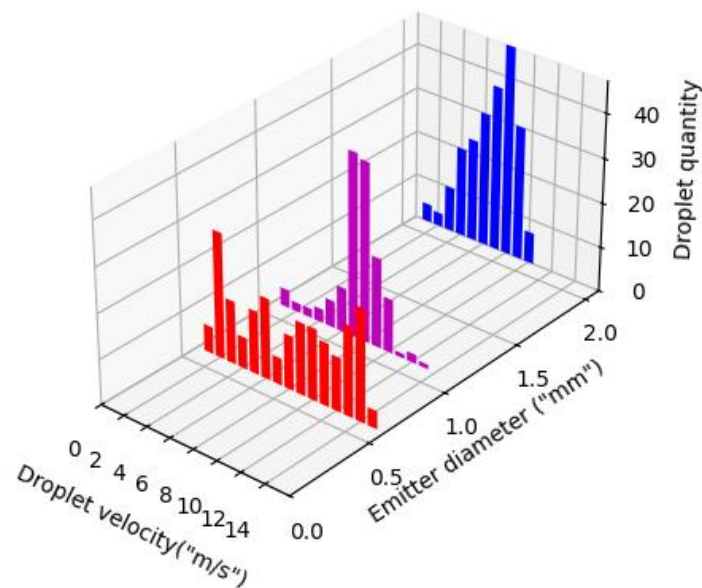
**Figure 7 – Droplet diameter and quantity by emitter diameter**



At 1.1 mm, in pink, we have a slightly higher droplet diameter than 0.6 but the tendency is to increase as we can see at 2.1 mm, depicted in blue, having a more distributed and higher average droplet.

As far as the velocity, the tendency is the opposite, with a decrease in velocity from 0.6 mm to 1.1 mm and from the latter to 2.1 mm of diameter. In figure 8, while the 0.6 mm velocities are distributed, it is possible to examine a higher concentration of droplets at 1.1mm and 2.1mm, of 4-8 m/s and 2-7 m/s, respectively.

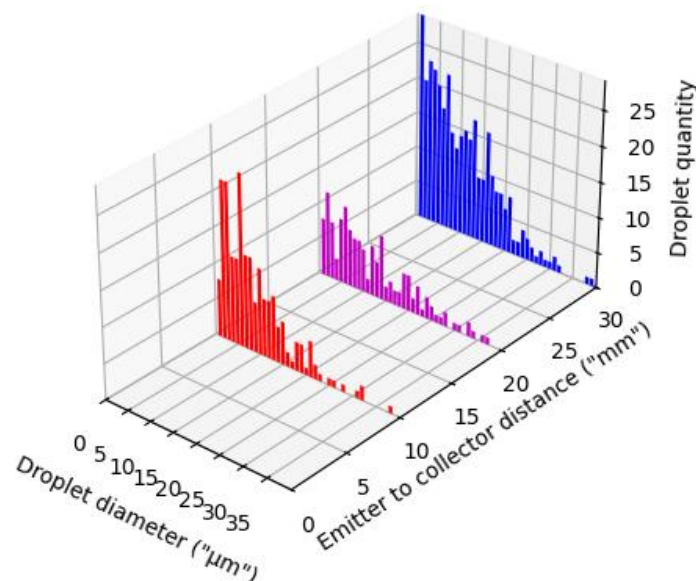
**Figure 8 – Droplet velocity and quantity by emitter diameter**



### 3.3 Emitter to Collector Distance

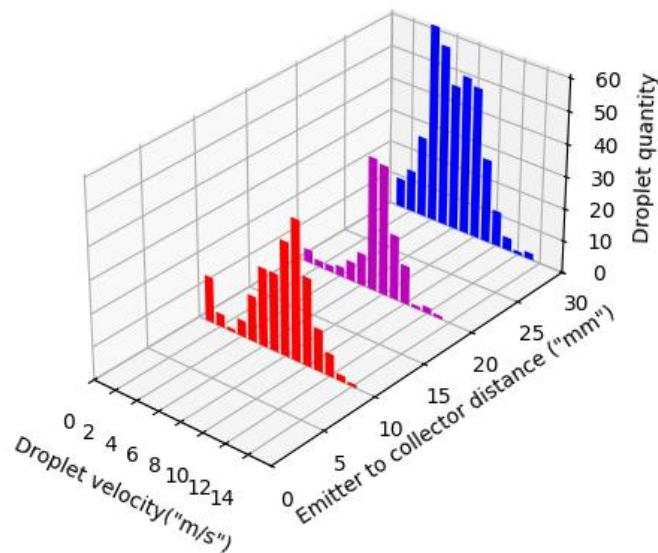
For this study, three distances from the tip of the emitter to the collector plate were used to observe the impact of this parameter. The distances were 10, 20 and 30 millimetres.

**Figure 9 – Droplet diameter and quantity by emitter to collector distance**



As it is possible to see in figure 9, as the distance gets larger, the particle's diameter stays constant with a slight increase in the average diameter. This is observed by the bigger dispersion of the quantity of droplets at 30 mm distance, having a bigger distribution above 15  $\mu\text{m}$  when compared to the other 2 graphics.

**Figure 10 – Droplet velocity and quantity by emitter to collector distance**



In terms of velocity, there is a more noticeable variation in figure 10, with a decrease as the distance gets longer. It is possible to notice this through a bigger distribution of droplets at a 30 mm distance, around 4-8 m/s, compared to the distribution of 7-9 m/s and 6-10 m/s, at the 20 mm and 10 mm distances, respectively.

### 3.4 Experimental Parameter Study

To better summarize the experimental parameter study conducted, the following table 2 presents the three parameters studied and the average values of droplet size and velocity given by the SpraySpy software.

Analysing the average values, it is noticeable that the emitter diameter presented the biggest influence on the particle size, with a total increase of 13  $\mu\text{m}$  on the average droplet size, from the 0.6mm to 2.1mm diameter. Meanwhile, the emitter to collector distance had a minor impact when compared to the previous parameter, with only a total variation of 3  $\mu\text{m}$ . The Flow rate had little influence on the size, which stayed constant until 10 mL/hr where there was only a 1  $\mu\text{m}$  decrease.

In terms of velocity, it is possible to observe a decrease in every average value obtained, with the flow rate having a bigger influence on the velocity, with a total variation of 3.5 m/s but a tendency to decrease the discrepancy of the values. The emitter diameter has a similar behaviour but a smaller total variation of only 1.5 m/s. In regard to the emitter to collector distance, the total variation of velocity is of 2.4 m/s but the behaviour is opposite to the other parameters, with a tendency to grow the discrepancy.

**Table 2 – Parameter Average Values**

Parameter	Droplet Size		Droplet Velocity	
Flow rate	Q=2.5 mL/hr	9 $\mu\text{m}$	Q=2.5 mL/hr	11.3 m/s
	Q=5 mL/hr	9 $\mu\text{m}$	Q=5 mL/hr	9.0 m/s
	Q=7.5 mL/hr	9 $\mu\text{m}$	Q=7.5 mL/hr	8.0 m/s
	Q=10 mL/hr	8 $\mu\text{m}$	Q=10 mL/hr	7.8 m/s
Emitter diameter	d=0.6 mm	4 $\mu\text{m}$	d=0.6 mm	9.0 m/s
	d=1.1 mm	9 $\mu\text{m}$	d=1.1 mm	8.0 m/s
	d=2.1 mm	17 $\mu\text{m}$	d=2.1 mm	7.5 m/s
Emitter to collector distance	L=10 mm	7 $\mu\text{m}$	L=10 mm	8.6 m/s
	L=20 mm	9 $\mu\text{m}$	L=20 mm	8.0 m/s
	L=30 mm	10 $\mu\text{m}$	L=30 mm	6.2 m/s

#### 4 CONCLUSION

In this work, it was possible to successfully create an electrohydrodynamic jet and examine the influence of three variable parameters: the flow rate, the emitter diameter and the emitter to collector distance. The phase doppler technique utilized by using the SpraySpy equipment allowed to adequately capture the distribution, velocity and size of the atomized droplets. With the information acquired, it was observed that the droplet velocity decreases with the increase of any of the parameters. Meanwhile, the droplet size stayed constant with a minor decrease with the increase of the flow rate and increased with the emitter diameter and distance to the collector.

Despite the results obtained, there was some difficulty on the variation of the liquid flow rate, due to the liquids properties. The challenge was to stabilize the cone-jet mode on the lower liquid flow rates, being that in the flow rate of 0.5 mL/hr there was no cone-jet formation at all.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by Project GreenAuto: Green Innovation for the Automotive Industry, grant number 02/C05-i01.02/2022.PC644867037-00000013, from the Incentive System to Mobilizing Agendas for Business Innovation, funded by the Recovery and Resilience Plan, and by the Portuguese Foundation for Science and Technology through the research unit C-MAST (Center for Mechanical and Aerospace Science and Technology), Research Unit No. 151, project grant numbers UIDB/00151/2020 and UIDP/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00151/2020>; <https://doi.org/10.54499/UIDP/00151/2020>).

## REFERENCES

- CÂNDIDO, S.; PÁSCOA, J. C. Dynamics of three-dimensional electrohydrodynamic instabilities on Taylor cone jets using a numerical approach. **Physics of Fluids**, v. 35, n. 5, 1 maio 2023.
- CÂNDIDO, S.; PÁSCOA, J. C. Data-driven surrogate modelling of multistage Taylor cone-jet dynamics. **Physics of Fluids**, v. 36, n. 5, 1 maio 2024.
- CHEN, D. R.; PUI, D. Y. H. Experimental investigation of scaling laws for electro spraying: Dielectric constant effect. **Aerosol Science and Technology**, v. 27, n. 3, p. 367–380, 1 set. 1997.
- CHIU, Y. H. et al. Mass spectrometric analysis of colloid thruster ion emission from selected propellants. **Journal of Propulsion and Power**, v. 21, n. 3, p. 416–423, 2005.
- CHIU, Y. H.; DRESSLER, R. A. Ionic liquids for space propulsion. **ACS Symposium Series**, 2007.
- CLOUPEAU, M.; PRUNET-FOCH, B. ELECTROSTATIC SPRAYING OF LIQUIDS IN CONE-JET MODE. **Journal of Electrostatics**, 22 (1989) 135-159.
- CLOUPEAU, M.; PRUNET-FOCH, B. ELECTROHYDRODYNAMIC SPRAYING FUNCTIONING MODES: A CRITICAL REVIEW. **J. Aerosol Sci.** Vol. 25, No. 6, pp. 1021-1036, 1994.
- DE LA MORA, J. F. The effect of charge emission from electrified liquid cones. **J. FluidMech.** vol. 243, pp. 561-574, 1992.
- DE LA MORA, J. F. The fluid dynamics of Taylor Cones. **Annual Review of Fluid Mechanics**, 2007.
- DE LA MORA, J. F.; LOSCERTALES, I. G. The current emitted by highly conducting Taylor cones. **J. Fluid Mech.** vol. 260, pp. 155-184, 1994.
- DENG, H. et al. Investigations and analysis of current modes and emission properties of emitters with different tip shapes for ionic liquid electro spray thrusters. **Acta Astronautica**, v. 214, p. 95–109, 1 jan. 2024.
- FENN, J. B. et al. Electro spray Ionization for Mass Spectrometry of Large Biomolecules. **Science**, 6 out. 1989.
- GAMERO-CASTAÑO, M.; MAGNANI, M. The minimum flow rate of electro sprays in the cone-jet mode. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 876, p. 553–572, 10 out. 2019.
- GAÑÁN-CALVO, A. M. et al. THE ELECTROSTATIC SPRAY EMITTED FROM AN ELECTRIFIED CONICAL MENISCUS. **J. Aerosol Sci.** Vol. 25, No. 6, pp. 1121-1142, 1994.
- GAÑÁN-CALVO, A. M. The nature and scaling laws of the surface charge in electrohydrodynamic spraying. **J. Aerosol Sci.** nov. 1998.



GAÑÁN-CALVO, A. M. On the general scaling theory for electrospraying. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 507, p. 203–212, 25 maio 2004.

GAÑÁN-CALVO, A. M. et al. Review on the physics of electrospray: From electrokinetics to the operating conditions of single and coaxial Taylor cone-jets, and AC electrospray. **Journal of Aerosol Science**, 1 nov. 2018.

GOMEZ, A.; TANG, K. Charge and fission of droplets in electrostatic sprays. **Physics of Fluids**, v. 6, n. 1, p. 404–414, 1994.

GRACE, J. M.; MARIJNISSEN, J. C. M. A REVIEW OF LIQUID ATOMIZATION BY ELECTRICAL MEANS. **J. Aerosol Sci.** Vol. 25. No. 6, pp. 1005-1019, 1994.

GUASTAFERRO, M. et al. Supercritical-CO<sub>2</sub>-Assisted Electrospray for the Production of the PLA-Antibiotic-Sustained Drug-Delivery System. **Processes**, v. 11, n. 10, 1 out. 2023.

GUO, L. et al. Experimental study of the influence of ink properties and process parameters on ejection volume in electrohydrodynamic jet printing. **Micromachines**, v. 9, n. 10, 16 out. 2018.

HAYATI, I.; BAILEY, A. I.; TADROS, TH. F. Investigations into the Mechanisms of Electrohydrodynamic Spraying of Liquids. **Journal of Colloid and Interface Science**, Vol. 117, No. 1, May 1987.

JAWOREK, A. Micro- and nanoparticle production by electrospraying. **Powder Technology**, 10 jul. 2007.

KIM, J. Y.; LEE, S. J.; HONG, J. G. Spray Mode and Monodisperse Droplet Properties of an Electrospray. **ACS Omega**, v. 7, n. 32, p. 28667–28674, 16 ago. 2022.

LENGUITO, G.; GOMEZ, A. Pressure-driven operation of microfabricated multiplexed electrosprays of ionic liquid solutions for space propulsion applications. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 23, n. 3, p. 689–698, 2014.

MAKTABI, S.; CHIAROT, P. R. Electrohydrodynamic printing of organic polymeric resistors on flat and uneven surfaces. **Journal of Applied Physics**, v. 120, n. 8, 28 ago. 2016.

MELCHER, J. R.; TAYLOR, G. I. ELECTROHYDRODYNAMICS: A REVIEW OF THE ROLE OF INTERFACIAL SHEAR STRESSES. **Annu. Rev. Fluid Mech.** 1969.

MIAO, P. et al. Formation of Ceramic Thin Films Using Electrospray in Cone-Jet Mode. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, vol. 38, no. 1, january/february 2002.

MORAIS, A. Í. S. et al. Fabrication of polymeric microparticles by electrospray: The impact of experimental parameters. **Journal of Functional Biomaterials**, 1 mar. 2020.

OLUMEE, Z.; CALLAHAN, J. H.; VERTES, A. Droplet dynamics changes in electrostatic sprays of methanol - Water mixtures. **Journal of Physical Chemistry A**, v. 102, n. 46, p. 9154–9160, 12 nov. 1998.

PENDAR, M. R. et al. Review of coating and curing processes: Evaluation in automotive industry. **Physics of Fluids**, 1 out. 2022.

RICHARDSON, S. M. et al. Mesenchymal stem cells in regenerative medicine: Opportunities and challenges for articular cartilage and intervertebral disc tissue engineering. **Journal of Cellular Physiology**, jan. 2010.

ROSELL-LLOMPART, J.; GRIFOLL, J.; LOSCERTALES, I. G. Electrostatic sprays in the cone-jet mode: From Taylor cone formation to spray development. **Journal of Aerosol Science**, 1 nov. 2018.

SIJS, R. et al. Drop size measurement techniques for sprays: Comparison of image analysis, phase Doppler particle analysis, and laser diffraction. **AIP Advances**, v. 11, n. 1, 1 jan. 2021.

SULTAN, F.; ALLAF-AKBARI, E.; ASHGRIZ, N. Effects of a Coflowing Air on the Characteristics of an Electrostatic Spray. **Aerosol Science and Engineering**, v. 4, n. 3, p. 210–218, 1 set. 2020.

TANG, K.; GOMEZ, A. On the structure of an electrostatic spray of monodisperse droplets. **Physics of Fluids**, v. 6, n. 7, p. 2317–2332, 1994.

TAYLOR, G. Disintegration of water drops in an electric field. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 280, n. 1382, p. 383–397, 28 jul. 1964.

THUPPUL, A. et al. Mass flux and current density distributions of electrostatic spray plumes. **Journal of Applied Physics**, v. 130, n. 10, 14 set. 2021.

YU, M.; AHN, K. H.; LEE, S. J. Design optimization of ink in electrohydrodynamic jet printing: Effect of viscoelasticity on the formation of Taylor cone jet. **Materials and Design**, v. 89, p. 109–115, 5 jan. 2016.

ZELENY, J. INSTABILITY OF ELECTRIFIED LIQUID SURFACES. **The Physical Review**, 1917.

ZELENY, J. ELECTRICAL DISCHARGES FROM POINTED CONDUCTORS. **The Physical Review**, 1920.

# **OPTIMIZATION OF ELECTROSPRAY PERFORMANCE USING DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA ACTUATORS: AN EXPERIMENTAL STUDY ON DIFFERENT OPERATION MODES**

MOREIRA, MIGUEL (1); NUNES, GUSTAVO (2); RODRIGUES, FREDERICO (3); PÁSCOA, JOSÉ (4)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: miguel.andre.moreira@ubi.pt

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail:  
gustavo.camacho.nunes@ubi.pt

(3) Universidade da Beira Interior, E-mail: fmfr@ubi.pt

(4) Universidade da Beira Interior, E-mail: pascoa@ubi.pt

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: miguel.andre.moreira@ubi.pt

## **RESUMO**

Os actuadores a plasma de barreira dielétrica de descarga (DBD) são dispositivos electrónicos que ganharam uma atenção significativa nos últimos anos devido às suas aplicações no controlo activo de escoamentos, que são essenciais em várias aplicações, desde a espectrometria de massa aos sistemas de propulsão. Este artigo explora o impacto do escoamento adjacente dos actuadores a plasma DBD no desempenho de um electrospray. Através do uso destes dispositivos pretendemos otimizar o processo de electrospray em vários modos, melhorando a estabilidade e a eficiência, bem como aumentando o número de gotículas, a velocidade e a sua distribuição.

Foi utilizada uma abordagem experimental para avaliar a influência do actuador de plasma DBD nos parâmetros essenciais do electrospray. Foi utilizado um sistema de anemometria Phase Doppler (PDA) para obter dados acerca das propriedades do electrospray para avaliar o desempenho da atomização por pulverização, tais como a distribuição do tamanho das gotas, a velocidade e o número de gotas. Foi investigada uma configuração cónica do escoamento adjacente dos actuadores DBD para determinar a sua eficácia na manipulação do campo eléctrico e das características do escoamento de ar do electrospray.

Os resultados demonstram que o escoamento adjacente dos actuadores de plasma DBD afecta significativamente o processo de electrospray. As conclusões deste estudo fornecem uma base para a concepção de actuadores a plasma DBD para aplicações mais específicas no campo

do electrospray. Abrindo caminho para melhores avanços de electrospray nos campos da deposição de partículas, revestimento de superfícies, processos de fabrico e atomização, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de electrospray mais eficientes.

**Palavras-chave:** Actuadores a plasma de Barreira Dielétrica de Descarga (DBD, Electrospray, Electrohidrodinâmica, Cone de Taylor

## ABSTRACT

Dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators are electronic devices which have gained significant attention in recent years for their active flow control applications, which are essential in several applications ranging from mass spectrometry to propulsion systems. This paper explores the impact of the DBD plasma actuators adjacent flow on electrospray performance. Through the use of these devices, we aim to optimize the process of electrospray in various modes improving the stability and efficiency as well as increasing the droplet number, velocity and distribution.

An experimental approach was used in order to evaluate the influence of the DBD plasma actuator on key parameters for electrospray. A Phase Doppler Anemometer (PDA) system was used in order to obtain critical electrospray data to evaluate the spray atomization performance such as droplet size distribution, droplet velocity and droplet number. A conical configuration for the DBD plasma actuators adjacent flow was investigated to determine their effectiveness in manipulating the electric field and airflow characteristics of the electrospray.

The results demonstrate that the DBD plasma actuators adjacent flow significantly affect the electrospray process. The findings of this study provide a foundation for designing DBD plasma actuators for more specific electrospray applications. Paving the way for improved electrospray advancements on the fields of particle deposition, coating of surfaces, fabrication processes and atomization, contributing to the development of more efficient electrospray systems.

**Keywords:** Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators, Electrospray, Electrohydrodynamic, Taylor cone

## 1 INTRODUCTION

Electrospray technology, which generates fine aerosol droplets using electrostatic forces, has gained widespread attention for its diverse applications in science and industry. At the core of this process is the Taylor cone phenomenon, a fluid dynamic mechanism critical for droplet formation. The origins of electrospray date back to 1882 when Lord Rayleigh studied the instability of charged droplets and later by Zeleny [1,2]. However, it was Sir Geoffrey Taylor's work in the 1960s [3] that provided the theoretical framework for the conical shape formation under an electric field, now known as the Taylor cone. Taylor's contributions laid

the foundation for electrospray ionization (ESI), which transformed mass spectrometry [4,5] in the late 1980s by enabling the ionization of large biomolecules without fragmentation, preserving their structural integrity for analysis.

