Revista Científica
Academia da Força Aérea

Publicada anualmente com textos em português e em inglês, a Revista Científica da Academia da Força Aérea é uma publicação da Força Aérea.

Destina-se a divulgar a atividade da Academia da Força Aérea, no domínio da investigação científica, designadamente Teses de Mestrado, Doutoramento e Trabalhos de Final de Curso.

As opiniões expressas nesta revista pertencem aos respetivos autores.

N.º 14, publicação anual, 2024

Ficha Técnica

Diretor

Comandante da Academia da Força Aérea
Major-General Piloto Aviador Fernando Manuel Lourenço da Costa

Conselho Editorial

Diretor da Direção de Ensino da Academia da Força Aérea
Coronel Engenheiro Aeronáutico Luís Meireles

Chefe do Gabinete de Avaliação e Qualidade
Coronel Técnica de Operações de Meteorologia Lídia Santana

Chefe do Gabinete de Estudos e Planeamento
Coronel Polícia Aérea António Churro

Comandante do Corpo de Alunos
Coronel Piloto Aviador José Dias

Diretora do Centro de Investigação da Academia da Força Aérea
Tenente-Coronel Técnica de Manutenção de Armamento e Equipamento Paula Gonçalves

Conselho Consultivo

Tenente-Coronel Médico Marcos Cabral
Tenente-Coronel Engenheiro Eletrotécnico Ricardo Sousa
Major Engenheiro de Aeródromos Nuno Garcez
Major de Administração Aeronáutica João Pina
Major Psicóloga Ana Gomes
Capitão Piloto Aviador Tiago Carvalho
Capitão Engenheiro Eletrotécnico Diogo Silva
Tenente Engenheiro Aeronáutico Vasco Coelho

Propriedade:	Academia da Força Aérea
Título:	Revista Científica da Academia da Força Aérea
Periodicidade:	Anual, Número 14, 15 de outubro de 2024
Composição da Capa:	Assistente Técnica Sónia Silva
Paginação:	Tenente Vasco Coelho Academia da Força Aérea, Força Aérea Portuguesa
Impressão:	*What Colour is this?*
ISSN:	2182-2174
Depósito legal:	328295/11
Tiragem	50 exemplares
Morada:	Academia da Força Aérea, Granja do Marquês 2715-021 Pêro Pinheiro, Portugal
Correio eletrónico:	gabcmd@academiafa.edu.pt

Mensagem de Abertura

"Consolidar a afirmação de uma Força Aérea inovadora e sustentável, como Instituição de referência, associada a uma excelência de resposta, pronta e abnegada, assente nos valores da identidade nacional e nas virtudes militares" é a Visão que publicamente assumi em 30 de março de 2022, na minha "Orientação para a Força Aérea", que reiterei na minha Diretiva Estratégica 2022-2025, e que, reconheço, estar fortemente patente na 14.ª edição da *Revista Científica da Academia da Força Aérea* que é agora levada à estampa.

Uma edição que congrega um conjunto de investigações – metodologicamente rigorosas e de elevado carácter científico –, desenvolvidas por alunos de várias especialidades do Mestrado em Ciências Militares e Aeronáuticas, que, pelo seu mérito (publicamente distinguido nas suas provas públicas de defesa das associadas dissertações) constitui um significativo contributo para o conhecimento, quer da comunidade académica, em particular, quer da sociedade, em geral.

Sendo unanimemente reconhecido que a qualidade da Educação/Formação está direta e exponencialmente relacionada com a bem-sucedida evolução de uma *Sociedade*, considero serem ainda mais meritórias as evidências, cientificamente validadas, dos 11 estudos aqui apresentados, que atestam, também, a excelência da preparação de quadros altamente qualificados ao nível das Ciências Militares.

Pelo referido, e na minha qualidade de Chefe do Estado-Maior da Força Aérea, endereço as minhas felicitações a todo o efetivo da Academia da Força Aérea, direta e indiretamente ligado ao sucesso de mais esta iniciativa.

À audiência, de académicos e investigadores, a militares, civis e demais que se identificam com as matérias aqui estudadas e divulgadas, expresso os meus muito sinceros e sentidos votos de uma proveitosa e agradável leitura.

João Guilherme Rosado Cartaxo Alves, General
Chefe do Estado-Maior da Força Aérea

Editorial

A Academia da Força Aérea (AFA), ciente da sua missão de Preparar Hoje os Líderes de Amanhã, tem vindo a manter a tradição da divulgação de trabalhos de investigação efetuados pelos seus alunos de mestrado, cumprindo elevados padrões de exigência e rigor, onde se almeja não apenas a excelência, mas também a pertinência dos temas para o ramo.