In the electrospray process, a high-voltage electric field is applied to a liquid, forming a Taylor cone [6-10]. Electrostatic forces at the cone's tip overcome surface tension, producing a jet of charged droplets [11-15]. These droplets then break into smaller ones due to Rayleigh instability, forming a fine aerosol. Key factors influencing the process include the liquid's viscosity, conductivity, surface tension, the flow rate, and the electric field strength.

Electrospray technology has broad applications across multiple fields such as in material science [16-18] and manufacturing processes [19-21] in analytical chemistry, ESI is an indispensable tool in mass spectrometry, allowing the analysis of complex biomolecules, such as proteins and peptides, with high sensitivity. This capability has facilitated breakthroughs in proteomics and metabolomics. In the pharmaceutical industry, electrospray is used for drug delivery and formulation, producing fine aerosol droplets that create uniform drug particles, enhancing bioavailability and therapeutic effectiveness [22-24].

An important tool is phase Doppler anemometry (PDA), which measures droplet size and velocity by analyzing the phase shift of scattered light. This non-intrusive method provides accurate data essential for optimizing electrospray parameters [25].

The focus of this research is to investigate the impact of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators on electrospray behavior. Plasma actuators, known for their potential in active flow control [26,27] and deicing [28-32], are integrated near the electrospray region to enhance droplet control, stability, and uniformity. The study involves comparing electrospray processes with and without plasma influence [33,34], utilizing PDA for detailed characterization.

Through visualization, precise measurements, and comparative analysis, this study will provide insights into the benefits and limitations of plasma-assisted electrospray, with the potential to enhance performance and expand its applications in various scientific and industrial fields.

## **2 EXPERIMENTAL SETUP**

The experimental setup for studying electrospray and Taylor cone phenomena is crucial for ensuring accurate and reproducible results. This setup includes systems for liquid delivery, high-voltage application and droplet measurement, alongside the integration of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators to assess their influence on the electrospray process as in Figure 1 below.

## Figure 1 – Experimental setup

Ethanol was chosen for its low surface tension and moderate conductivity, which support stable electrospray formation. A steady flow rate of 10 mL/h was maintained using the "InfusionONE NE-300" mass flow controller, ensuring precise ethanol delivery for consistent electrospray behavior.

The electrospray emitter, with a 2.1 mm outer diameter and 0.1 mm wall thickness, was optimized to generate a stable Taylor cone and uniform spray. The emitter-to-collector distance (L) was set at 20 mm to balance droplet collection and spray stability, minimizing both coalescence and excessive dispersion.

A "Lab Mate" DC high-voltage power supply controlled the electric field, ranging from 4.4 kV to 6.65 kV. Two voltage ranges were studied:

**Stable Cone-Jet Mode (5.6-6.2 kV):** Produces a stable, single jet with a well-defined Taylor cone, ideal for precise droplet control.

**Multi-Jet Mode (6.5-7.1 kV):** Characterized by multiple jets and increased droplet dispersion, providing insights into the limits of electrospray stability.

A phase Doppler anemometry (PDA) system, "SpraySpy Labline LL550," was used to measure droplet size, velocity, and distribution. Measurements were taken 10 mm below the emitter to capture larger droplets and ensure accuracy. Each experiment involved capturing 200 droplets to represent the electrospray's steady-state behavior.

## **Figure 2 – Electropray setup with DBD plasma actuator coupler**

A 3D-printed coupler and cone nozzle with a 4mm opening were designed to integrate DBD plasma actuators into the setup as in Figure 2 above. The actuators were made using PIB rubber for its dielectric properties and copper tape electrodes. The actuators measured 0.5 mm in thickness, 70 mm in length, and 30 mm in width. A high-voltage, high-frequency power source "PVM 500" powered the plasma, while a "PicoScope 5443A" digital oscilloscope monitored the signals.

Electrical characterization of the DBD plasma actuators involved measuring power consumption. The mechanical characterization was conducted using a Pitot tube placed 15 mm from the plasma origin to measure the velocity profile of the ionic wind generated by the plasma, providing insights into its effect on the electropray dynamics.

This experimental setup offers a comprehensive approach to studying the interaction between electropray and DBD plasma actuators, enabling detailed analysis of droplet formation, stability, and control.

### **3 RESULTS AND DISCUSSION**

This section outlines the experimental findings from characterizing the electropray process, focusing on the role of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators. The analysis covers electrical and mechanical behavior and droplet characterization using phase Doppler anemometry (PDA).

#### **3.1 DBD PLASMA ACTUATOR CHARACTERIZATION**

Electrical testing revealed that the DBD plasma actuator consumes minimal power, peaking at approximately 4W at the highest applied voltage shown in Figure 3 below. This low power consumption, coupled

with potential enhancements to electrospray performance, makes the actuator a viable and energy-efficient tool for industrial applications.

**Figure 3 – Power consumption for the DBD plasma actuator**

Mechanical characterization shown in Figure 4 below showed that the actuator generated ionic wind velocities up to 4 m/s at maximum voltage, with significant airflow even at lower voltages, suggesting its strong potential to influence electrospray dynamics.

**Figure 4 – Velocity profiles for DBD plasma actuator**



### 3.2 PHASE DOPPLER ANEMOMETRY

PDA tests were conducted to measure droplet size and velocity. At a stable cone-jet mode (6.2 kV), varying the plasma actuator voltage from 3 kVpp to 9 kVpp revealed trends in droplet formation as can be seen in Table 1 below. As actuator voltage increased, droplet velocity generally rose, with a slight increase in droplet size beginning at 4 kVpp. This effect can be observed in Figures 5 to 7 below.

**Table 1 – Electropray properties for 6.2kV of electropray voltage**



**Figure 5 – Distribution of droplet diameter for 6.2kV of electropray voltage along the different DBD plasma actuator voltages**

**Figure 6 – Distribution of droplet velocity for 6.2kV of electro spray voltage  
along the different DBD plasma actuator voltages**

The ionic wind from the plasma actuators promoted faster droplet formation and improved stability, leading to smaller and more uniform droplets. Additionally, the plasma stabilized the Taylor cone, reducing instability and enhancing spray precision.

**Figure 7 – Distribution of time cycles for 6.2kV of electro spray voltage  
along the different DBD plasma actuator voltages**

Further testing at different electro spray voltages, with a fixed actuator voltage of 5 kVpp, confirmed that plasma influence increased droplet size and velocity across most conditions as can be seen in Table 2. Plasma-assisted electro spray also resulted in faster stabilization cycles, improving overall system efficiency. Notably, plasma actuation stabilized the transition between electro spray modes, allowing greater control over droplet behavior. In multi-jet mode, plasma actuation decreased jet dispersion and improved spray control as can be seen in Figures 8 to 13 below.

**Table 2 – Electro spray properties for 5kVpp of DBD plasma actuator voltage**

**Figure 8 – Distribution of droplet diameter for 0kVpp of DBD plasma actuator voltage along the different electro spray voltages**

**Figure 9 – Distribution of droplet velocity for 0kVpp of DBD plasma actuator voltage along the different electro spray voltages**

**Figure 10 – Distribution of time cycles for 0kVpp of DBD plasma actuator voltage along the different electro spray voltages**

The DBD plasma actuators significantly enhanced the electrospray process by improving droplet size uniformity, increasing velocity, and accelerating stabilization. The introduction of plasma also allowed earlier and more stable transitions between electrospray modes, offering finer control over the process.

**Figure 11 – Distribution of droplet diameter for 5kVpp of DBD plasma actuator voltage along the different electrospray voltages**

**Figure 12 – Distribution of droplet velocity for 5kVpp of DBD plasma actuator voltage along the different electrospray voltages**

**Figure 13 – Distribution of time cycles for 5kVpp of DBD plasma actuator voltage along the different electro spray voltages**

The integration of DBD plasma actuators into electro spray systems leads to energy-efficient enhancements, including better droplet control and faster stabilization. These findings suggest that plasma-assisted electro spray could significantly advance precision applications. Future research should explore optimization of actuator design and placement, as well as the effects of different fluids and environmental conditions, to further improve the electro spray process.

## 4 CONCLUSION

This research explored the integration of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators with electrospray technology to improve droplet control, stability, and uniformity.

The experimental setup utilized high-voltage applications and phase Doppler anemometry (PDA) to assess droplet characteristics. Plasma actuators notably influenced the electrospray process, stabilizing the Taylor cone and jet, especially at higher voltages. Characterization of the plasma actuators revealed low power consumption and substantial ionic wind velocities, confirming their efficiency in enhancing the electrospray process without significant operational costs.

PDA measurements confirmed that plasma actuation resulted in smaller, more uniform droplets by efficiently breaking up the liquid jet. The Taylor cone remained stable at higher voltages, and jet dispersion was reduced in multi-jet mode, improving overall spray precision.

In summary, this study demonstrated that DBD plasma actuators significantly enhance electrospray performance, making them valuable for applications in analytical chemistry, pharmaceuticals, biotechnology, and materials science. Plasma-assisted electrospray offers improved particle control and stability, highlighting its potential for future innovations in the field.

## REFERENCES

1. Zeleny, J., Instability of Electrified Liquid Surfaces. **Physical Review**, 1917. 10(1): p. 1-6.
2. Zeleny, J., Electrical Discharges from Pointed Conductors. **Physical Review**, 1920. 16(2): p. 102-125.
3. Taylor, G.I., Disintegration of water drops in an electric field. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, 1964. 280(1382): p. 383-397.
4. Chiu, Y.-H., et al., Mass Spectrometric Analysis of Colloid Thruster Ion Emission from Selected Propellants. **Journal of Propulsion and Power**, 2005. 21(3): p. 416-423.
5. GaÑÁN-Calvo, A.M., J.M. LÓPEZ-Herrera, and P. Riesco-Chueca, The combination of electrospray and flow focusing. **Journal of Fluid Mechanics**, 2006. 566: p. 421-445.
6. Cloupeau, M. and B. Prunet-Foch, Electrostatic spraying of liquids: Main functioning modes. **Journal of Electrostatics**, 1990. 25(2): p. 165-184.
7. Gan, Y., et al., Electric field and spraying characteristics of electrospray using concave ground electrode. **Journal of Electrostatics**, 2022. 115: p. 103662.
8. Wortmann, A., et al., Shrinking Droplets in Electrospray Ionization and Their Influence on Chemical Equilibria. **Journal of the American Society for Mass Spectrometry**, 2007. 18(3): p. 385-393.

9. Cruz-Mazo, F., et al., Aerodynamically stabilized Taylor cone jets. **Physical Review E**, 2019. 100(3): p. 031101.
10. Rosell-Llompart, J., J. Grifoll, and I.G. Loscertales, Electrosprays in the cone-jet mode: From Taylor cone formation to spray development. **Journal of Aerosol Science**, 2018. 125: p. 2-31.
11. S. Karbarz, A.Z., and R. Holyst, From the cone-jet to the multi-jet mode in electrospinning: A direct electrical evidence of a change in the dynamics of the electrospinning process. **Journal of the American Chemical Society** **128**, 5222-5229, 2006.
12. Scheideler, W.J. and C.-H. Chen, The minimum flow rate scaling of Taylor cone-jets issued from a nozzle. **Applied Physics Letters**, 2014. 104(2).
13. Wang, Q., et al., Experimental study on electrohydrodynamic atomization (EHDA) in stable cone-jet with middle viscous and low conductive liquid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2021. 121: p. 110260.
14. Wang, Z., et al., An experimental investigation on cone-jet mode in electrohydrodynamic (EHD) atomization. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2020. 114: p. 110054.
15. M. Moreira, F. Rodrigues, J. Páscoa, "Developments in Taylor Cone Formation: Operation and Testing of Different Liquids", Fluids Engineering Division Summer Meeting 2024 no. FEDSM2024- 130431
16. Guo, L., et al., Experimental Study of the Influence of Ink Properties and Process Parameters on Ejection Volume in Electrohydrodynamic Jet Printing. **Micromachines** (Basel), 2018. 9(10).
17. Jaworek, A., Micro- and nanoparticle production by electro spraying. **Powder Technology**, 2007. 176(1): p. 18-35.
18. Morais Alí, S., et al., Fabrication of Polymeric Microparticles by Electro spray: **The Impact of Experimental Parameters**. *J Funct Biomater*, 2020. 11(1).
19. Cândido, S., M.-R. Pendar, and J. Páscoa, Improving Efficiency of Automotive Coating and Curing Processes Through Deep Learning Algorithms and High-Fidelity CFD Modeling. 2023.
20. Pendar, M., et al., Review of Coating and Curing Processes: Evaluation in Automotive Industry. **Physics of Fluids**, 2022.
21. Pendar, M.-R., S. Cândido, and J.C. Páscoa, Optimization of painting efficiency applying unique techniques of high-voltage conductors and nitrotherm spray: Developing deep learning models using computational fluid dynamics dataset. **Physics of Fluids**, 2023. 35(7): p. 075119.
22. Huang, J., V. Koutsos, and N. Radacsi, Low-cost FDM 3D-printed modular electro spray/electrospinning setup for biomedical applications. **3D Printing in Medicine**, 2020. 6(1): p. 8.
23. Huang, M.-Z., et al., Characterization of the chemical components on the surface of different solids with electro spray-assisted laser desorption ionization mass spectrometry. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, 2007. 21(11): p. 1767-1775.
24. Venter, P.B., et al., Analysis of commercial proanthocyanidins. Part 3: The chemical composition of wattle (*Acacia mearnsii*) bark extract. **Phytochemistry**, 2012. 83: p. 153-167.



25. Bachalo, W.D., The Phase Doppler Method: Analysis and Application, in Optical Particle Sizing: Theory and Practice, **G. Gouesbet and G. Gréhan**, Editors. 1988, Springer US: Boston, MA. p. 283-299.
26. Benmoussa, A. and J.C. Páscoa, Performance improvement and start-up characteristics of a cyclorotor using multiple plasma actuators. **Meccanica**, 2021. 56(11): p. 2707-2730.
27. Rodrigues, F.F., M. Moreira, and J. Pascoa, Analysis and Implementation of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Ground Vehicles Wake Reduction. 2021.
28. Rodrigues, F.F., et al., Influence of Exposed Electrode Thickness on Plasma Actuators Performance for Coupled Deicing and Flow Control Applications. 2021.
29. Rodrigues, F., et al., An Experimental Study on Segmented-Encapsulated Electrode Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator for Mapping Ice Formation on a Surface: A Conceptual Analysis. **Journal of Heat Transfer**, 2020. 143(1).
30. Moreira, M., et al. Development of a Background-Oriented Schlieren (BOS) System for Thermal Characterization of Flow Induced by Plasma Actuators. **Energies**, 2023. 16, DOI: 10.3390/en16010540.
31. Liu, Y., et al., A comparison study on the thermal effects in DBD plasma actuation and electrical heating for aircraft icing mitigation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2018. 124: p. 319-330.
32. Abdollahzadeh, M., F. Rodrigues, and J.C. Pascoa, Simultaneous ice detection and removal based on dielectric barrier discharge actuators. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2020. 315: p. 112361.
33. Bao, M., et al., Plasma-Excited Nebulizer Gas-Assisted Electrospray Ionization: Enhancing the Sensitivity of Pesticide in Mass Spectrometry. **Analytical Chemistry**, 2023. 95(40): p. 14842-14852.
34. Hashimoto, K., H. Takehara, and T. Ichiki, Plasma-assisted electrospray deposition of thin elastomer films. **Japanese Journal of Applied Physics**, 2019. 58(SD): p. SDDK04.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Project GreenAuto: Green Innovation for the Automotive Industry, n° 02/C05- i01.02/2022.PC644867037-00000013 from the Incentive System to Mobilizing Agendas for Business Innovation, funded by the Recovery and Resilience Plan. Additional support was provided by the Portuguese Foundation for Science and Technology, I.P. (FCT, I.P.) FCT/MCTES through national funds (PIDDAC), under the R&D Unit C-MAST/Center for Mechanical and Aerospace Science and Technologies, reference: Projects UIDB/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00151/2020>) and UIDP/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/00151/2020>)



## **RING PLASMA ACTUATORS FOR CONTROLLING THE METHANE/AIR FLAME IN A NON-PREMIXED BLUFF BODY BURNER**

BAGHERIGHAJARI, F. (1); PASCOA, J.C. (2);  
ABDOLLAHZADEHSANGROUDI, M. (3)

(1,2,3) UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELETROMECAÂNICA, C-MAST, COVILHÃ, PORTUGAL, E-MAIL:

[F.BAGHERIGHAJARI@UBI.PT](mailto:F.BAGHERIGHAJARI@UBI.PT), [PASCOA@UBI.PT](mailto:PASCOA@UBI.PT),  
[MM.ABDOLLAHZADEH@UBI.PT](mailto:MM.ABDOLLAHZADEH@UBI.PT)

### **ABSTRACT**

*The combustion efficiency and flame stability of conventional combustion systems must be improved in order to aid the reduction of carbon emissions and also achieve more efficient sustainable energy systems. In this regard, electrohydrodynamic plasma actuators provide an active method that could alter and control flame characteristics in an efficient manner. In this paper, a numerical simulation of the influence of using a ring-type plasma actuator on the co-flow air side of a non-premixed turbulent methane/air combustion is performed. The influence of the plasma actuator on the reacting flow field inside the burner is analyzed. The influence of the plasma actuator on the flow and flame structure is presented using velocity and temperature contours along with flow streamlines.*

**Keywords:** *Flame stabilization, flow control, enhanced combustion, numerical simulation.*

### **RESUMO**

A eficiência da combustão e a estabilidade da chama dos sistemas de combustão convencionais devem ser melhorados para ajudar a reduzir as emissões de carbono e também para obter sistemas energéticos sustentáveis mais eficientes. A este respeito, os actuadores de plasma electrohidrodinâmicos constituem um método ativo que pode alterar e controlar as características da chama de uma forma eficiente. Neste trabalho, foi efectuada uma simulação numérica da influência da utilização de um atuador de plasma do tipo anel no lado do co-fluxo de ar de uma combustão turbulenta não pré-misturada de metano/ar. A influência do atuador de plasma nos campos de escoamento no interior do queimador é analisada. A influência do atuador de plasma no escoamento e na estrutura da chama é apresentada utilizando contornos de velocidade e temperatura, juntamente com as linhas de fluxo.

**Palavras-chave:** *Estabilização da chama, controlo do fluxo, combustão melhorada, simulação numérica.*

## 1 INTRODUCTION

The urgent need to combat global warming and climate change has driven global efforts towards significantly reducing atmospheric emissions. A major contributor to these emissions is the combustion of hydrocarbon fossil fuels, which releases large quantities of carbon dioxide and other greenhouse gases into the atmosphere. These emissions from combustion systems not only exacerbate environmental issues but also pose challenges to energy efficiency and sustainability. To mitigate these negative effects, the development of more efficient combustion systems and the exploration of alternative green fuels are imperative. One of the key challenges in improving combustion efficiency lies in addressing the inherent inefficiencies associated with the turbulent mixing of fuel and oxidant, particularly in non-premixed combustion systems. Ineffective mixing can lead to incomplete combustion, higher emissions of pollutants, and reduced energy output. To overcome these challenges, various flow control techniques have been explored, categorized broadly into passive and active methods.

Active flow control methods have garnered significant attention due to their dynamic adaptability and potential to enhance combustion processes in real-time. Among these, surface dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators have emerged as a promising tool for flame and combustion control<sup>[1,2]</sup>. These actuators are advantageous due to their lack of mechanical components, rapid response times, low energy consumption, and the ability to be applied locally where needed<sup>[3]</sup>. DBD plasma actuators consist of one exposed and one grounded/embedded electrodes separated by a dielectric material placed asymmetrically on either side of the dielectric layer, with a high-voltage waveform typically applied to the exposed electrode while the grounded electrode remains at electrical ground. When a sufficiently high voltage with the appropriate frequency is applied, the air adjacent to the actuator surface becomes ionized. This ionized region experiences a force due to the electric field, which accelerates the ionized air, generating what is known as an "ionic wind"<sup>[4]</sup>.

The application of ionic wind for flow control has been explored in a variety of contexts, from aerospace to combustion systems. Chen and Liao<sup>[2]</sup> experimentally investigated flow interactions downstream of a bluff-body burner incorporated with an annular plasma actuator. Qingya et al.<sup>[5]</sup> conducted an experimental study on the influence of DBD plasma actuator on the diffusion flame combustion characteristics. Wang and Roy<sup>[6]</sup>, conducted a numerical simulation of the combustion stabilization and manipulation of the recirculation zones inside a gas turbine combustor using serpentine plasma actuators. The geometry and operating parameters of the plasma actuator, such as the electrode configuration and applied voltage, can be tailored to optimize flow control effects for specific applications. In combustion systems, particularly those involving non-premixed flames, the ability to manipulate the flow field and enhance mixing through plasma actuators holds

significant promise for improving combustion efficiency and reducing emissions.

In this study, we focus on a numerical analysis of the influence of a ring plasma actuator placed in the air co-flow stream of a non-premixed bluff body burner. The ring configuration of the actuator is investigated for its potential to induce controlled perturbations in the flow field, thereby enhancing the mixing of methane and air in the combustion zone. The objective is to assess the efficacy of this configuration in achieving more stable and efficient combustion, with implications for reducing harmful emissions and advancing cleaner combustion technologies.

## 2 METHODOLOGY

### 2.1 Governing equations of the fluid dynamics

Assuming that the flow is steady state, incompressible, viscous, and single-phase, also assuming that the surface DBD plasma actuator only shows the aerodynamic effect and ignoring the effect of gravity, the continuity, momentum, and energy equations are expressed as follows [7,8] :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_i' u_j') + f_{b,i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_k h_k J_{k,j} \right) + S_h + S_r \quad (3)$$

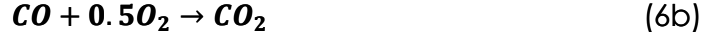
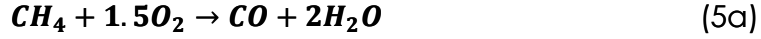
In Eq. (2), the volumetric force caused by the plasma drive is represented by  $f_b$ . In the above equations,  $J_{k,j}$  represents the diffusion flux of species  $k$ :

$$J_{k,j} = - \left( \rho D_{m,k} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} - D_{T,k} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (4)$$

In Equation (3),  $S_h$  represents the source of energy due to chemical reaction and  $S_r$  represents the heat losses due to thermal radiation. The discrete ordinates (DO) radiation model is used for estimating thermal radiation losses. In equation (2), the Reynolds stresses  $-\rho u_i' u_j'$  and in Equation (4), the effective thermal conductivity coefficient  $K_{eff} = K + K_t$ . Is modelled using the standard  $k - \varepsilon$  model is used.

## 2.2 Combustion modeling

To simulate the combustion process of methane and air, a simplified two-step reaction of methane and air has been used for this study, which is as follows:



Assuming that the chemical reaction takes place in the following form:

$$\sum_N^{k=1} v'_{k,r} \chi_k \rightarrow \sum_N^{k=1} v''_{k,r} \chi_k \quad (7)$$

The species transport equation for this model is expressed as follows:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_k) = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{k,i} + R_k, k = \text{CH}_4, \text{O}_2, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} \quad (8)$$

It is also assumed that chemical kinetics is much faster than turbulent mixing, so the reaction rate is controlled by turbulent mixing and turbulence-chemistry interaction is considered using the eddy-dissipation model where the net rate of production or consumption of  $k$ th species in the  $r$ th reaction is calculated from the following relation [7,8]:

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}_{k,r} \\ &= \min(v'_{k,r} M_{w,k} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right), v'_{k,r} M_{w,k} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\sum_P Y_R}{\sum_j^N v'_{j,r} M_{w,j}} \right)) \end{aligned} \quad (9)$$

In the above equation,  $A$  and  $B$  are experimental coefficients with values of 0.4 and 0.5.

## 2.3 Phenomenological model of the plasma actuator

To model the flow control effect of the plasma actuator, a body force term is added to the momentum equation. To calculate this body force, term the model proposed by the Suzen et al [9] is adapted here. In this model two equation are solved for the electrical potential  $\phi$  and the charge the density  $\rho_c$  respectively:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \rho_c) = \frac{\rho_c}{\lambda_d^2} \quad (11)$$

In the above equation,  $\varepsilon_r$  is the relative permittivity and the  $\lambda_d$  is the Debye length. These equations are solved using proper boundary conditions for the electric potential and the charge density. The alternating voltage is applied to the exposed electrode and the embedded electrode is assumed to be grounded. At the interface of the dielectric layer and the

fluid zone above the embedded electrode, a time varying spatial distribution is considered for the charge density:

$$\phi_{electrode}(t) = \phi_{max}f(t) \quad (12)$$

$$\rho_{c,w}(x, t) = \rho_{c,max}G(x)f(t) \quad (13)$$

In the above equation, the maximum value of the charge density and electric potential are given by  $\phi_{max}$ , and  $\rho_{c,max}$ . In addition the temporal and spatial distribution of the charge density are given by the functions  $G(x)$  and  $f(t)$ . Suzen Huang proposed using a half Gaussian profile for the spatial distribution of the charge density as follows:

$$G(x) = \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (14)$$

In the above function,  $\sigma$  controls the slope of the decay rate of the charge density at the dielectric interface and  $\mu$  controls the location of the maximum charge. The temporal variation of the charge density is assumed to be similar to the wave form of the applied voltage. For a sine wave form the  $f(t)$  can be assumed as:

$$f(t) = \sin(2\pi ft) \quad (15)$$

In the above  $f$  presents the frequency of the applied voltage. The body force term (force per unite volume) can then be calculated as:

$$\vec{f}_b = \rho_c \times \vec{E} \quad (16)$$

Where  $\vec{E}$  is the electric field vector calculated as  $\vec{E} = -\nabla\phi$ . Equations (10) and (11) can be normalized using the maximum values of the applied voltage and charge density and along with the temporal profile  $f(t)$  as follows:

$$\phi^* = \frac{\phi}{\phi_{max}f(t)}, \rho_c^* = \frac{\rho_c}{\rho_{c,max}f(t)} \quad (17)$$

Using the above definition, the boundary conditions (12) and (13) will be simplified to

$$\phi_{electrode} = 1, \rho_{c,w}(x) = G(x) \quad (18)$$

This will allow to solve the Equations (10) and (11) in a steady manner. If we analyze the definition of the body force, we will see that its magnitude mostly depends on the  $\phi_{max}$ ,  $\rho_{c,max}$  and these two parameters can be used to control the plasma body force strength. Previous experiments had shown that the plasma body force or plasma induced velocity has a nonlinear variation with the applied voltage magnitude. To integrate this effect, the correct scale of the charge density must be considered. Following Abdollahzadeh et al. [10], scaling the charge density can be achieved using analytical or semi-empirical estimation of the plasma

induced Thrust (force). Assuming that the plasma is formed in a region with the length of the  $l_p$  and height of  $h_p$  and width of  $L$ , we have:

$$|f_b| \sim \frac{T/L}{l_p h_p} \quad (19)$$

On the other hand, the plasma body force depends on  $\phi_{max}$  (or the maxim electric field  $E_{max}$ ) and  $\rho_{c,max}$ , thus

$$\rho_{c,max} \sim \frac{T/L}{\phi_{max} l_p h_p} = \chi \frac{T/L}{E_{max} L l_p h_p} \quad (20)$$

Now the estimation of the  $\rho_{c,max}$  depends on the estimation of the thrust  $T$ , maximum electric field  $E_{max}$  and the constant  $\chi$ . We know also that from the experiments that plasma only forms when the applied voltage is sufficiently larger than the plasma ignition voltage  $V_0$ . This means that the thrust and the maxim charge density are dependent to the  $(\phi_{max} - V_0)$ . In other words charged particles are produced and accumulated when the  $\phi_{max} > V_0$ . The plasma actuator can be modelled by an equivalent capacitance and the thrust produced by the plasma actuator can be related to the energy consumption of the actuator when plasma is formed  $\phi_{max} > V_0$ . According to Yoon et al [11], an equivalent circuit composed by two capacitors,  $C_1$  and  $C_2$  in series is considered with the capacitances defined as follows:

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (21)$$

$$\frac{C_1}{L} = \frac{\pi \epsilon_d \epsilon_0}{\ln \frac{2t_d + 0.5t_e}{0.5t_e}} \quad (22)$$

$$\frac{C_2}{L} = \frac{\epsilon_0 A}{t_d} \quad (23)$$

$$A = \frac{\alpha_2 k_2 \left(\frac{f}{1000}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{V}{V_0} - 1\right)}{\ln \frac{2t_d + 0.5t_e}{0.5t_e}} \left( \ln \frac{0.5t_e}{r_{pl}} - \ln \frac{0.5t_e}{\sqrt{r_{pl}^2 + (2t_d + t_e)^2}} \right)$$

In the above equation  $\alpha_2$  depends on the wave form. For an AC sinusoidal voltage, it will be equal to unity. For a saw tooth it will have the value equal to 0.66 and for it will have the value equal to 2. For equivalent of capacitance of  $C_{eq}$ . Yoon et al assumed that the thrust produced by the plasma actuator to be proportional to power consumption. He had developed the flowing semi-empirical relation for the thrust produced by the actuator:

$$\frac{T}{L} = k_1 (2\pi f)^{\alpha_1} C_{eff} \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)^2 V^2 \quad (24)$$

Although the above equation provides a very good estimation of the net thrust generated by the plasma actuator, that is the net effect of the plasma body force and the shear stress acting on the fluid [12]. To account for the shear stress that acts on the parcel of the fluid near the surface of the actuator, an analogy can be considered between the induced

plasma wall jet and plane wall jet [13]. Previous works in the literature had shown validity of the such analogy. Under steady incompressible assumption, the plane wall jet boundary layer solution will result to the following equations for the wall jet momentum flux which is known as thrust and the wall shear stress as follows [14,15]:

$$\dagger K = 0.88 \left( \frac{\rho F^3}{\nu x} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (25)$$

$$\tau_w = 0.221 \rho \left( \frac{F^3}{\rho^3 \nu x^5} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (26)$$

In the above F is the wall jet constant which is also called flux of momentum flux" for wall jets which is a conserved quantity [16]. The net thrust can be assumed to be equal to K and thus the wall shear force per unit of the length can be estimated as:

$$\frac{F_{friction}}{L} \cong 0.25K \quad (27)$$

Thus the average plasma force per unit length can be approximated as:

$$\frac{F_{plasma}}{L} = \frac{T}{L} + \frac{F_{friction}}{L} \cong 1.25 \frac{T}{L} \quad (28)$$

Thus using the above equation, we can scale the average body force as:

$$|f_b| \sim \frac{1.25 k_1 (2\pi f)^{\alpha_1} C_{eff} \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)^2 V^2}{l_p h_p} \sim \rho_{c,max} V \chi_1 \chi_2 \quad (29)$$

In the above the  $\chi_1$  and  $\chi_2$  are related to the distribution of the charge density and electric field respectively. Assuming that maximum electric field is dependent on the amplitude of the voltage,  $\chi_2$  will be obtained automatically as a result of the of the solution of the equation (10), and  $\chi_1$  after solution of the charge density equation under the influence of the



Gaussian profile for normalized surface charge density. In other words,  $\chi_1$  and  $\chi_2$  can be estimated as:

$$\chi_1\chi_2 \sim \frac{\int \rho_c E dV}{l_p h_p} \quad (30)$$

After obtaining the  $\chi_1$ ,  $\rho_{c,max}$  is estimated as:

$$\rho_{c,max} \sim \frac{1.25k_1(2\pi f)^{\alpha_1} C_{eff} \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)^2 V}{l_p h_p \chi_1 \chi_2} \quad (31)$$

In the above equation, the approximate length and height of the plasma region can be found using the following formula proposed by the Yoon et al.

$$l_p \sim 0.005 \left( \frac{k_1(2\pi f)^{\alpha_1} C_{eff}(V-V_0)^2}{0.015} \right)^{1/3} \quad (32)$$

$$h_p \sim 0.0013 \left( \frac{k_1(2\pi f)^{\alpha_1} C_{eff}(V-V_0)^2}{0.015} \right)^{1/3} \quad (33)$$

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

To validate the proposed model for the linear plasma actuator, the experimental work of Thomas et al. [17] and Durscher and Roy [18] are considered. The geometrical and operational parameters of these validation cases are summarized in Table 1.

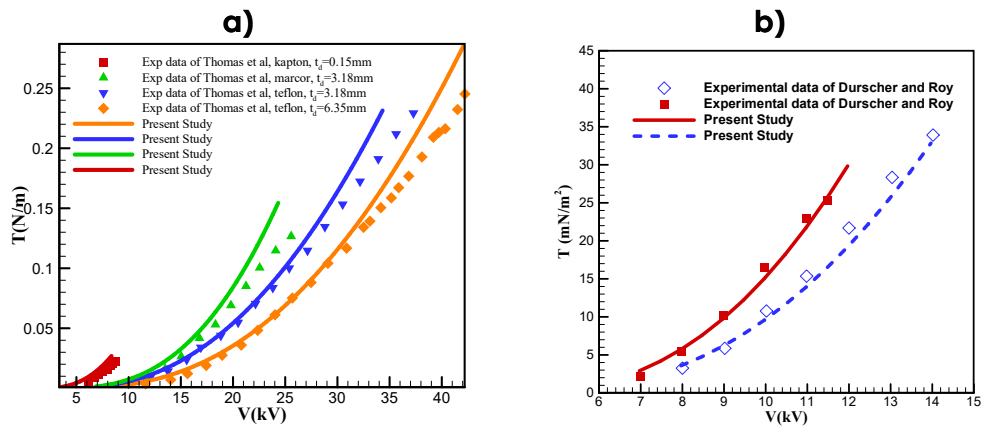
**TABLE 1 – GEOMETRICAL AND OPERATIONAL PARAMTERS OF THE VALIDATION CASES FOR THE PLASMA ACTUATOR MODEL**

Parameter	Value		Dimension
	Thomas et al [17]	Durscher and Roy [18]	
Dielectric layer thickness	6.35	3.0	mm
Electrode thickness	0.04	0.07	mm
Relative permittivity	2	3	-
Exposed electrode Width	12.7	5.0	mm
Embedded electrode Width	25.4	20.0	mm
gap of electrodes	12	0	mm
Operating voltage	40kVpp	20	KVpp
Operating Frequency	2000	7000, 14000	Hz
Voltage shape	Saw tooth	sinusoidal	-

In Figure 1, the variation of the net thrust of the plasma actuator with the applied voltage is computed using Equation 35, are the results are compared with the experimental data. The data set that is used for comparison includes various dielectric material, applied frequency, dielectric thickness and also the voltage waveform showing the general

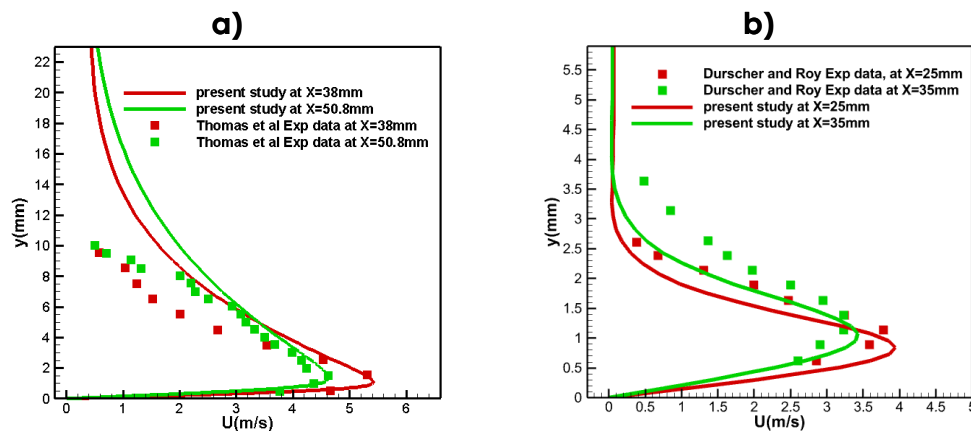
validity of the Equation 35 for the estimation of the net thrust generated by the plasma actuator.

**Figure1 –Comparison of calculated net thrust of plasma actuator with Experimental results of a) Thomas et al. [17] and b) Durscher and Roy [18]**



In Figure 2, the velocity profile of the plasma induced is numerically computed and the results are plotted against the experimental results of the Thomas et al and Durscher and Roy. The results show acceptable accuracy of the proposed model. It should be mentioned that for higher operating voltages as in the case of the Thomas et al, the plasma induced velocities are in such a way to produce turbulent boundary layer<sup>[19]</sup>. The same behaviour is also reported by Maden et al <sup>[20]</sup>. Thus for the case the Durscher and Roy simulations are conducted in laminar state and for the case of the Thomas et al, simulations are conducted in turbulent case.

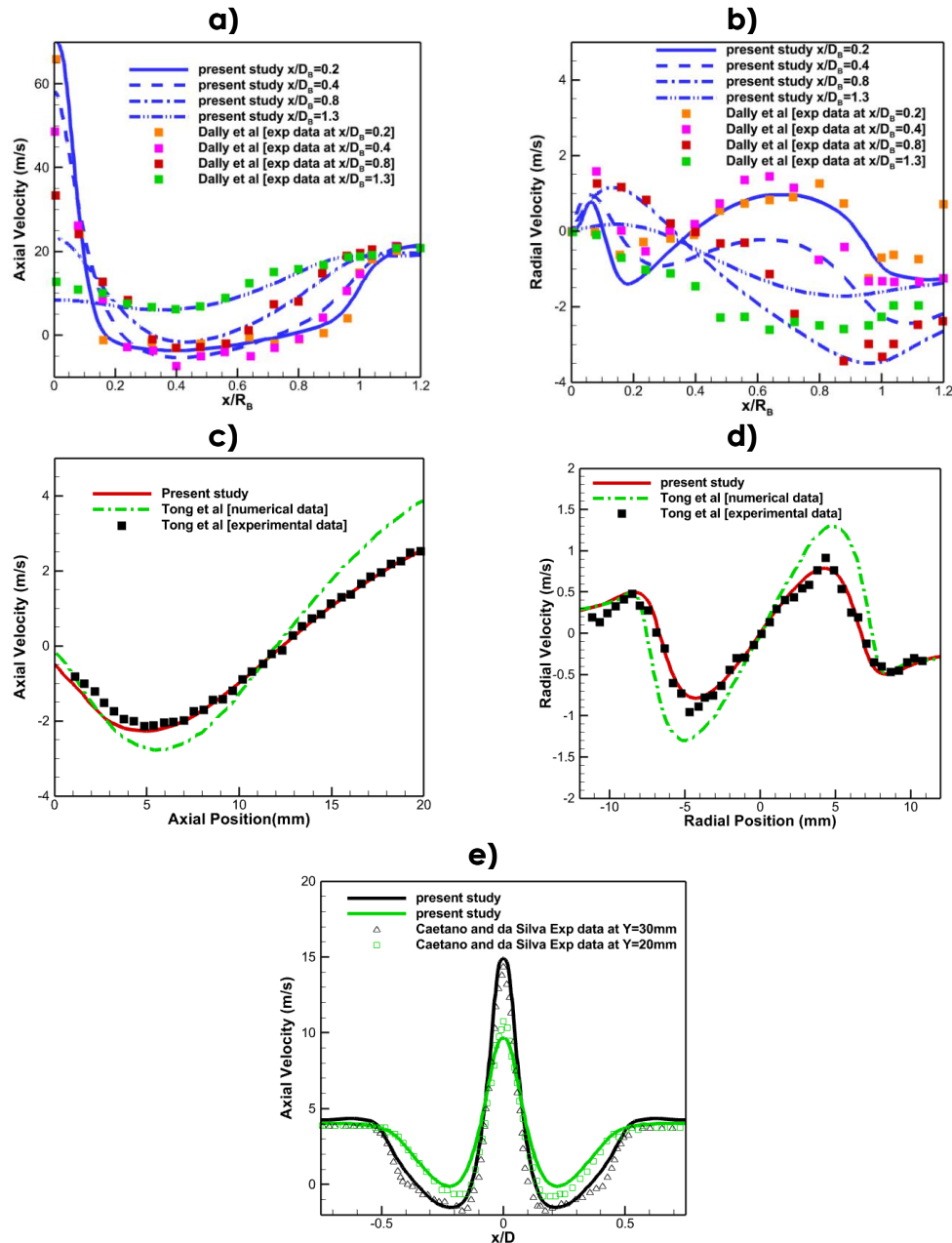
**Figure 2 – Comparison of the simulated plasma induced velocity profile with results of a) Thomas et al. [17] and b) Durscher and Roy [18]**



For the validation of the base flow case, in the burner in the non-reacting regime, the experimental results of Dally et al <sup>[21]</sup>, Tong et al<sup>[22]</sup> and Caetano and da Silva <sup>[23]</sup> are considered. For this the axial and radial velocity profiles inside the burner are compared with the experimental results and are given in Figure 3. These three validation cases include a large range of the fuel and oxidant velocity and also various size of the

bluff body. Therefore, the agreement of the velocity profiles in Figure 3 shows a general validity of the present numerical solution.