Num contexto de permanente mudança e inovação tecnológica à velocidade da relevância, a Força Aérea e a AFA continuam a saber adaptar-se, encontrando-se presentemente a operar uma mudança de paradigma associada à transformação do Poder Aeroespacial, assente nos pilares: Pessoas, Processos e Tecnologia. As Pessoas, pilar no qual a AFA desempenha um papel extraordinariamente importante na sua formação militar, académica e científica, desde tenra idade, contribuindo assim para a capacitação de recursos humanos para operação de Sistemas de Armas de 5ª geração, em operações que se estendem ao 5º domínio operacional: o espaço. Também o esforço contínuo pela produção de novos contributos para o conhecimento através da investigação dos nossos alunos, procuram contribuir para o reforço dos pilares Tecnologia e Processos.

Neste contexto, surge a 14.ª Edição da Revista Científica da AFA, que, uma vez mais, pretende disseminar, tanto junto da comunidade científica, como do meio militar, um conjunto de trabalhos cuja qualidade é exemplo do que de melhor se faz no Ensino Superior Militar. Em áreas tão diversas quanto as especialidades dos alunos que os desenvolveram, os artigos que ora se publicam pretendem contribuir para o acervo de conhecimento científico com relevância para a Força Aérea, para as Forças Armadas, e para o país. Com esse mesmo objetivo, incluem-se também referências a artigos publicados em conferências ou jornais das respetivas especialidades. Este conjunto proporciona uma visão das competências adquiridas, bem como do potencial dos futuros oficiais da Força Aérea para enfrentarem os desafios que o futuro lhes trará.

Esta edição, tal como as que lhe antecederam, é fruto de um trabalho de equipa com múltiplos intervenientes: os alunos, os seus orientadores, e muitos outros que contribuíram para que os trabalhos que deram origem aos artigos publicados se materializassem, e que importa aqui relevar.

Tendo sempre presente o nosso lema "E não menos por armas que por letras", convidamos os nossos leitores a juntarem-se a nós numa reflexão sobre os temas apresentados, na expetativa de que possamos, em conjunto, contribuir para uma Força Aérea 5.3 ao serviço da Nação.

Fernando Manuel Lourenço da Costa, Major-General Piloto Aviador
Comandante da Academia da Força Aérea

Introdução

A Revista Científica da Academia da Força Aérea (AFA) apresenta, nesta 14.ª edição, 11 artigos científicos, selecionados pela relevância intelectual, qualidade científica e originalidade, de entre os 28 trabalhos de investigação que foram elaborados pelos alunos de Mestrado, das especialidades Piloto-Aviador, Engenharia Aeronáutica, Engenharia Eletrotécnica, Engenharia de Aeródromos, Administração Aeronáutica e Medicina, no ano-letivo 2022-2023.

Nesta publicação anual, pretende-se divulgar, em fonte aberta e acessível a todos, os trabalhos, que mais se destacaram em todos os cursos de mestrado da AFA, representando a diversidade e a qualidade das diversas áreas científicas e o especial contributo para a consolidação das ciências militares aeronáuticas, nomeadamente em tecnologias aeronáuticas (4), comportamento organizacional (2), eletrotecnia e telecomunicações (1), infraestruturas aeronáuticas (1), economia e gestão (1), relações internacionais (1), e medicina aeronáutica (1).

Na área das tecnologias aeronáuticas, são apresentados quatro artigos.

O artigo "Characterization and Environmental Impact Analysis for a Series Hybrid Electric Propulsion System for UAV Implementation" aborda a implementação de Sistemas de Propulsão Elétrica Híbrida em Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV).

O artigo "Hydrogen Fuel Cell System Testing and Characterization for UAV Applications" apresenta a aplicação de uma pilha de células de combustível de membrana de permuta de protões num UAV.

O artigo "Design and Implementation of a Vision-Based Autoland System" estuda a conceção, implementação e validação de um sistema de controlo de aterragem tridimensional para um UAV, de descolagem e aterragem vertical.

O artigo "Efeito da Radiação Gama em compósitos Carbono-Epóxi com adição de Grafeno" analisa o efeito combinado da radiação e da dopagem de grafeno em compósitos carbono-epóxi, com aplicação no setor aeronáutico.

Na área do comportamento organizacional, são apresentados dois artigos.

O artigo "O Bem-Estar na Força Aérea Portuguesa: Influência da Autenticidade e Personalidade" analisa o bem-estar, a autenticidade e a personalidade na Força Aérea e a relação entre estes.

O artigo "A Satisfação como Variável Mediadora na Influência do Balanço Trabalho-Família na Retenção dos Militares dos Quadros Permanentes da Força Aérea" analisa a relação entre o balanço trabalho-família, a satisfação no trabalho e a melhor eficácia na retenção dos militares do quadro permanente da Força Aérea.

Na área da eletrotecnia e telecomunicações, é apresentado o artigo "Implementation of 5G Private Networks at Portuguese Air Force", que estuda a implementação de redes privadas 5G na Força Aérea, focando-se especificamente nas suas potenciais aplicações.