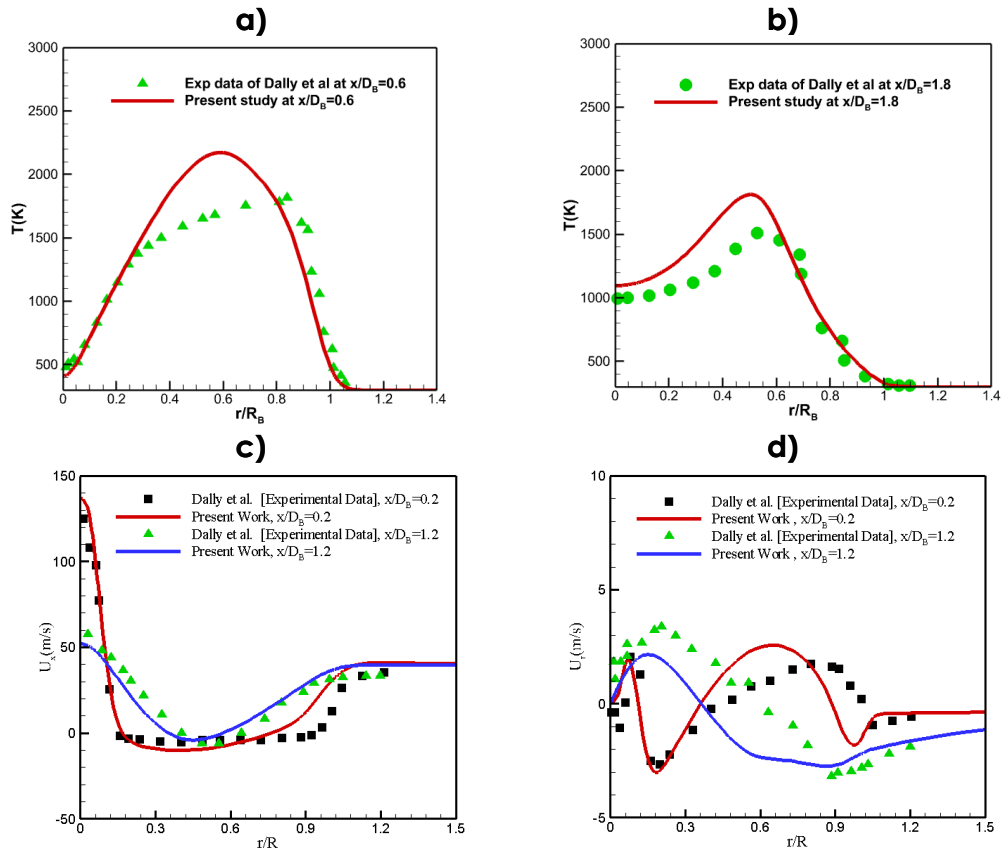
**Figure 3 – Comparison of the velocity profiles with the experimental data of a) and b) Dally et al [21] and c) and d) Tong et al [22] and e) Caetano and da Silva [23].**



For the validation of the reacting flow regime inside the burner, we have also considered the experimental results of Dally et al [21]. For this case the temperature profiles are compared with the experimental results in Figure 4. The simulated temperature profiles are closely following the

experimental data showing the validation of the present numerical simulation for reacting flow regime.

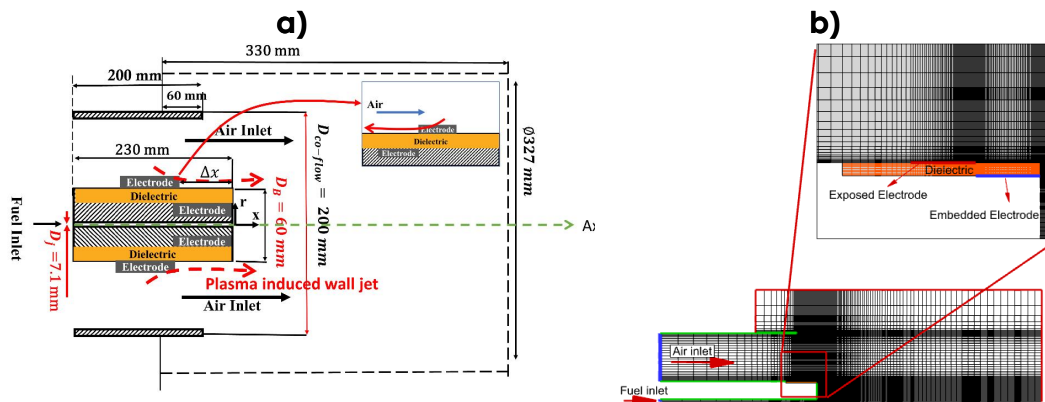
**Figure 4 – Comparison of the simulated a) and b) temperature and c) axial and d) radial velocity profiles for the reacting flow regime with the experimental data of Dally et al [21]**



To study the influence of the of the ring plasma actuator on the reacting flow and flame structure, a non-premixed bluff body burner with a geometry schematically shown in Figure 5 is considered. This geometry is adapted from the work of Manrique et al [24]. The plasma actuator is placed in the co-flow air stream in the vicinity of the bluff body as shown in Figure 5. The plasma actuator composed of an exposed and embedded electrode that are positioned asymmetrically with no gap on the sides of a dielectric layer with a thickness of 1 mm made from Kapton. The plasma actuator is assumed to be operated with 20kVpp and 20 kHz high voltage sinusoidal waveform. The position of the actuator is control be the axial distance of the edge of the exposed electrode from the tip of the bluff body surface ( $\Delta x = 15 \text{ cm}$ ). Here this distance is selected in such a way to accommodate an actuator with an exposed and embedded electrode with 15cm and 15cm width at the air-co flow side of the burner. The position of the embedded electrode can be altered to produce ionic wind that opposes the air co-flow. In Figure 5, diameter of the bluff body  $D_B$ , diameter of the co-flow air tube  $D_{co-flow}$ , outer diameter of the air annular jet  $D_J$ , and the distance of the edge of the exposed electrode from the tip of the bluff body  $\Delta x$  have respectively 60mm, 200mm, 7.1mm

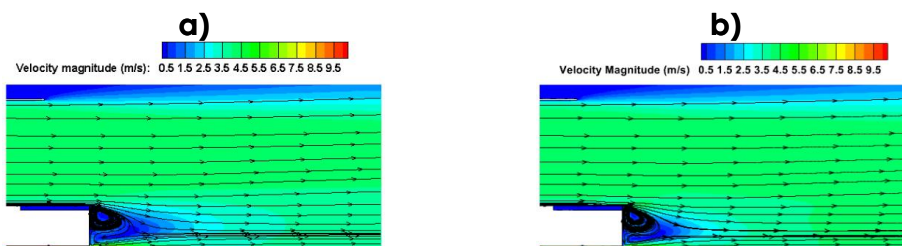
and 10 mm. Due to the axisymmetric geometry of the burner equipped with the ring plasma actuator, a 2D asymmetric computational domain is considered. A mesh is generated for this domain using 100K structured cells. These number of cells was sufficient to provide mesh independent results. The mesh is refined near the surface of the bluff body considering the criteria to have the  $y^+ < 1$ . In addition, near the surface of the DBD plasma actuator the mesh is also refined in such a way to have the cell wall distance smaller than the Debye length. A schematic of the computational grid is shown in Figure 5b.

**Figure 5 – a) Schematic of the bluff body burner with ring DBD plasma actuator in the air co-flow stream and b) Grid of the burner equipped with ring DBD plasma actuator.**



The influence of the DBD plasma actuator on the reacting flow and flame structure inside the burner is shown in Figure 6 and Figure 7. Figure 6 shows the velocity contours superimposed with velocity stream lines for the case with and without plasma actuators. When the DBD plasma actuator is active in the co-flow mode, the internal recirculation is slightly enhanced in Figure 6b. When the DBD plasma actuator is activated in the counter flow mode, a clockwise rotating separation bubble is formed upstream of the bluff body in the air duct deflecting the air flow direction. This separation bubble acts as a virtual modification to the shape of the bluff body. It can be expected with the change in the location and the strength of the plasma actuator in the counter flow mode, various modification to the size of the bluff body can be achieved. In Figure 6c both the internal and external recirculation zones are weakened due to the effect of the DBD actuator.

**Figure 6 – Velocity contours for a) without plasma actuator b) actuator in co-flow and c) actuator in counter flow configuration**



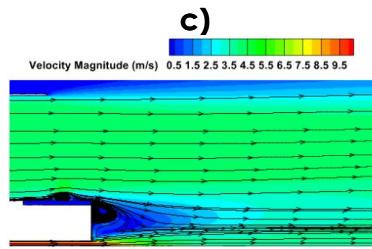
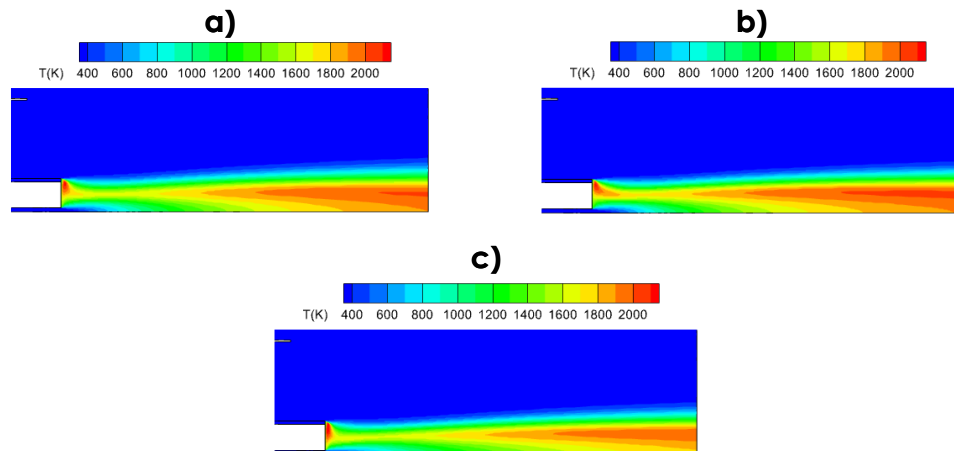


Figure 7 qualitatively shows the flame structure for the case with and without plasma actuators using the temperature contours. In this Figure, the places with high temperature e.g.  $>1000$  K can be assumed to represent the flame structure. When the plasma actuator is active in the co-flow mode, the flame root is slightly strengthened. However, for the case that the plasma actuator is active in the counter-flow mode, the influence on the flame root was slightly negative.

**Figure 7 – Temperature contours for a) without plasma actuator b) actuator in co-flow and c) actuator in counter flow configuration**



#### 4 CONCLUSION

In this paper, a numerical study of the influence of the ring plasma actuator positioned in the annular air co-flow side of a non-premixed bluff body burner is presented. First, a novel modified phenomenological model for the plasma actuator is presented and validated. Second, the plasma actuator is activated in two co-flow and counter-flow mode. The results showed that the activation of the plasma actuator in the co-flow mode positively modifies the recirculation zones downstream of the bluff body. However, when the plasma actuator is activated in counter-flow mode the recirculation zones are modified in slightly negative mode under the conditions tested here. In this case a separation bubble is formed in the annular air duct modifying virtually the shape of the bluff body. This

suggested better results can be achieved by optimizing the strength and position of the actuator.

### ACKNOWLEDGMENTS

F. Bagherighajari acknowledges scholarship with the ref. No. 2022.09877.BD from FCT-Foundation for Science and Technology and authors acknowledge the financial support by Center for Mechanical and Aerospace Science and Technology, Research Unit No. 151, Project Grant No. UIDB/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00151/2020>) and Grant No. UIDP/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/00151/2020>).

### REFERENCES

1. Im, S. K., Bak, M. S., Mungal, M. G., & Cappelli, M. A. (2013). Plasma actuator control of a lifted ethane turbulent jet diffusion flame. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 41(12), 3293–3298.
2. Chen, J. L., & Liao, Y. H. (2021). Effects of an annular plasma actuator on a co-flow jet downstream of a bluff-body. *Appl. Therm. Eng.*, 192, 116975.
3. Rodrigues, F. F., Abdollahzadeh, M., & Pascoa, J. (2020). Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Flow Control, Ice Formation Detection and Ice Accumulation Prevention. *Am. Soc. Mech. Eng. Fluids Eng. Div. FEDSM*, 2.
4. Abdollahzadeh, M., Páscoa, J. C., & Oliveira, P. J. (2014). Two-dimensional numerical modeling of interaction of micro-shock wave generated by nanosecond plasma actuators and transonic flow. *J. Comput. Appl. Math.*, 270.
5. Qingya, C., Xueke, C., Yiheng, T., Chuan, C., Yangzhu, Z., Wansheng, N., Qingya, C., Xueke, C., Yiheng, T., Chuan, C., Yangzhu, Z., & Wansheng, N. (2021). Influence of surface dielectric barrier discharge on diffusion flame combustion characteristics. *J. Beijing Univ. Aeronaut. Astronaut.*, 47(5), 1015–1024.
6. Wang, C., & Roy, S. (2013). Numerical simulation of a gas turbine combustor using nanosecond pulsed actuators. *AIAA 2013-0894*, January, 1–17.
7. Khasare, S., Bagherighajari, F., Dolati, F., Mahmoudimehr, J., Pascoa, J. C., & Abdollahzadeh, M. (2023). Control of the flame and flow characteristics of a non-premixed bluff body burner using dielectric barrier discharge plasma actuators. *Appl. Therm. Eng.*, 235, 121432.
8. Khasare, S., Bagherighajari, F., Dolati, F., Mahmoudimehr, J., Páscoa, J., & Abdollahzadehsangroudi, M. (2023). The effect of the dielectric barrier discharge plasma actuator in the control of non-reactive flow in a non-premixed bluff body burner. *Phys. Fluids*, 35, 075135.
9. Suzen, Y. B., & Huang, P. G. (2006). Simulations of flow separation control using plasma actuators. *44th AIAA Aerosp. Sci. Meet.*, 877.
10. Abdollahzadeh, M., Pascoa, J. C., & Oliveira, P. J. (2014). Modified

- split-potential model for modeling the effect of DBD plasma actuators in high altitude flow control. *Curr. Appl. Phys.*, 14, 1160–1170.
11. Yoon, J., & Han, J. (2015). Semiempirical Thrust Model of Dielectric Barrier Plasma Actuator for Flow Control. *J. Aerosp. Eng.*, 29(1), 1–8.
  12. Kriegseis, J., Schwarz, C., Tropea, C., & Grundmann, S. (2013). Velocity-information-based force-term estimation of dielectric-barrier discharge plasma actuators. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 46(5), 055202.
  13. Amanifard, N., Abdollahzadeh, M., Moayedi, H., & Pascoa, J. C. (2020). An explicit CFD model for the DBD plasma actuators using wall-jet similarity approach. *J. Electrostat.*, 107, 103497.
  14. Coles, D. (2017). *Topics in Shear Flow*. California Institute of Technology.
  15. Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). Boundary-Layer Theory. 1–799.
  16. Glauert, B. M. B. (1956). The wall jet. *J. Fluid Mech.*, 1(6), 625–643.
  17. Thomas, F. O., Corke, T. C., Iqbal, M., Kozlov, A., & Schatzman, D. (2009). Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic Flow Control. *AIAA J.*, 47(9), 2169–2178.
  18. Durscher, R., & Roy, S. (2012). Evaluation of thrust measurement techniques for dielectric barrier discharge actuators. *Exp. Fluids*, 53(4), 1165–1176.
  19. Baleriola, S., Leroy, A., Loyer, S., Devinant, P., & Aubrun, S. (2019). Scaling investigation of plasma-induced flows over curved and flat surfaces: Comparison to the wall jet. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 76, 259–273.
  20. Maden, I., Maduta, R., Kriegseis, J., Jakirlić, S., Schwarz, C., Grundmann, S., & Tropea, C. (2013). Experimental and computational study of the flow induced by a plasma actuator. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 41, 80–89.
  21. Dally, B. B., Fletcher, D. F., & Masri, A. R. (1998). Flow and mixing fields of turbulent bluff-body jets and flames. *Combust. Theory Model.*, 2, 193–219.
  22. Tong, Y., Liu, X., Chen, S., Li, Z., & Klingmann, J. (2018). Effects of the position of a bluff-body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study. *Appl. Therm. Eng.*, 131, 507–521.
  23. Caetano, N. R., & Figueira da Silva, L. F. (2015). A comparative experimental study of turbulent non premixed flames stabilized by a bluff-body burner. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 63, 20–33.
  24. Manrique De la Cruz, J., Celis, C., & Figueira da Silva, L. F. (2021). Non-Premixed Turbulent Combustion Modelling of a Bluff-Body Flame Using a Flamelet Progress Variable Approach. *26th Int. Congr. Mech. Eng.*





## COMPUTATIONAL STUDY OF VIBRATIONAL NON-EQUILIBRIUM EFFECTS ON SURFACE PROPERTIES OF A HYPERSONIC BODY

TEIXEIRA, ODELMA (1); PÁSCOA, JOSÉ (2)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [odelma.teixeira@ubi.pt](mailto:odelma.teixeira@ubi.pt)

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: [pascoa@ubi.pt](mailto:pascoa@ubi.pt)

### ABSTRACT

*This work results from a numerical investigation of the vibrational non-equilibrium effects on the surface properties of a hypersonic body. Thermochemical non-equilibrium within air mixture composed by nitrogen and oxygen was considered when solving the non-equilibrium Navier-Stokes-Fourier equations within a density-based algorithm in OpenFOAM. After a grid convergence analysis, the influence of the vibrational non-equilibrium on the surface properties of a hypersonic hollow cylinder test body was studied by considering three different physical models: mixture of perfect gases with vibrational non-equilibrium (model I); mixture of perfect gases with vibrational non-equilibrium of separate modes (model II); and mixture of calorically perfect gases (model III). It was found that model I had the best prediction of the recirculation zone size. Our numerical model showed to be very sensitive to vibrational non-equilibrium effects compared to existing numerical models. It was verified an improvement of 6%, 8% and 10% for the models I, II and III, respectively for surface pressure peak values with our model.*

**Keywords:** *Vibrational non-equilibrium, Hypersonic vehicles, Surface pressure, Computational modelling*

### RESUMO

Este trabalho resulta de uma investigação numérica dos efeitos do não equilíbrio vibracional nas variáveis do escoamento à superfície de um corpo hipersónico. As equações de Navier-Stokes-Fourier foram resolvidas de acordo com um algoritmo baseado na densidade em OpenFOAM, considerando uma mistura de ar composto por azoto e oxigénio. Após

uma análise de convergência da malha, a influência do não equilíbrio vibracional nas propriedades à superfície de um corpo cilíndrico oco foi estudada considerando três modelos físicos diferentes: mistura de gases perfeitos em não equilíbrio vibracional (modelo I), mistura de gases perfeitos em não equilíbrio vibracional com modos separados (modelo II) e mistura de gases calorificamente perfeitos (modelo III). Foi descoberto que o modelo I é o que melhor prediz o tamanho da zona de recirculação do escoamento. O nosso modelo numérico provou ser bastante sensível ao não equilíbrio vibracional quando comparado com os resultados de outro modelo numérico. Foi verificada uma melhoria na estimativa do valor de pico da pressão superficial de 6%, 8% e 10% para o modelo I, II, e III, respectivamente.

**Palavras-chave:** Não equilíbrio vibracional, Veículos Hipersônicos, Pressão superficial, Modelação computacional

## 1 INTRODUCTION

The world is progressing towards a new technological era where the idea of space travel is being re-created, and numerous tasks that were once exclusively performed by traditional heavy spacecraft can now be achieved by nanosatellites at a significantly lower cost. Hypersonic flows can be characterized as those flows where the Mach number achieve great values, generally exceeding Mach 5. Between several significant phenomena, they are distinguished by the interaction between the boundary layer and shock waves, molecular dissociation, ionization processes, species diffusion, and vibrational excitation. The elevated temperatures typically linked with intense shock waves render the numerical method the primary tool for analysing hypersonic flows in a coherent manner [1], [2]. Numerical algorithms are crucial for comprehending the impacts of significant flow-field parameters that would be quite challenging to investigate through experiments. For this aim, Computational Fluid Dynamics (CFD) for continuous regime, and direct simulation Monte Carlo (DSMC) for rarefied gas flows have been extensively utilized [3], [4].

Many CFD solvers have been utilized and enhanced to precisely capture the intricate flow characteristics exhibited in hypersonic flows. Candler et al. highlighted the significance of selecting an appropriate flux evaluation method and limiter function, as well as the necessity of incorporating vibrational effects, which makes the comparison between CFD and experimental results more realistic [5], [6]. Following Candler's work, many other researchers reached several crucial conclusions regarding these cases. They proposed various explanations for the discrepancies between numerical results and experimental data, some of which are the temperature dependence of specific heat and transport model [7], the

accuracy of experimental data [8], the catalytic activity at the surface [9], and the choice of the chemistry model [10], [11].

This work results from an attempt to study the impact of vibrational non-equilibrium on surface properties of a hypersonic body and understand the discrepancies between numerical and experimental results, for the low enthalpy test cases, where the influence of chemical non-equilibrium conditions is negligible by using three different physical models: *mixture of perfect gases with vibrational non-equilibrium (model I)*; *mixture of perfect gases with vibrational non-equilibrium of separate modes (model II)*; and *mixture of calorically perfect gases (model III)*. For this aim, an open-source two-temperature CFD, originally developed by Casseau et al. [12]. We can then investigate the external aerodynamics in re-entry flows and address low ionized hypersonic flows. A validation of the present numerical code will be here conducted by using the hollow cylinder flare hypersonic test case, an excellent test case to assess the accuracy of numerical methods when using compressible Navier-Stokes equations with shock waves and boundary layer interactions.

## 2 METHODOLOGY

### 2.1 Physical Model and Mathematical Formulation

The system of equations is described as follows:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial (\mathbf{F}_{i,inv} - \mathbf{F}_{i,vis})}{\partial x_i} = \dot{\mathbf{W}} \quad (1)$$

where  $\mathbf{F}_{i,inv}$  and  $\mathbf{F}_{i,vis}$  are the inviscid and viscous flux vectors respectively,  $\dot{\mathbf{W}}$  is the source term vector and  $\mathbf{U}$  is the vector of conserved quantities defined as follows:

$$\mathbf{U} = \{\rho, \rho_s, \rho u, \rho v, \rho w, E_{ve,m}, E\}^T \quad s \in N_s, \quad m \in N_m \quad (2)$$

$u$ ,  $v$ , and  $w$  are the components of the velocity vector,  $\rho$  is the mass density of the fluid and  $\rho_s$  is the partial density of species  $s$ .  $E$  and  $E_{ve,m}$  correspond to the total energy and the total vibro-electronic energy for the molecule  $m$ , respectively. For the physical models considered in this work, one equation of total energy and one equation for vibro-electronic

energy is solved for model I, one equation for the total energy and one vibro-electronic energy equation for each molecular species is solved for model II, and for model III only a total energy equation is solved, since the fluid is considered in thermal equilibrium.

For model I, thermal non-equilibrium follows Park's two temperature model [13]. The vibrational excitation is expressed by a single vibrational mode that is translated in terms of a mixture vibrational temperature,  $T_v$ . In addition to the conventional Navier-Stokes equation and species mass conservation equation, a mixture vibrational energy equation is also solved.

The source term described by the vector:

$$\dot{W} = (0, \dot{w}_s, 0, 0, 0, \dot{w}_{v,m}, 0)^T \quad (3)$$

where  $\dot{w}_s$  consists in the net mass production of species  $s$  and  $\dot{w}_{v,m}$  is the vibrational source term, which accounts for energy exchange between vibrational and translational modes (V-T) that is computed using the Landau-Teller equation [14] with the relaxation times obtained using Millikan-White formula [15] with Park's correction [16]. For the model II, the vibrational energy exchange between the molecules (V-V) is computed using the Knab et al. [17], [18] formula.

## 2.1 Numerical Methods

The simulation is initialized using the inflow parameters and run until reaches a steady solution. To solve the governing equations, the viscous fluxes were discretized using second-order central difference scheme, and the inviscid fluxes were discretized using second-order accurate central-upwinding interpolations of Kurganov, Noelle and Petrova (KNP) [19], [20] with the second-order accuracy achieved using total variation diminishing (TVD) scheme with van Leer limiter function. Euler discretization scheme with first-order accuracy was used for the temporal derivatives.

## 3 RESULTS AND DISCUSSION

The freestream conditions to study the hollow cylinder test case (specific stagnation enthalpy, Mach number, velocity, temperature, density and unit Reynolds number) can be found in Table 1. Considering the geometry of the case [21], the freestream conditions and the unit Reynolds number, the flow is fully laminar.

**Table 1 – Freestream conditions**

<b>h<sub>0</sub> (MJ/kg)</b>	<b>Mach</b>	<b>U (km/s)</b>	<b>T (K)</b>	<b>ρ (g/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Re (m<sup>-1</sup>)</b>
5.07	11.3	3.123	189	0.634	1.5x10 <sup>5</sup>

At the walls, a fixed temperature of 300 K was established, and no-slip boundary conditions were implemented for the velocity. At the outlet, a supersonic boundary condition was utilized, with the field values being extrapolated from the domain.

### **3.1 Grid independence analysis**

Table 1 shows the grid's sizes and Figure 1 shows the very coarse grid used in the grid independence analysis.

**Table 1 – Grid's dimension.**

---

<b>Grid size</b>	<b>No of Cells</b>
Very Coarse	128 x 64
Coarse	256 x 128
Medium	512 x 256
Fine	1024 x 512

---

Figure 2 shows the surface pressure as function of the grid's size with a detailed view of the peak zone. The medium grid showed to sufficiently good to get accurate results, taking 16 hours to converge using 10 Intel 5620 processors.

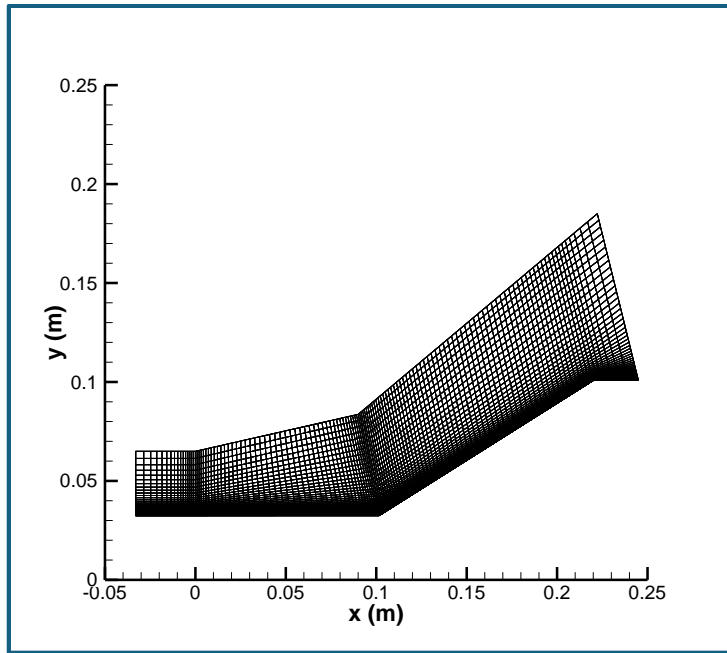


Figure 1 – Very coarse grid.

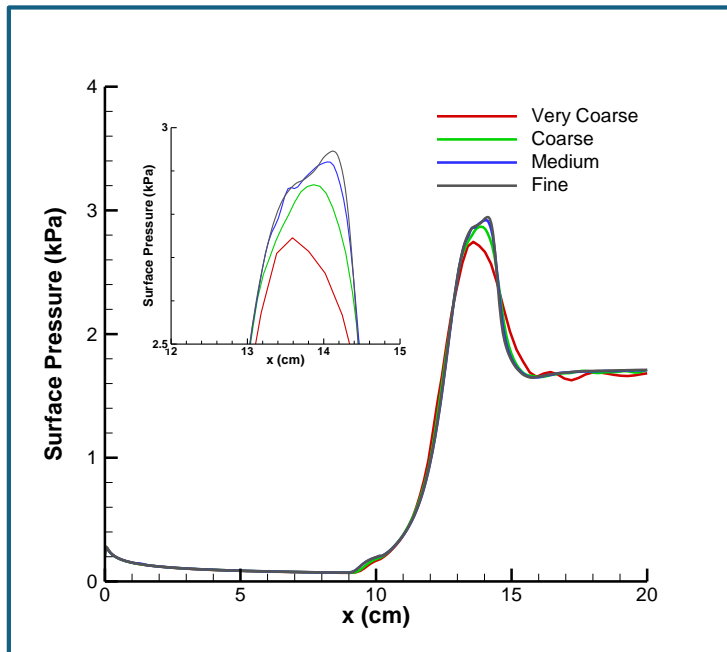
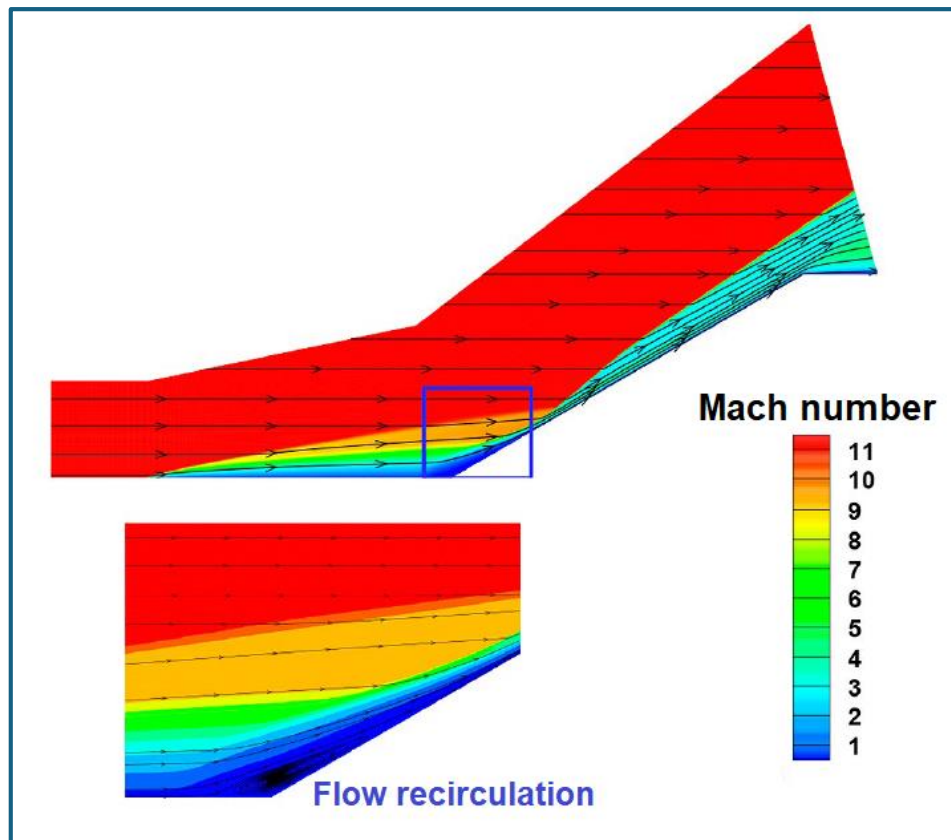


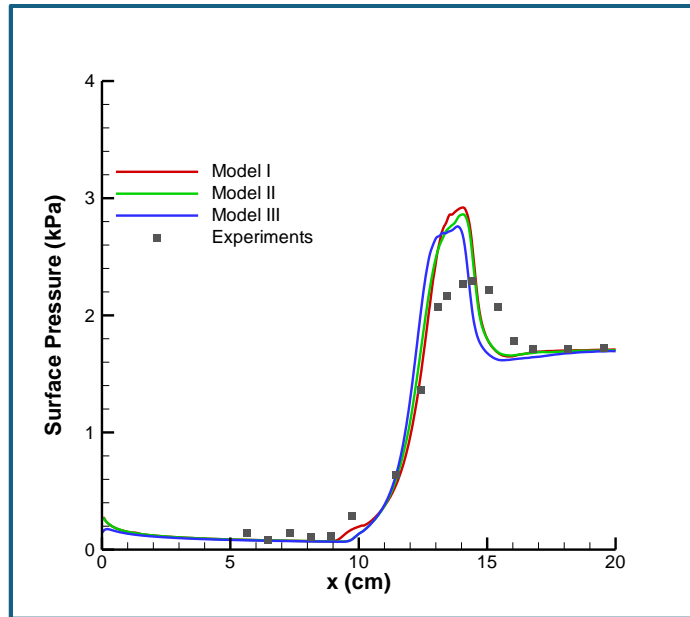
Figure 2 – Surface pressure for different grid sizes.

### 3.1 Vibrational non-equilibrium effects



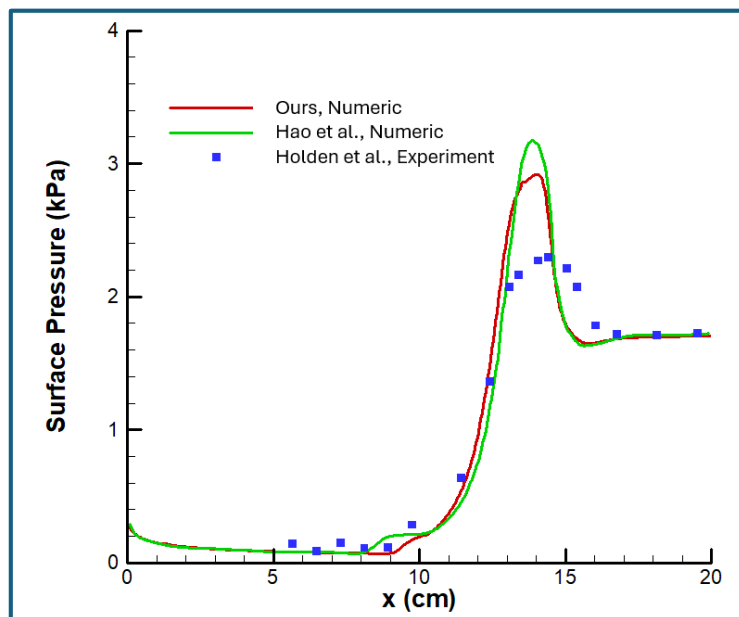
**Figure 3 – Mach number contour and streamlines for model I.**

Figure 3 shows Mach number contour and the flow streamlines with detailed view of the of the separation zone at the bottom. We can see the separation zone at the surface junction caused by the interaction between the boundary layer and the detached shock and the flow recirculation caused by the adverse pressure gradient.



**Figure 4 - Surface pressure for different physical models.**

Figure 4 shows the surface pressure distribution for the three different models and the experimental measurements from Holden et al. [21]. It was verified small differences between the three physical models. The peak pressures are similar for the model I and model II, reflecting a difference from the experiment of 21% and 20%, respectively. For model III, it corresponds to 17%. Regarding the size of the separation zone, a slight enhancement was noted with model I, but no substantial difference was observed between models II and III.



**Figure 5 – Comparison of surface pressure for model I and the experiments.**



Figure 5 shows the comparison between our numerical results, the numerical results obtained by Hao et al. [8] and the experiments performed by Holden et al. [21] for model I, which had the best estimation of the separation zone. The results show a better prediction of surface pressure peak values for our numerical model, with a deviation from the experiment of 20%, lower than the deviation obtained by Hao et al. which was of 27 %.

#### **4 CONCLUSIONS**

To study the impact of vibrational non-equilibrium in the surface properties of a hypersonic body, the hollow cylinder test case, with freestream Mach number of 11.3 and stagnation specific enthalpy of 5.07 MJ/kg was used alongside with three different physical models. Model I, considering a total vibrational non-equilibrium energy mode for every molecule, model II, considering different vibrational energy for each molecular species, and model III, considering a calorically perfect gas. An analysis to the vibrational non-equilibrium effects on the surface pressure and separation region showed the validity of our numerical model. No considerable differences in recirculation zone size were observed for model II and model II, and model I was the one with the better agreement with the experiments. Our numerical model showed to be more sensitive to vibrational non-equilibrium effects when compared with other numerical model results. In terms of the surface pressure peak values, it was verified an improvement of 6%, 8% and 10% for the models I, II and III, respectively.

#### **ACKNOWLEDGMENTS**

This work was supported by the Portuguese Foundation for Science and Technology, I.P. (FCT, I.P.) FCT/MCTES through national funds (PIDDAC), under the R&D Unit C-MAST - Center for Mechanical and Aerospace Science and Technologies, with reference projects UIDB/00151/2020, <https://doi.org/10.54499/UIDB/00151/2020>, and UIDP/00151/2020, <https://doi.org/10.54499/UIDP/00151/2020>.

## REFERENCES

- [1] J. D. Anderson Jr., *Hypersonic and High-Temperature Gas Dynamics, Second Edition*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [2] J. C. Pascoa, O. Teixeira, and G. Filipe, "A Review of Propulsion Systems for CubeSats," in *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 1: Advances in Aerospace Technology*, 2018, p. V001T03A039.
- [3] C. M. Xisto, J. C. Páscoa, and P. J. Oliveira, "Numerical analysis of real gas MHD flow on two-dimensional self-field MPD thrusters," *Acta Astronaut.*, vol. 112, pp. 89–101, 2015.
- [4] J.-J. O. Hoste, V. Casseau, M. Fossati, I. J. Taylor, and R. Gollan, "Numerical Modeling and Simulation of Supersonic Flows in Propulsion Systems by Open-Source Solvers," in *21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference*, 2017.
- [5] G. Candler *et al.*, "CFD validation for hypersonic flight - Hypersonic double-cone flow simulations," in *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 2002, no. c.
- [6] G. Candler, I. Nompelis, and M.-C. Druguet, "Navier-Stokes predictions of hypersonic double-cone and cylinder-flare flow fields," in *39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2001.
- [7] N. Kianvashrad and D. D. Knight, "Simulation of Hypersonic Shock Wave Laminar Boundary Layer Interaction on Hollow Cylinder Flare, Part II," in *47th AIAA Fluid Dynamics Conference*, 2017.
- [8] J. Hao and C. Y. Wen, "Effects of vibrational nonequilibrium on hypersonic shock-wave/laminar boundary-layer interactions," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 97, no. August, pp. 136–142, 2018.
- [9] I. Nompelis and G. V. Candler, "US3D Predictions of Double-Cone and Hollow Cylinder-Flare Flows at High-Enthalpy (Invited)," in *44th AIAA Fluid Dynamics Conference*, 2014.
- [10] N. Kianvashrad and D. D. Knight, "The Effect of Thermochemistry on Prediction of Aerothermodynamic Loading over a Double Cone in a Laminar Hypersonic Flow," in *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2018.
- [11] J. Hao, J. Wang, and C. Lee, "Numerical Simulation of High-Enthalpy Hollow-Cylinder/Flare Flows," *AIAA J.*, vol. 56, no. 8, pp. 3337–3341, Aug. 2018.

- [12] V. Casseau, "An Open-Source CFD Solver for Planetary Entry," University of Strathclyde, 2017.
- [13] C. Park, "Two-temperature interpretation of dissociation rate data for N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>," in *26th Aerospace Sciences Meeting*, 1988.
- [14] L. Landau and E. Teller, "On the Theory of Sound Dispersion," *Phys. Zeitschrift der Sowjetunion*, vol. 10, no. 34, pp. 147–153, 1936.
- [15] R. C. Millikan and D. R. White, "Systematics of Vibrational Relaxation," *J. Chem. Phys.*, vol. 39, no. 12, pp. 3209–3213, Dec. 1963.
- [16] C. Park, *Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics*. New York: Wiley International, 1990.
- [17] O. Knab, H.-H. Fruehauf, and S. Jonas, "Multiple temperature descriptions of reaction rate constants with regard to consistent chemical-vibrational coupling," in *27th Thermophysics Conference*, 1992.
- [18] O. Knab, H.-H. Fruehauf, and E. W. Messerschmid, "Theory and validation of the physically consistent coupled vibration-chemistry-vibration model," *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 9, no. 2, pp. 219–226, Apr. 1995.
- [19] C. J. Greenshields, H. G. Weller, L. Gasparini, and J. M. Reese, "Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a colocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 63, no. 1, pp. 1–21, 2010.
- [20] A. Kurganov, S. Noelle, and G. Petrova, "Semidiscrete Central-Upwind Schemes for Hyperbolic Conservation Laws and Hamilton–Jacobi Equations," *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 23, no. 3, pp. 707–740, Jan. 2001.
- [21] M. S. Holden, T. P. Wadhams, M. G. MacLean, and A. T. Dufrene, "Measurements of Real Gas Effects on Regions of Laminar Shock Wave/Boundary Layer Interaction in Hypervelocity Flows for 'Blind' Code Validation Studies," *21st AIAA Comput. Fluid Dyn. Conf.*, pp. 1–13, 2013.



## IMPLEMENTATION OF A CALORIMETRIC TECHNIQUE FOR DBD PLASMA ACTUATORS THERMAL POWER QUANTIFICATION

FREIRE, DIOGO (1); RODRIGUES, FREDERICO (2); PÁSCOA, JOSÉ (3)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: [costa.freire@ubi.pt](mailto:costa.freire@ubi.pt)

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: [fmfr@ubi.pt](mailto:fmfr@ubi.pt)

(3) Universidade da Beira Interior, E-mail: [pascoa@ubi.pt](mailto:pascoa@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [costa.freire@ubi.pt](mailto:costa.freire@ubi.pt)

### RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo de implementar uma técnica de calorimetria para atuadores a plasma de barreira dielétrica de descarga (DBD) e estudar a potência térmica dissipada por estes dispositivos. Os atuadores possuem um elevado potencial para uma vasta gama de aplicações no campo da transferência de calor, como arrefecimento de pás de turbina de gás, e para descongelamento permitindo a prevenção de acumulação de gelo. Nesta técnica de calorimetria, o calor libertado pelo atuador a plasma, feito de Kapton e de fita de cobre, é medido com um equipamento desenvolvido para esse efeito. O atuador é colocado junto a um ventilador numa extremidade do calorímetro que se encontra isolado termicamente com cortiça, de modo a evitar dissipações de calor para o meio exterior, aumentando a precisão dos resultados. Neste trabalho irá ser demonstrado o desenvolvimento do equipamento e será medido o aumento de temperatura do ar adjacente devido ao funcionamento de atuadores com diferentes espessuras. Os resultados permitem concluir que o calor gerado é devido a dois fatores principais, ao aquecimento dielétrico e ao aquecimento do gás circundante. Conclui-se que os atuadores permitem eficazmente aumentar a temperatura do escoamento de ar adjacente, sendo que quanto maior a tensão aplicada maior o aumento de temperatura. Para as condições testadas conclui-se que os atuadores a plasma podem promover eficazmente um aumento de até 3°C na temperatura do ar.

**Palavras-chave:** Atuadores a Plasma, Calorímetro de escoamento de ar, Transferência de Calor.

### ABSTRACT

*The aim of this work is to implement a calorimetry technique for dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators and to study the thermal power dissipated by these devices. Actuators have great potential for a wide*

range of applications in the field of heat transfer, such as cooling gas turbine blades, and for de-icing to prevent ice buildup. In this calorimetry technique, the heat released by the plasma actuator, made of Kapton and copper tape, is measured using equipment developed for this purpose. The actuator is placed next to a fan at one end of the calorimeter, which is thermally insulated with cork in order to avoid heat dissipation to the outside environment, increasing the accuracy of the results. This work will demonstrate the development of the equipment and measure the increase in temperature of the surrounding air due to the operation of actuators with different thicknesses. Preliminary results show that the heat generated is due to two main factors: dielectric heating and heating of the surrounding gas. It is concluded that the actuators effectively increase the adjacent air temperature which increases with the growth of the applied voltage levels. For the tested conditions, we may conclude that plasma actuators can effectively increase the air temperature in about 3 °C.

**Keywords:** Plasma Actuators, Airflow Calorimeter, Heat Transfer.

## 1 INTRODUÇÃO

Os atuadores a plasma são dispositivos que nos últimos anos despertaram bastante interesse devido à sua vasta gama de potenciais aplicações nas áreas do controlo de escoamentos, redução de ruído em aeronaves e também no campo da transferência de calor (AL-SADAWI; CHONG; KIM, 2019; GUOQIANG et al., 2019; RODRIGUES; MOREIRA; PÁSCOA, 2024). Das suas principais características destacam-se o seu peso reduzido, baixo consumo de energia, uma resposta rápida e o facto de ser um equipamento totalmente elétrico não possuindo partes mecânicas (PESCINI et al., 2015; RODRIGUES et al., 2024). Os atuadores a plasma de barreira dielétrica de descarga (DBD) são constituídos por uma camada dielétrica e por dois eléctrodos, sendo que um dos eléctrodos é coberto pela camada dielétrica e o outro é exposto ao ambiente circundante. Estas características são usadas para a designação dos próprios eléctrodos (KOTSONIS, 2015; PORTER et al., 2012). De modo a que o atuador a plasma entre em funcionamento, é necessário conectar os eléctrodos a uma fonte de alta tensão alternada (AC) e alta frequência (RODRIGUES et al., 2022). Quando a amplitude da tensão aplicada é suficientemente elevada, o ar é ionizado, formando assim o plasma na zona do eléctrodo exposto. Por sua vez, as partículas carregadas são aceleradas por intermédio do campo elétrico induzindo um escoamento de ar que atrai o ar circundante para a superfície do atuador, acelerando-o posteriormente, numa direcção tangencial à superfície (BENMOUSSA; RODRIGUES; PÁSCOA, 2023; HUANG; CORKE; THOMAS, 2012). Para além das aplicações principais dos atuadores relacionadas com o controlo de escoamentos, estes equipamentos possuem também uma vasta aplicabilidade na área da transferência de calor, principalmente para arrefecimento de pás de turbinas e para prevenção de acumulação de gelo e degelo (ABDOLLAHZADEH; RODRIGUES; PASCOA, 2020; HU et al.,

2020; RODRIGUES et al., 2021a). Ainda assim, até à data apenas alguns estudos incidiram na caracterização dos efeitos térmicos gerados por atuadores a plasma sendo que a maioria deles se tem sido dirigido apenas para realização de medições de temperatura por infravermelhos. Jukes et al. (JUKES et al., 2008) realizaram um dos primeiros estudos no qual foram obtidas imagens térmicas para quantificar a temperatura da superfície da camada dielétrica durante o funcionamento do plasma. Para além disso, deduziram uma fórmula analítica para estimar a temperatura do gás de plasma. Posteriormente, Jousot et al. (JOUSSOT et al., 2010) utilizaram termografia de infravermelhos para determinar a temperatura da superfície dielétrica com o plasma ligado e depois de desligada a descarga. Com estas medições, concluíram que a temperatura média da superfície aumenta linearmente com a potência eléctrica, bem como com a frequência e o quadrado da tensão. Tirumala et al. (TIRUMALA et al., 2014) também realizaram medições de termografia de infravermelhos na superfície de um atuador DBD e caracterizaram-no em relação a vários parâmetros eléctricos e geométricos. Para além disso estudaram a distribuição da temperatura e propuseram uma hipótese sobre o mecanismo de aquecimento dielétrico e uma relação entre a temperatura da superfície dielétrica e a temperatura do gás. Seguiram-se os trabalhos de Rodrigues et al. (RODRIGUES; PASCOA; TRANCOSSI, 2018a, 2018b) que recorreram também a técnicas de medição de temperatura por infravermelhos para quantificar a temperatura de superfície atingida por atuadores com diferentes espessuras de camadas dielétricas, diferentes materiais e ainda sob a influência de um escoamento externo. Mais recentemente, Abdollahzadeh et al. (ABDOLLAHZADEH et al., 2022) realizaram um estudo paramétrico no qual apresentaram imagens térmicas para atuadores a plasma com diferentes dimensões de eléctrodos, diferentes materiais dielétricos, diferentes espessuras e diferentes espaçamentos entre eléctrodos. De modo a alargar o conhecimento sobre os efeitos térmicos gerados por atuadores a plasma Rodrigues et al. (RODRIGUES; PASCOA; TRANCOSSI, 2018c) desenvolveram uma nova técnica baseada num calorímetro de escoamento de ar para quantificar a potência térmica dissipada por atuadores a plasma. Posteriormente, Rodrigues et al. (RODRIGUES et al., 2021b) utilizaram novamente esta técnica para caracterizar a potência dissipada por atuadores a plasma fabricados com diferentes materiais dielétricos. No entanto, apesar desta nova técnica se ter demonstrado eficaz e bastante promissora, são ainda escassos os trabalhos realizados com o seu recurso. Assim, este trabalho tem como objetivo implementar e aplicar a técnica de calorimetria para os atuadores a plasma de barreira dielétrica de descarga (DBD) de modo a quantificar o calor dissipado pelo plasma para o ambiente adjacente. A potência consumida e a potência dissipada para o meio são de interesse relevante e irão ser relatadas no presente trabalho, devido ao facto de contribuir para os objetivos referidos inicialmente de evitar formações de gelo e degelo. Estes parâmetros são obtidos experimentalmente através de uma

técnica desenvolvida para o efeito, a técnica calorimétrica, que vai ser demonstrada e explicado o seu funcionamento. Posteriormente, fabricaram-se e estudaram-se atuadores com diferentes espessuras de camada dielétrica e diferentes dimensões de elétrodos.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

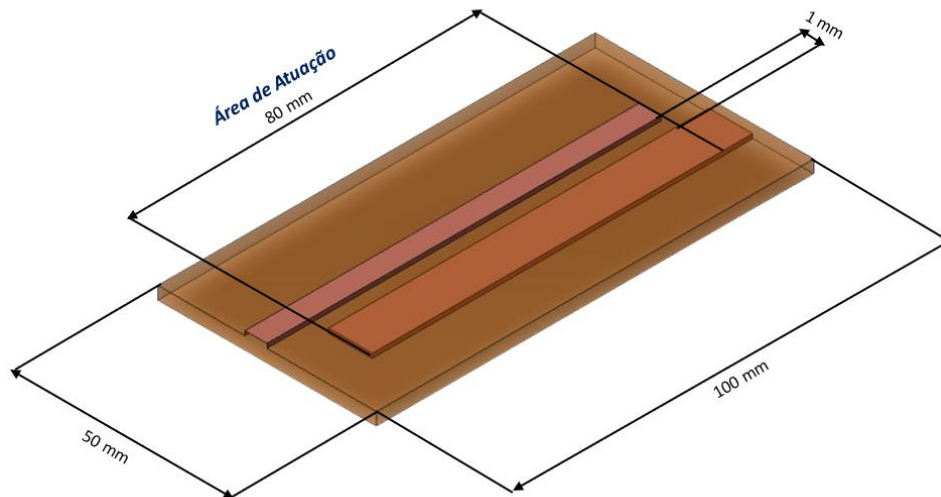
Como já referido foi desenvolvida uma instalação experimental para o presente trabalho de forma a quantificar as dissipações de calor para o ar circundante. A camada dielétrica dos atuadores foi feita de fita de Kapton com as dimensões de 100 x 50 mm. Com diferentes espessuras, de 1, 2 e 3 mm, sendo que as diversas camadas de cada atuador são sobrepostas com recurso a uma solução que permite o deslizamento do Kapton evitando a formação de bolhas de ar entre camadas. Por sua vez, os elétrodos têm um comprimento de atuação de 80 mm, tendo sido montados em diferentes configurações, usando fita de cobre com 5, 10 e 20 mm, com um espaçamento entre elétrodos de 1 mm. O elétrodo coberto é tapado usando uma camada da fita de Kapton de modo a ficar totalmente isolado eletricamente. Os atuadores foram expostos a altas tensões, variando de 4 kVpp a 16 kVpp, com uma frequência de 24 kHz. Sendo que a fase é conectada ao elétrodo exposto e o neutro da fonte de alimentação é ligado no elétrodo coberto.

**Quadro 1 – Configurações dos Atuadores a Plasma**

Número do atuador	Espessura (mm)	Elétrodo Coberto (mm)	Elétrodo Exposto (mm)	Faixa de Tensões Aplicada (kVpp)
1	1	10	5	4-10
2	1	10	20	4-10
3	2	10	5	4-14
4	3	10	5	4-16

Na figura (1) é possível observar uma representação do atuador a plasma. Com as suas dimensões comuns a todos os atuadores usados neste estudo, apenas variando a sua espessura e a largura dos eletrodos tal como referido no quadro (1).

**Figura 1 - Dimensões do Atuador a Plasma**



Fonte: Autor

## 2.1 Caracterização Elétrica dos Atuadores

Para cada atuador foi feito o varrimento nas tensões indicadas no quadro 1, com a mesma frequência de 24 kHz. As medições foram efetuadas usando o PicoScope modelo 5443A (fabricado pela Pico Technology, Reino Unido) sendo este um equipamento que permite transformar um computador em um osciloscópio. Foram usados dois canais, o A e o B, sendo que o A foi usado para verificar a tensão aplicada ao atuador a plasma com uma sonda de alta tensão com atenuação de 10000 vezes e o canal B de forma a ver a tensão nos terminais ou de uma resistência ou de um condensador colocados em série, dependendo do método. No método da resistência foi medida a potência média que o atuador a plasma consumia, pois neste método a corrente que atravessa a resistência é obtida com recurso à tensão nos seus terminais, obtida no canal B do PicoScope, e usando a lei de Ohm ( $I_r = U_r/r$ ). Desta forma o sinal que atravessa a resistência é baixo o suficiente para ser medido por instrumentos de medição convencionais. Nestes ensaios, o atuador foi conectado em série com uma resistência de 100  $\Omega$  de impedância com 1 % de tolerância, sendo que a impedância desta é muito inferior à do atuador pelo que não afeta o seu funcionamento. A resistência possui um coeficiente de temperatura de 50 ppm o que se traduz numa variação da impedância com a temperatura de apenas 0,00005  $\Omega/^\circ\text{C}$ . Para os cálculos das potências foram usados os valores da tensão no canal A e da corrente obtida a partir do sinal de tensão do canal B durante 10 períodos de onda, sendo retirado um valor a cada 0,008  $\mu\text{s}$ , e sendo os cálculos efetuados recorrendo a uma folha de cálculo Excel. A potência média é calculada segundo a fórmula (1);



$$\bar{P} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} U(t) \cdot I(t) dt \quad (1)$$

Sendo  $U(t)$  a tensão no atuador e  $I(t)$  a corrente que atravessa a resistência, o que se traduz na potência média  $\bar{P}$  durante os “n” períodos ( $T$ ) de tempo.

De forma a completar a caracterização elétrica dos atuadores a plasma usados neste estudo, foi utilizado o método do condensador que permite obter as curvas de Lissajous, curvas produzidas por um sistema de equações paramétricas. Neste método a resistência é substituída por um condensador cerâmico, traduzindo-se numa capacidade de 10 nF com uma tolerância de 10 %. A capacidade é bastante superior à do atuador e escolhida segundo a literatura de modo a não interferir nas medições (ASHPIS; LAUN; GRIEBELER, 2012; RODRIGUES; PASCOA; TRANCOSSI, 2017). Deste modo, o sinal aos terminais do condensador apresenta também magnitudes adequadas para a sua medição com recurso a equipamentos convencionais de laboratório. A carga instantânea do condensador é dada pela fórmula (2);

$$Q_m(t) = C_m \cdot U_m(t) \quad (2)$$

Sendo que  $C_m$  indica a capacidade do condensador usado e  $U_m$  a tensão no mesmo. Esta é medida recorrendo novamente ao canal B do PicoScope. Já a corrente que atravessa o condensador é dada pela fórmula (3);

$$I_m(t) = C_m \cdot \frac{\partial U_m(t)}{\partial t} \quad (3)$$

Uma vez que o condensador se encontra em série com o atuador, a corrente que passa por cada um deles é a mesma, assim a potência instantânea dissipada pelo atuador a plasma é dada pela fórmula (4);

$$P_a(t) = U_a(t) \cdot I_a(t) = U_a(t) \cdot C_m \frac{\partial U_m(t)}{\partial t} \quad (4)$$

Sendo que  $U_a$  representa a tensão medida com o canal A do PicoScope. A potência média em n períodos de tempo  $T$  é dada pela fórmula (5);

$$\bar{P}_a(t) = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} U_a(t) \cdot C_m \frac{\partial U_m(t)}{\partial t} dt \quad (5)$$

Para um ciclo a fórmula (5) pode ser reescrita na fórmula (6);

$$\bar{P}_a(t) = \frac{1}{T} \iint U_a \cdot \partial Q \quad (5)$$

Nas figuras (2) e (3) é possível observar os atuadores 2 e 4 em funcionamento.

**Figura 2 - Atuador a Plasma 2 em Funcionamento**



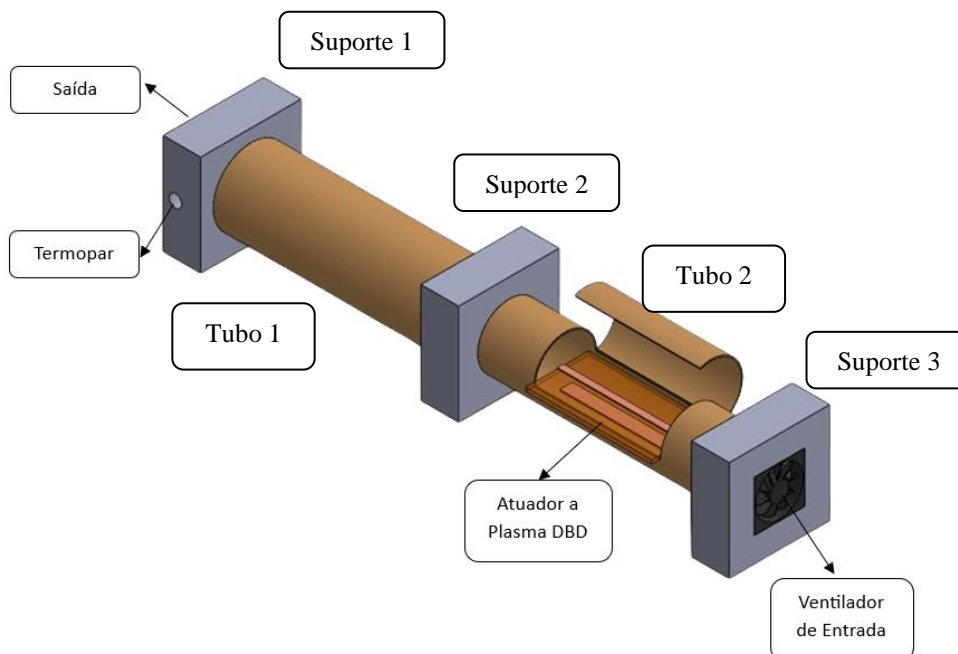
**Figura 3 - Atuador a Plasma 4 em Funcionamento**



## 2.2 Calorímetro

De forma a se quantificar o calor dissipado para o ar circundante pelo atuador a plasma foi desenvolvido um equipamento para o efeito, seguindo o esquema da figura (1).

**Figura 4 - Esquema do Calorímetro**



Fonte: Autor

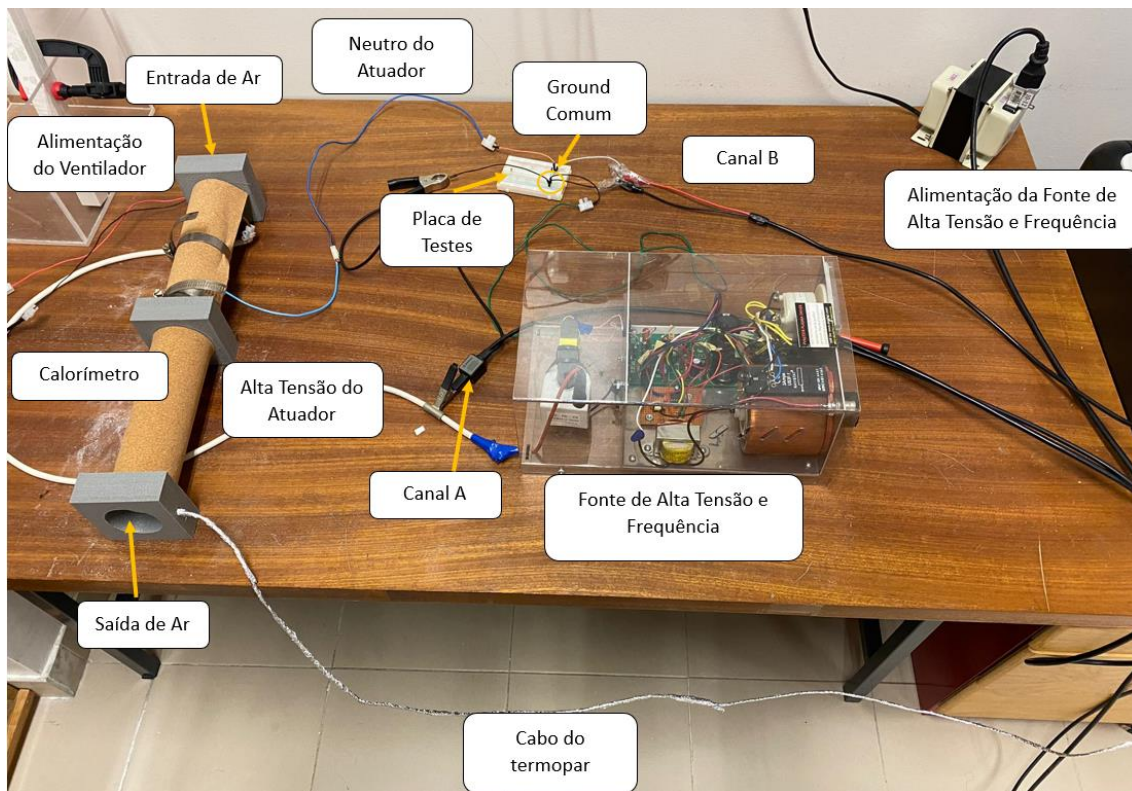
Na figura 4 é possível observar vários componentes, entre eles 3 peças cinzentas, os suportes 1,2 e 3 representados na figura 4, desenhadas em SolidWorks e impressas em PET-G numa impressora 3D de deposição de filamento, que permitem dar apoio as restantes peças; dois tubos que permitem a passagem do ar internamente, sendo que um deles possui uma pequena aba que permite colocar o atuador a plasma dentro do calorímetro, o que se encontra identificado como tubo 1 na figura 4. Esta aba é fechada com recurso a duas abraçadeiras metálicas de modo a impedir a passagem de ar por esta zona, estas encontram-se devidamente afastadas dos condutores de eletricidade de forma a evitar que estas afetem o estudo. O tubo com aba possui 175 mm de comprimento e o tubo 2, 185 mm, ambos com um diâmetro de 43 mm. Estes tubos são revestidos com uma camada de cortiça de modo a reduzir as dissipações de calor. O escoamento de ar é gerado com recurso a um pequeno ventilador modelo "ME40101V1-000U-A99" (produzido pela Sunonwealth Electric Machine Industry, Taiwan), alimentado com uma tensão de 3,7 V, produzindo um escoamento de ar constante de 13,6 m<sup>3</sup>/h, a uma velocidade média de 2,6 m/s. A temperatura foi recolhida com um termopar que se coloca no furo lateral que a peça à esquerda apresenta, com recurso a um código de Arduino, as medições foram retiradas 15 segundos depois da mudança de tensão de modo a que a temperatura estabilize. De modo a mitigar as

interferências eletromagnéticas que este poderia sofrer, o seu cabo foi revestido com papel de alumínio. Assumindo uma temperatura ambiente de 30 °C, pois o estudo foi feito ao longo de vários dias não sendo possível manter a mesma temperatura ambiente em todo o decurso, o que se traduz numa viscosidade cinemática de 1,60 E-5 m<sup>2</sup>/s, o número de Reynolds para estas condições é igual a 6987,5, mostrando que o estudo é feito em regime turbulento.

### 3 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Depois da caracterização elétrica dos atuadores a plasma e do aperfeiçoamento do calorímetro (obtido pela introdução das novas peças impressas e respetivo acoplamento destas) foram efetuadas as ligações necessárias como mostra a figura (5).

**Figura 5 - Montagem Experimental**



É possível observar o calorímetro na parte da esquerda, contendo o atuador no cilindro da parte de cima, este é alimentado pelo cabo de alta tensão do atuador que provém da fonte de alta tensão e elevada frequência, modelo PVM 500 (produzida por Information Unlimited, Inc, Estados Unidos da América) alimentada a 220 V. Nesta montagem é utilizada ainda uma placa de teste de circuitos, onde se encontra a resistência e o condensador de modo a retirar as medições referidas anteriormente. Nesta placa é ainda feito um Ground comum, contendo o neutro do canal A (canal usado para retirar as medições no cabo de alta tensão) o neutro da fonte e o neutro do canal B (canal usado para

retirar as medições na resistência e no condensador). O cabo do termopar é conectado ao Arduino com o módulo "MAX31855", de forma a medir a temperatura. A alimentação do ventilador é efetuada a 12 V na entrada de ar, local onde este se localiza.

## 4 RESULTADOS

Depois da recolha das medições efetuadas e tratamento dos dados em uma folha de Excel, foi possível obter os valores da potência dissipada pelo atuador a plasma e da variação da temperatura do ar circundante devido ao seu funcionamento.

### 4.1 Resultados da Caracterização Elétrica pelo método da Resistência

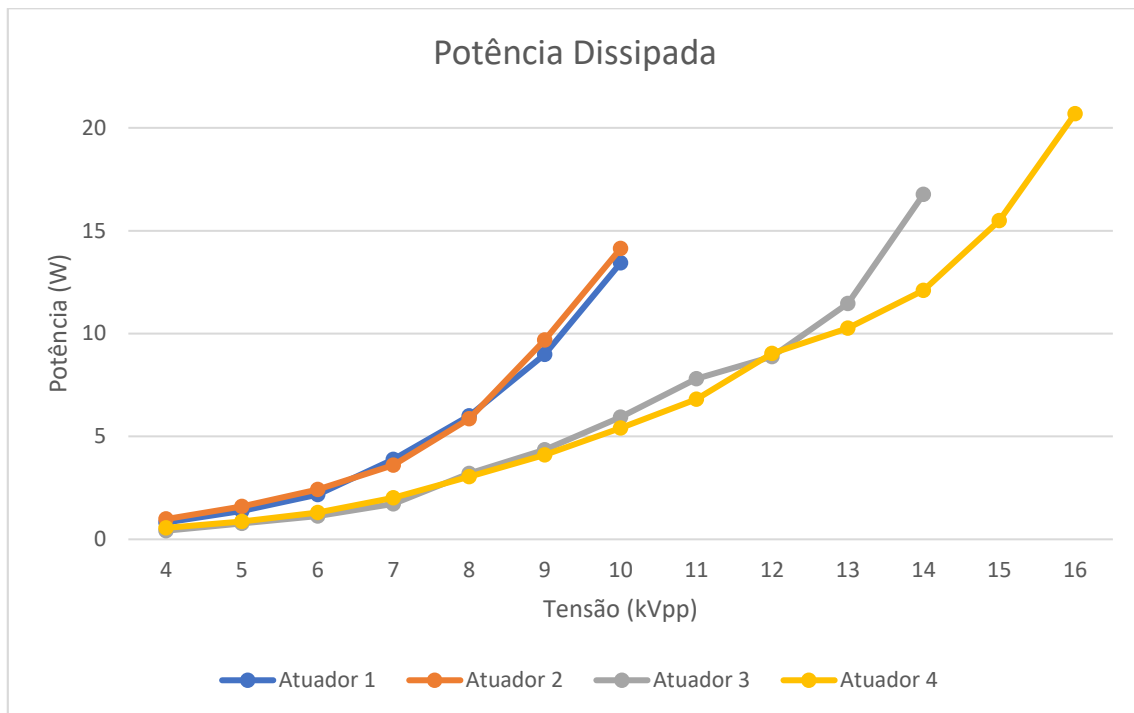
Com esta parte do estudo foi possível obter a potência dissipada pelo atuador a plasma para as diferentes tensões a que estes foram expostos, traduzindo-se nos valores de potência expressos em Watt (W) no quadro (2), estes valores são recolhidos no resistor presente na placa de circuitos.

**Quadro 2 – Resultados da Caracterização Elétrica pela Resistência  
(Potência dissipada em Watt)**

Tensão (kVpp)	Atuador 1 (W)	Atuador 2 (W)	Atuador 3 (W)	Atuador 4 (W)
4	0,8204	0,9849	0,4204	0,5576
5	1,383	1,596	0,7799	0,8732
6	2,173	2,423	1,137	1,311
7	3,887	3,610	1,727	2,015
8	5,996	5,854	3,198	3,053
9	8,981	9,689	4,358	4,104
10	13,43	14,13	5,941	5,412
11	X	X	7,800	6,806
12	X	X	8,886	9,042
13	X	X	11,46	10,26
14	X	X	16,77	12,09
15	X	X	X	15,50
16	X	X	X	20,68

Reunindo os dados obtidos num gráfico para comparação obteve-se desde modo o gráfico (1) de Potência dissipada versus Tensão.

**Gráfico 1 – Potência dissipada versus Tensão**

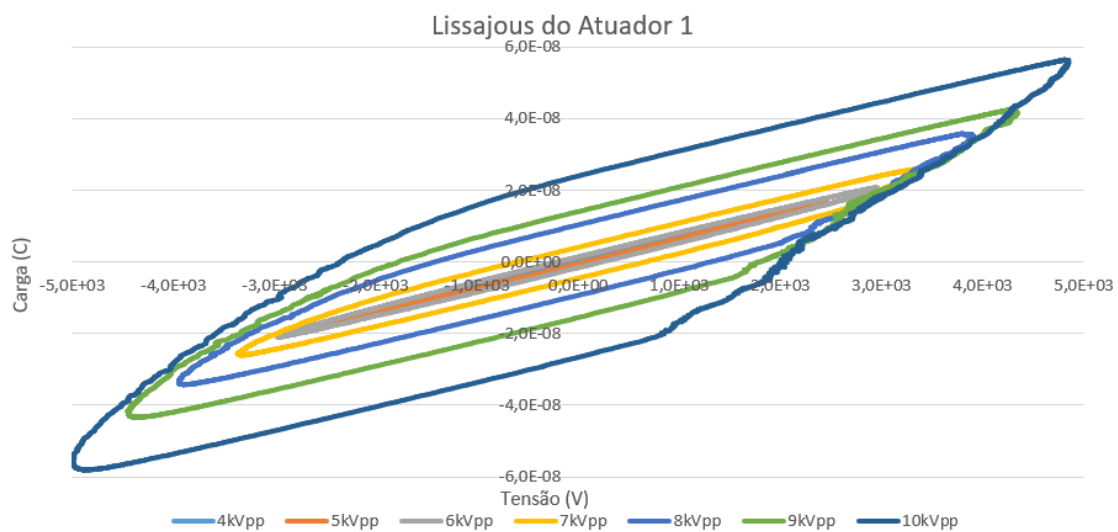


Pela observação do quadro 1 e gráfico 1 é possível concluir que os atuadores 1 e 2 possuem um comportamento idêntico, devido a terem a mesma espessura, tendo o atuator 2 atingindo potências ligeiramente maiores para as tensões de 9 e 10 kVpp, devido ao tamanho do elétrodo exposto ser superior ao elétrodo exposto do atuator 1. Já os atuadores a plasma 3 e 4 também possuem um comportamento idêntico, porém apenas até à tensão de 12 kVpp, depois desta tensão começam a divergir, sendo que o atuator 4 atinge menores potências para o mesmo nível de tensão aplicada, devido ao atuator 4 ter 3 mm de espessura em relação ao atuator 3 que possui 2 mm de espessura, pois os elétrodos possuem as mesmas dimensões. O que demonstra que quanto maior a espessura dos atuadores maior é a tensão necessária para que este atinja potências comparadas com os atuadores de menor espessura.

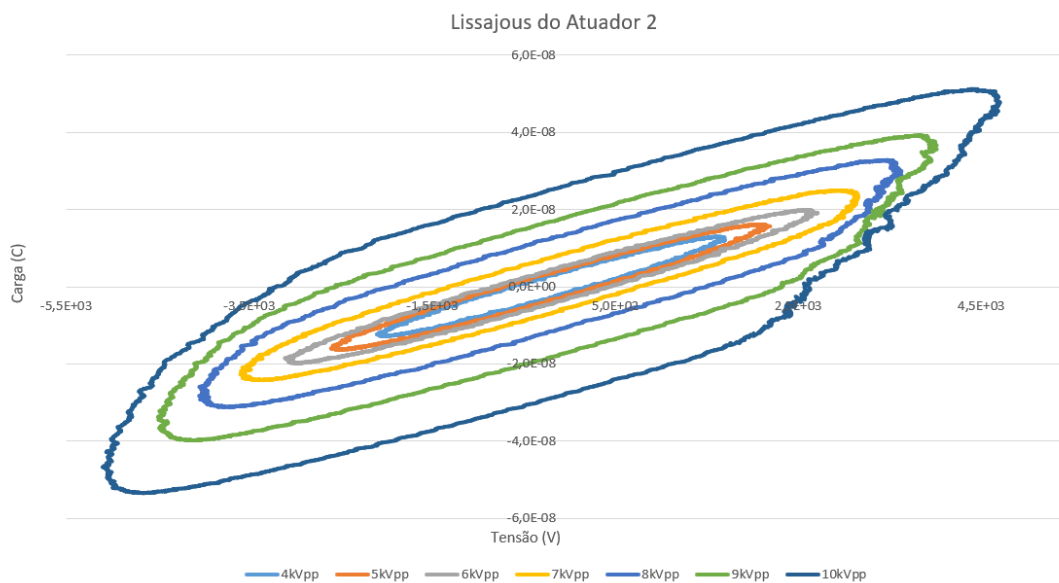
#### **4.2 Resultados da Caracterização Elétrica do Método do Condensador**

Como já referido este método foi usado de forma a completar a caracterização elétrica dos atuadores pelas curvas de Lissajous, seguindo as fórmulas apresentadas no ponto 2.1 com base nos resultados recolhidos pelo PicoScope tratados numa folha de Excel, obtêm-se as seguintes figuras, de dispersão com linhas suaves, apresentadas nos gráficos 2, 3, 4 e 5.

### Gráfico 2 - Curvas de Lissajous do Atuador 1

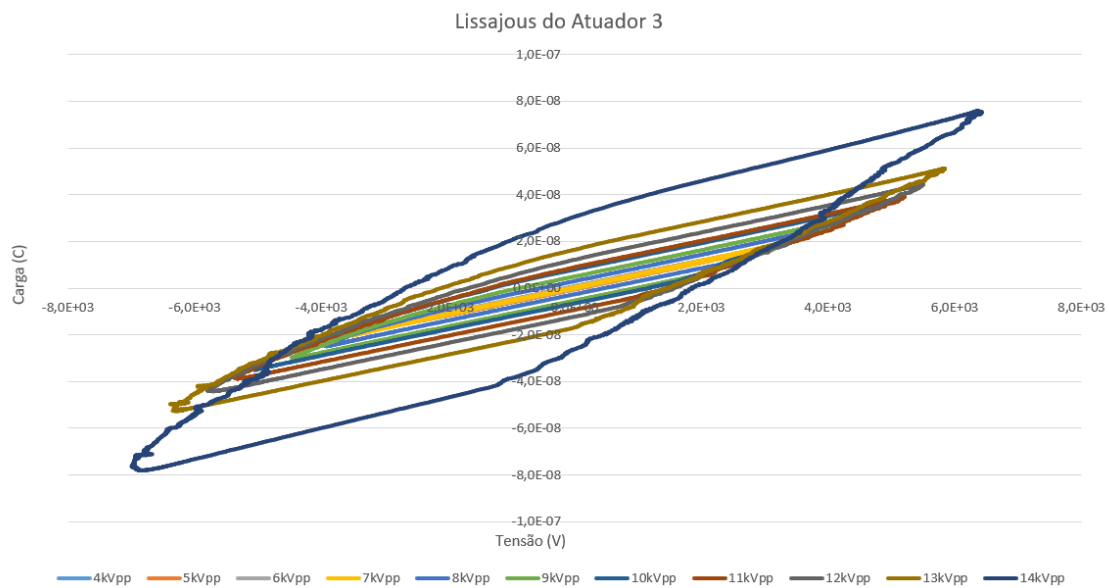


### Gráfico 3 - Curvas de Lissajous do Atuador 2

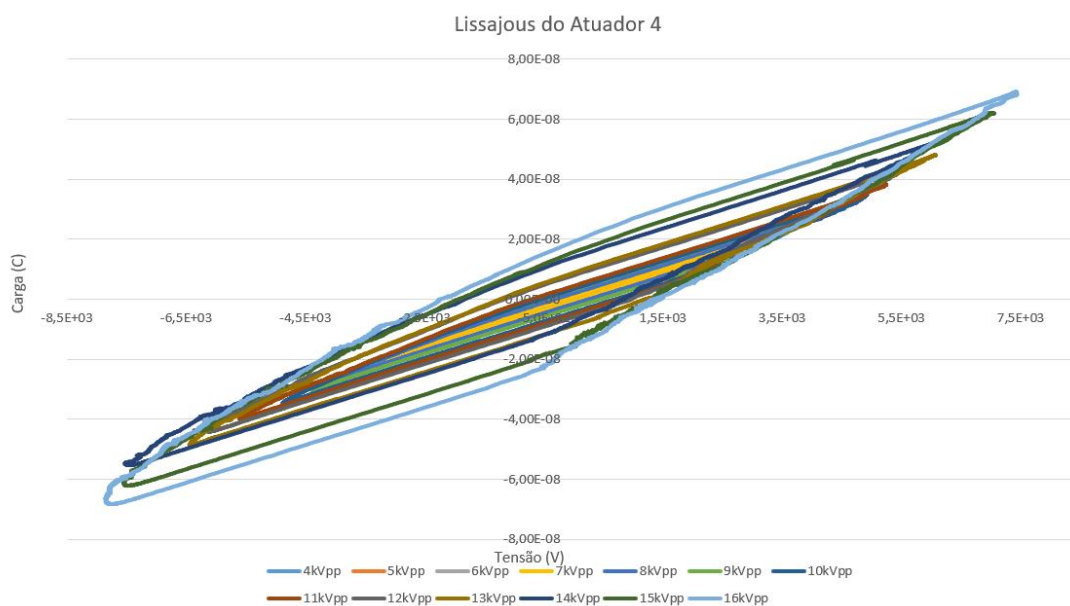


Nestes gráficos é possível observar que para atuadores a plasma com a mesma espessura, o que possui um eletrodo exposto com maior largura atinge maiores cargas para as mesmas tensões, abrindo deste modo mais as curvas de Lissajous.

**Gráfico 4- Curvas de Lissajous do Atuador 3**



**Gráfico 5- Curvas de Lissajous do Atuador 4**



Nos gráficos 4 e 5 já é possível observar que as curvas não abrem tanto, porém atingem cargas maiores para tensões menores, devido às suas espessuras em que é necessária maior tensão para gerar a descarga de plasma para a mesma configuração de eletrodo.

### 4.3 Evolução da Temperatura no Calorímetro

Nesta parte do estudo não foram percorridas as mesmas gamas de tensões utilizadas na caracterização elétrica, pois para os níveis mais baixos não ocorre formação de plasma e, como tal, a dissipação de calor não é significativa. Os valores da temperatura ambiente para cada método são apresentados no quadro (3). Já os valores apresentados no



quadro (4) são obtidos através do termopar e são retirados 15 segundos depois da mudança de tensão para assim esta conseguir estabilizar. Os valores são apresentados em graus Celsius e na ordem método da resistência/método do condensador.

**Quadro 3 – Variação da Temperatura do Ar no Calorímetro**

	Atuador 1	Atuador 2	Atuador 3	Atuador 4
<b>Temperatura Ambiente (°C)</b>	29,15/29,45	28,90/28,90	28,80/28,30	28,75/28,8

**Quadro 4 – Variação da Temperatura do Ar no Calorímetro**

Tensão (kVpp)	Atuador 1 (°C)	Atuador 2 (°C)	Atuador 3 (°C)	Atuador 4 (°C)
7	X	29,00/29,05	X	X
8	X	29,44/29,6	X	X
9	29,38/29,60	30,01/30,00	28,90/28,68	28,85/28,87
10	29,78/29,94	30,79/31,02	29,10/28,90	29,05/28,98
11	X	X	29,30/29,16	29,20/29,12
12	X	X	29,73/29,75	29,41/29,25
13	X	X	30,60/30,70	29,55/29,45
14	X	X	31,4/31,70	29,87/29,61
15	X	X	X	30,10/29,85
16	X	X	X	30,50/30,20

Os resultados mostram que independentemente do método os valores de variação de temperatura são consistentes, demonstrando que tanto a resistência como o condensador não afetam o funcionamento do atuador. Devido ao que já foi referido que estes componentes possuem estas características de forma a garantir que não se afeta o funcionamento do atuador. Por outro lado, é possível observar que quanto maior a espessura do atuador a plasma menor a variação da temperatura do ar circundante, pois é necessário maior nível de tensão para se conseguir gerar a descarga de plasma. Já entre o atuador 1 e 2

é possível ver que com o eletrodo exposto maior, começa a formação de plasma mais cedo, o que se traduz numa maior variação de temperatura com o atuador. Pelas variações de temperatura pode-se estimar a potência térmica dissipada, tendo-se verificado que dos atuadores testados o atuador 3 foi o que permitiu gerar maior potência térmica atingindo cerca de 12 Watt para uma tensão aplicada de 14 kVpp. No entanto, é de referir que de acordo com a literatura (RODRIGUES; PASCOA; TRANCOSSI, 2018c), o número de ensaios deverá ser aumentado para que se possam obter resultados mais precisos. Ainda assim, o presente estudo demonstra a capacidade dos atuadores a plasma para aumentar a temperatura do ar adjacente, sendo que a geração de efeitos térmicos irá depender dos parâmetros geométricos dos atuadores.

## 5 CONCLUSÕES

Com a realização deste estudo sobre dissipação de calor em atuadores a plasma para o ar circundante, recorrendo à técnica calorimétrica, foi possível concluir que quanto maior a espessura da camada dielétrica maior a tensão necessária para que este gere plasma e produza efeitos térmicos consideráveis. A espessura dos atuadores a plasma também influencia a carga que é armazenada pelo atuador uma vez que este apresenta um comportamento semelhante a um condensador. Verificou-se que quanto maior a espessura, maior a carga do atuador para o mesmo nível de tensão. No que diz respeito à transferência de calor foi possível observar que os atuadores, devido ao seu funcionamento, levaram a um aumento da temperatura do ar circundante demonstrando que podem ser eficazes para aplicações na área da prevenção da formação de gelo.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projeto exploratório 'IceWindSolution' com Ref: 2023.15318.PEX e através da unidade de investigação C-MAST (Centro de Ciências e Tecnologias Mecânicas e Aeroespaciais), Unidade de Investigação n.º 151, projeto com as ref. n.º UIDB/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00151/2020>) e UIDP/00151/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/00151/2020>).

## REFERÊNCIAS

ABDOLLAHZADEH, M. et al. Parametric optimization of surface dielectric barrier discharge actuators for ice sensing application. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 335, p. 113391, 1 mar. 2022.

ABDOLLAHZADEH, M.; RODRIGUES, F.; PASCOA, J. C. Simultaneous ice detection and removal based on dielectric barrier discharge actuators. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 315, p. 112361, 1 nov. 2020.

AL-SADAWI, L.; CHONG, T. P.; KIM, J. H. Aerodynamic noise reduction by plasma actuators for a flat plate with blunt trailing edge. **Journal of Sound and Vibration**, v. 439, p. 173–193, 20 jan. 2019.

ASHPIS, D. E.; LAUN, M. C.; GRIEBELER, E. L. Progress toward accurate measurements of power consumptions of DBD plasma actuators. **50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition**, 2012.

BENMOUSSA, A.; RODRIGUES, F. F.; PÁSCOA, J. C. Plasma Actuators for Cycloidal Rotor Thrust Vectoring Enhancement in Airships. **Actuators 2023, Vol. 12, Page 436**, v. 12, n. 12, p. 436, 24 nov. 2023.

GUOQIANG, L. et al. Experimental investigation of dynamic stall flow control for wind turbine airfoils using a plasma actuator. **Energy**, v. 185, p. 90–101, 15 out. 2019.

HU, H. et al. Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Icing Control. <https://doi.org/10.2514/1.C035697>, v. 57, n. 2, p. 383–387, 17 fev. 2020.

HUANG, J.; CORKE, T. C.; THOMAS, F. O. Unsteady Plasma Actuators for Separation Control of Low-Pressure Turbine Blades. <https://doi.org/10.2514/1.19243>, v. 44, n. 7, p. 1477–1487, 2 maio 2012.

JOUSSOT, R. et al. Thermal characterization of a DBD plasma actuator: Dielectric temperature measurements using infrared thermography. **40th AIAA Fluid Dynamics Conference**, 2010.

JUKES, T. N. et al. Jet flow induced by a surface plasma actuator. <http://dx.doi.org/10.1243/09596518JSCE504>, v. 222, n. 5, p. 347–356, 16 ago. 2008.

KOTSONIS, M. Diagnostics for characterisation of plasma actuators. **Measurement Science and Technology**, v. 26, n. 9, p. 092001, 12 ago. 2015.

PESCINI, E. et al. Optimization of micro single dielectric barrier discharge plasma actuator models based on experimental velocity and body force fields. **Acta Astronautica**, v. 116, p. 318–332, 1 nov. 2015.

PORTER, C. O. et al. Plasma Actuator Force Measurements. <https://doi.org/10.2514/1.24497>, v. 45, n. 7, p. 1562–1570, 2 maio 2012.

RODRIGUES, F. et al. An experimental study on segmented-encapsulated electrode dielectric-barrier-discharge plasma actuator for mapping ice formation on a surface: A conceptual analysis. **Journal of Heat Transfer**, v. 143, n. 1, 1 jan. 2021a.

RODRIGUES, F. et al. Recent Developments on Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators for Icing Mitigation. **Actuators 2023, Vol. 12, Page 5**, v. 12, n. 1, p. 5, 21 dez. 2022.

RODRIGUES, F. F. et al. Comparative Evaluation of Dielectric Materials for Plasma Actuators Active Flow Control and Heat Transfer Applications. **American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM**, v. 3, 1 out. 2021b.

RODRIGUES, F. F. et al. Plasma Actuators Based on Alumina Ceramics for Active Flow Control Applications. **Ceramics 2024, Vol. 7, Pages 192-207**, v. 7, n. 1, p. 192–207, 6 fev. 2024.

RODRIGUES, F. F.; PASCOA, J. C.; TRANCOSSI, M. **Analysis of Innovative Plasma Actuator Geometries for Boundary Layer Control**. International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE). **Anais...American Society of Mechanical Engineers Digital Collection**, 8 fev. 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1115/IMECE2016-66495>>. Acesso em: 6 set. 2024

RODRIGUES, F. F.; PASCOA, J. C.; TRANCOSSI, M. Experimental Thermal Characterization of DBD Plasma Actuators. **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)**, v. 1, 10 jan. 2018a.

RODRIGUES, F. F.; PASCOA, J. C.; TRANCOSSI, M. Experimental Analysis of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators Thermal Characteristics under External Flow Influence. **Journal of Heat Transfer**, v. 140, n. 10, 1 out. 2018b.

RODRIGUES, F.; MOREIRA, M.; PÁSCOA, J. Characterization of Plasma-Induced Flow Thermal Effects for Wind Turbine Icing Mitigation. **Energies 2024, Vol. 17, Page 3974**, v. 17, n. 16, p. 3974, 11 ago. 2024.

RODRIGUES, F.; PASCOA, J.; TRANCOSSI, M. Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 90, p. 55–65, 1 jan. 2018c.

TIRUMALA, R. et al. Temperature characterization of dielectric barrier discharge actuators: influence of electrical and geometric parameters. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 47, n. 25, p. 255203, 30 maio 2014.



## **EMPOWERING SUSTAINABILITY: INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND PRACTICES IN AGRICULTURE AND INDUSTRY**

GASPAR, PEDRO DINIS (1); LIMA, TÂNIA MIRANDA (2)

(1) Departamento de Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, E-mail: [dinis@ubi.pt](mailto:dinis@ubi.pt)

(2) Departamento de Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, E-mail: [tmlima@ubi.pt](mailto:tmlima@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [dinis@ubi.pt](mailto:dinis@ubi.pt)

### **RESUMO**

Esta sessão especial centra-se em soluções sustentáveis na agricultura e na indústria através de novas tecnologias e boas práticas. Esta sessão especial é dedicada às aplicações e integração da Internet das Coisas (IoT), da Inteligência Artificial (IA), da robótica e dos sistemas de apoio à decisão para melhorar a eficiência energética, o desempenho térmico e a conservação da biodiversidade para sistemas mais sustentáveis. A sessão especial visa destacar o papel destas tecnologias na promoção da eficiência dos recursos, na redução de resíduos e na criação de produtos de valor acrescentado num modelo económico circular.

**Palavras-chave:** Agricultura de precisão, Indústria, Tecnologias, Inteligência artificial, Internet das coisas, Robótica, Sistemas de apoio à decisão, Eficiência energética, Desempenho térmico, Conservação da biodiversidade, Conservação de recursos, Redução de resíduos, Sustentabilidade, Simbiose industrial.

### **ABSTRACT**

*This special session focuses on sustainable solutions within agriculture and industry through advanced technologies and practices. It aims to explore the integration of Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), robotics, and decision support systems to enhance energy efficiency, thermal performance, and biodiversity conservation for more sustainable systems. The session aims to highlight the role of these technologies in promoting resource efficiency, waste reduction, and the creation of value-added products in a circular economic model.*

**Keywords:** Precision Agriculture, Industry, Technologies, Artificial Intelligence, Internet of Things, Robotics, Decision support systems, Energy efficiency, Thermal performance, Biodiversity conservation, Resources conservation, Waste reduction, Sustainability, Industrial symbiosis.



## **ROBOTA SUDOE - ROBOTICS, DIGITALISATION, AND AUTOMATION AS ENGINES OF COMPETITIVENESS AND GROWTH OF SMES**

GASPAR, P.D. (1); ANTUNES, R. (2); AGUIAR, M. (3); PEREIRA, N. (3)

(1) C-MAST - Centre for Mechanical and Aerospace Science and Technologies, University of Beira Interior, Portugal E-mail: [dinis@ubi.pt](mailto:dinis@ubi.pt); [rodrigo.antunes@ubi.pt](mailto:rodrigo.antunes@ubi.pt); [martim.aguiar@ubi.pt](mailto:martim.aguiar@ubi.pt); [nuno.pereira@ubi.pt](mailto:nuno.pereira@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [rodrigo.antunes@ubi.pt](mailto:rodrigo.antunes@ubi.pt)

### **RESUMO**

O projeto ROBOTA-SUDOE visa modernizar setores tradicionais da economia no sudoeste da Europa (SUDOE), com especial foco nas indústrias agroalimentar e de plásticos, promovendo a transferência de conhecimento e inovação para PMEs (Pequenas e Médias Empresas) localizadas em regiões menos desenvolvidas. O objetivo principal é aumentar a competitividade das PMEs através de soluções de robótica colaborativa, robótica macia e digitalização, com foco na sustentabilidade ambiental. O projeto implementa redes de cooperação entre universidades, centros de pesquisa e o setor industrial, possibilitando a criação de soluções inovadoras adaptadas a processos como o corte de carne, o embalamento de frutas e a montagem de brinquedos. Além disso, serão desenvolvidos e aplicados sistemas avançados de controlo, com integração de inteligência artificial, para melhorar a ergonomia e a eficiência das operações. O projeto também contempla a criação de "living labs" que servirão como ambientes de demonstração e promoção dessas inovações tecnológicas junto a outros setores e regiões. Com estas iniciativas, o ROBOTA-SUDOE pretende promover o equilíbrio territorial, transferindo inovação para áreas rurais e aumentando a atratividade dessas zonas.

**Palavras-chave:** Robótica Colaborativa, Robótica Macia, Automação, PMEs, Agroindústria, Sustentabilidade.

### **ABSTRACT**

*The ROBOTA-SUDOE project aims to modernise traditional sectors of the economy in the southwest of Europe (SUDOE), with a particular focus on the agri-food and plastics industries, promoting the transfer of knowledge and innovation to SMEs (Small and Medium-Sized Enterprises) located in less developed regions. The main objective is to enhance the competitiveness of SMEs through collaborative robotics, soft robotics, and*

*digitalisation, with a focus on environmental sustainability. The project establishes cooperation networks between universities, research centres, and the industrial sector, enabling the creation of innovative solutions adapted to processes such as meat cutting, fruit packaging, and toy assembly. Furthermore, advanced control systems, with artificial intelligence integration, will be developed and applied to improve ergonomics and operational efficiency. The project also includes living labs that serves as technologies demonstrator. Through these initiatives, ROBOTA-SUDOE aims to promote territorial balance by transferring innovation to rural areas and increasing the attractiveness of these regions.*

**Keywords:** Collaborative Robotics, Soft Robotics, Automation, SMEs, Agri-Food Industry, Sustainability.



## **TECHNOLOGICAL INNOVATIONS FOR REMOTE MONITORING AND AI-BASED DECISION SUPPORT IN MOUNTAIN ECOSYSTEMS: THE MONTANHAVIVA PROJECT**

GASPAR, P.D. (1); AGUIAR, M. (1); PEREIRA, N. (1); ANTUNES, R. (1); SOUSA, M. (1); VELOSO, M.; FERREIRA, D. (1); ALVES, D. (1); ALVES, A.C. (1); CORCEIRO, A. (1)

(1) C-MAST - Centre for Mechanical and Aerospace Science and Technologies, University of Beira Interior, Portugal E-mail: [dinis@ubi.pt](mailto:dinis@ubi.pt); [martim.aguiar@ubi.pt](mailto:martim.aguiar@ubi.pt); [nuno.pereira@ubi.pt](mailto:nuno.pereira@ubi.pt); [rodrigo.antunes@ubi.pt](mailto:rodrigo.antunes@ubi.pt); [galvao.sousa@ubi.pt](mailto:galvao.sousa@ubi.pt); [mariana.veloso@ubi.pt](mailto:mariana.veloso@ubi.pt); [daniel.b.ferreira@ubi.pt](mailto:daniel.b.ferreira@ubi.pt); [david.filipe.alves@ubi.pt](mailto:david.filipe.alves@ubi.pt); [ana.cristina.alves@ubi.pt](mailto:ana.cristina.alves@ubi.pt); [ana.corceiro@ubi.pt](mailto:ana.corceiro@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [dinis@ubi.pt](mailto:dinis@ubi.pt)

### **RESUMO**

O projeto MontanhaViva integra tecnologias avançadas para monitorizar e apoiar o turismo sustentável em áreas montanhosas. Os principais desenvolvimentos incluem sistemas de deteção remota, análise de imagens de alta resolução e uma plataforma inteligente para prever o crescimento das plantas. O projeto utiliza comunicação sem fios para transferência de dados, redes de sensores para monitorização em tempo real e algoritmos de IA para avaliar o vigor das plantas. Uma plataforma web consolida estas tecnologias, permitindo a visualização de dados e apoio à decisão. Adicionalmente, são propostas oportunidades para o desenvolvimento de novos negócios centrados no turismo sustentável e na comercialização de produtos regionais. Uma inovação crucial é a aplicação móvel que guia os turistas por trilhos de montanha com flora endémica, fornecendo informações em tempo real sobre as propriedades medicinais e aromáticas das flores nativas, melhorando a experiência do visitante. Esta tecnologia apoia a criação de visitas guiadas, linhas de produtos ecológicos e workshops educacionais. Ao integrar IA e serviços de geolocalização, a aplicação promove uma experiência de turismo sustentável e enriquecedora em ecossistemas de montanha. Esta abordagem tecnológica oferece insights valiosos para a gestão de ecossistemas, alinhando-se com os objetivos de turismo sustentável.

**Palavras-chave:** Deteção Remota, Suporte à Decisão com IA, Turismo Sustentável, Monitorização de Ecossistemas, Conservação da Biodiversidade.



## **ABSTRACT**

*The MontanhaViva project integrates advanced technologies to monitor and support sustainable mountain tourism. Key developments include remote sensing systems, high-resolution image analysis, and an intelligent platform for predicting plant growth. The project employs wireless communication for data transfer, sensor networks for real-time monitoring, and AI algorithms to assess plant vigor. A web-based platform consolidates these technologies, enabling data visualization and decision-making support. Additionally, opportunities for developing new businesses focused on sustainable tourism and the commercialization of regional products are proposed. A key innovation is the mobile application that guides tourists through mountain paths featuring endemic flora. The app provides real-time information on the medicinal and aromatic properties of native flowers, enhancing the visitor experience. This technology supports the creation of guided tours, eco-friendly product lines, and educational workshops. By integrating AI and geolocation services, the app fosters an enriched and sustainable tourism experience in mountain ecosystems. This technological approach offers valuable insights into ecosystem management, aligning with sustainable tourism goals.*

**Keywords:** *Remote Sensing, AI-based Decision Support, Sustainable Tourism, Ecosystem Monitoring, Biodiversity Conservation.*



## HIGHLY SENSITIVE FLEXIBLE THREE-DIMENSIONAL STRAIN SENSOR AND ITS APPLICATION

YEBO, LU (1); YAODONG, ZHU (2)

(1) COLLEGE OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING, JIAXING  
UNIVERSITY, E-mail: [luyebo@zjxu.edu.cn](mailto:luyebo@zjxu.edu.cn)

(2) COLLEGE OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING, JIAXING  
UNIVERSITY, E-mail: [zhuyaodong@163.com](mailto:zhuyaodong@163.com)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [luyebo@zjxu.edu.cn](mailto:luyebo@zjxu.edu.cn)

### ABSTRACT

*Various techniques have been developed to fabricate flexible sensors for applications in human–computer interaction and rehabilitation exercise by monitoring 3D deformation. However, the accurate detection of 3D deformation using flexible sensors remains a challenge. The common visual inspection methods are easily affected by the external environment such as insufficient light, water mist, occlusion, monitoring angle and other factors. The flexible three-dimensional strain sensor can closely fit with the flexible body, which solves the defect of visual detection and is suitable for online detection of 3D deformation of flexible body. However, the current research on flexible strain sensor mainly focuses on the detection of two-dimensional plane stretching, bending and other actions, and the research on three-dimensional structure sensor is rare, mainly because of the lack of sensor structure design suitable for contact flexible body deformation detection. It is also difficult to prepare a three-dimensional strain sensor with high sensitivity, large range and self-healing capability. And high precision identification algorithm model of 3D structural deformation has not been established yet. This paper proposes a design method of flexible three-dimensional strain sensor, constructs a metal/composite double-layer structure, analyzes the interface characteristics to regulate the crack growth law, realizes "dual channel" circuit detection, establishes an electrothermal model, and realizes the crack self-healing of the metal layer. Based on this technique, a flexible three-dimensional strain sensor with advantages of high accuracy, self-healing and low cost is prepared. The sensitivity and detection range are greatly improved. The multi-channel signal numerical calculation model is developed to realize real-time feedback of 3D deformation.*

**Keywords:** Flexible strain sensor; Crack; Ultra-highly sensitive; Self-healing; Human motion detection.



## **IMPLEMENTATION OF INTERACTIVE DIGITAL PANELS TO PROMOTE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY AND TOURISM IN SERRA DA GARDUNHA: THE MONTANHA VIVA APPROACH**

SOUSA, M. (1); VELOSO, M.; FERREIRA, D. (1); ALVES, D. (1); ALVES, A.C. (1); CORCEIRO, A. (1); AGUIAR, M. (1); ANTUNES, R. (1); PEREIRA, N. (1); GASPAR, P.D. (1)

(1) C-MAST - Centre for Mechanical and Aerospace Science and Technologies, University of Beira Interior, Portugal E-mail:

[galvao.sousa@ubi.pt](mailto:galvao.sousa@ubi.pt); [mariana.veloso@ubi.pt](mailto:mariana.veloso@ubi.pt); [daniel.b.ferreira@ubi.pt](mailto:daniel.b.ferreira@ubi.pt);  
[david.filipe.alves@ubi.pt](mailto:david.filipe.alves@ubi.pt); [ana.cristina.alves@ubi.pt](mailto:ana.cristina.alves@ubi.pt); [ana.corceiro@ubi.pt](mailto:ana.corceiro@ubi.pt);  
[martim.aguiar@ubi.pt](mailto:martim.aguiar@ubi.pt); [rodrigo.antunes@ubi.pt](mailto:rodrigo.antunes@ubi.pt); [nuno.pereira@ubi.pt](mailto:nuno.pereira@ubi.pt);  
[dinis@ubi.pt](mailto:dinis@ubi.pt)

ENDEREÇO DE CORRESPONDÊNCIA: [dinis@ubi.pt](mailto:dinis@ubi.pt)

### **RESUMO**

A região da Serra da Gardunha possui uma rica biodiversidade e um potencial significativo para a educação ambiental e o turismo sustentável. O projeto Montanha Viva pretende explorar este potencial, melhorando as experiências dos visitantes ao longo dos trilhos pedestres aí localizados. Este estudo visa desenvolver e implementar painéis digitais interativos ao longo dos percursos pedestres dos trilhos pedestres. Os painéis são concebidos para fornecer aos visitantes informações detalhadas sobre a flora local, expondo propriedades bioativas e potenciais aplicações na saúde, promovendo assim a sustentabilidade ambiental e o turismo.

O processo de desenvolvimento compreendeu duas etapas. Na primeira etapa, foi desenhada uma estrutura externa e os componentes foram fabricados utilizando tecnologia de corte a laser, sendo posteriormente montados numa unidade coesa baseada num design inovador e moderno. Na segunda etapa, foi integrada uma interface digital, com um monitor para apresentar o conteúdo interativo. Foi desenvolvida uma apresentação de fácil utilização, permitindo aos visitantes aceder a informações sobre a flora circundante e percursos pedestres. Cinco botões táteis foram incorporados na estrutura externa do painel para facilitar a navegação intuitiva e o acesso rápido à informação desejada.

Os painéis digitais interativos conseguiram fundir com sucesso o design estético com a utilidade funcional. Os visitantes podem agora aceder a informações abrangentes sobre a flora local, incluindo as suas propriedades bioativas e usos relacionados com a saúde e bem-estar,

aumentando tanto o valor educativo como o envolvimento dos visitantes.

Espera-se que a implementação destes painéis interativos melhore significativamente a educação ambiental e a experiência dos visitantes ao longo dos trilhos pedestres da Serra da Gardunha. Esta iniciativa enquadra-se nos objetivos do projeto Montanha Viva de promover a sustentabilidade ambiental e melhorar o turismo na região da Serra da Gardunha.

**Palavras-chave:** Turismo sustentável, Painéis interativos, Sustentabilidade ambiental, Envolvimento do visitante.

### ABSTRACT

*The Serra da Gardunha region has rich biodiversity and significant potential for environmental education and sustainable tourism. The Montanha Viva project aims to explore this potential by enhancing visitor experiences along the Gardunha trails. This study aims to develop and implement interactive digital panels along the walking routes of the Gardunha trails. The panels are designed to provide visitors with detailed information about the local flora, emphasizing bioactive properties and potential health applications, thereby promoting environmental sustainability and tourism.*

*The development process comprised two stages. In the first stage, an external structure was designed and components were crafted utilizing laser-cutting technology and assembled into a cohesive unit based on an innovative and modern design. In the second stage, a digital interface was integrated, featuring a monitor to display interactive content. A user-friendly presentation was developed, allowing visitors to access information on surrounding flora and hiking routes. Five tactile buttons were incorporated into the panel's outer structure to facilitate intuitive navigation and quick access to desired information.*

*The interactive digital panels successfully merged aesthetic design with functional utility. Visitors can now access comprehensive information about local flora, including their bioactive properties and health-related uses, enhancing both educational value and visitor engagement.*

*The implementation of these interactive panels is expected to significantly enhance environmental education and visitor experience along the Gardunha trails. This initiative is within the Montanha Viva project's objectives of promoting environmental sustainability and improving tourism in the Serra da Gardunha region.*

**Keywords:** Sustainable tourism, Interactive panels, Environmental sustainability, Visitor engagement.

# ICEUBI

## International Congress on Engineering 2024



## Sustainability and Resilience: Innovation and Solutions



**27, 28 e 29 nov**

**Universidade da Beira Interior  
Covilhã | Portugal**

<https://iceubi2024.pt/>



ORDEM  
DOS  
ENGENHEIROS