Na área das infraestruturas aeronáuticas, é apresentado o artigo "Stabilization of Compressed Earth Blocks Through the Incorporation of the Cementitious Fraction Recovered from Concrete Residues - Durability", que estuda a utilização de cimento reciclado, como forma de estabilização de blocos de terra comprimida, com enfoque no seu comportamento, em termos de durabilidade à água e como solução construtiva mais sustentável e amiga do ambiente.

Na área da economia e gestão, é apresentado o artigo "Aplicação de machine learning na previsão de desvios e controlo orçamental na Força Aérea", que estuda a aplicação de tecnologias emergentes, nomeadamente machine learning, na previsão da ocorrência de desvios no controlo orçamental na Força Aérea.

Na área das relações internacionais, é apresentado o artigo "A Proliferação de Armas Nucleares: Opção Zero das Armas Nucleares no Século XXI", que reflete sobre o contributo dos arsenais nucleares para uma dissuasão nuclear eficaz e quais os principais obstáculos ao desarmamento nuclear.

E, por último, na área da medicina aeronáutica, é apresentado o artigo "Imagem Endoscópica Avançada e Inteligência Artificial na Deteção de Displasia e Cancro Gástrico Precoce", que estuda a aplicação da inteligência artificial à endoscopia para melhorar a taxa de deteção de lesões displásicas e e cancro gástrico precoce.

Todos os artigos científicos, com particular relevância para os que são hoje publicados nesta edição, além de constituírem um contributo importante da AFA para o conhecimento científico, no âmbito das Ciências Militares Aeronáuticas, representam, também, uma forma de valorizar e prestigiar o ensino superior militar, com reconhecimento dos pares, nacionais e estrangeiros.

Este contributo e valorização são tanto mais significativos, por terem, ainda, sido publicados em revistas científicas indexadas ou jornais internacionais e apresentados em conferências internacionais, os artigos "Study of Fatigue Crack Propagation on Modified CT Specimens under Variable Amplitude Loadings using Machine Learning", "Leveraging Data Science for Predictive Maintenance in Military Aviation: a Statistical Case Study of the Portuguese Air Force's F-16 Fleet", "Study of photovoltaic cells for UAV applications", "Study of the Use of Synthetic Images in the Training of Neural Networks for Detection with UAVs" e "Estimação Cooperativa para um Sistema de Seguimento de Alvos em Ambiente Marítimo".

É, pois, o reconhecimento nacional e internacional da qualidade do ensino e da investigação que a AFA tem sabido construir ao longo da sua existência, como instituição de ensino superior, bem como aquele que resulta das parcerias com entidades de referência, como o IST, o ISEG e a FMUL, que, no seu conjunto, conferem prestígio, contribuem para o conhecimento científico e tornam ainda mais importante o que norteia a nossa academia, o "E NÃO MENOS POR ARMAS QUE POR LETRAS".

Luís Miguel Mouta Meireles, Coronel Engenheiro Aeronáutico
Diretor de Ensino da Academia da Força Aérea

Revista Científica
Academia da Força Aérea

Índice

Characterisation and Environmental Impact Analysis for a Series Hybrid Electric Propulsion System for UAV Implementation 13
TEN/ENGAER Francisco Pereira Pedrosa

Hydrogen Fuel Cell System Testing and Characterisation for UAV Applications . . 31
TEN/ENGAERD inis Manuel da Costa Salgado

Design and Implementation of a Vision-based Autoland System 51
ALF/PILAV José Pedro Neves da Rocha

O Bem-estar na Força Aérea Portuguesa: Influência da Autenticidade e personalidade 69
ALF/PILAV Manuel Sousa Tavares Alves Valadares

Stabilization of Compressed Earth Blocks Through the Incorporation of the Cementitious Fraction Recovered from Concrete Residues – Durability 87
TEN/ENGAED José Frederico Teodoro Rodrigues

Implementation of 5G Private Networks at Portuguese Air Force 107
TEN/ENGEL Ana Rita Fonseca Ramalho

Aplicação de machine learning na previsão de desvios e controlo orçamental na Força Aérea Portuguesa 123
TEN/ADMAER Pedro de Oliveira Palmas

Efeito combinado da Radiação Gama e dopagem com Grafeno em compósitos Carbono-Epóxi 147
ALF/PILAV Guilherme Coelho Marques

A proliferação de armas nucleares: A opção zero no século XXI 167
ALF/PILAV Fancisco Branco da Cunha

A Satisfação como variável mediadora na influência do balanço Trabalho-Família na retenção dos militares dos Quadros Permanentes da Força Aérea 185
TEN/PILAV Pedro Miguel Carvalho Marques

Imagem Endoscópica Avançada e Inteligência Artificial na Deteção de Displasia e Cancro Gástrico Precoce 201
TEN/MED Jorge Miguel Pinto Homem Pires

Characterisation and Environmental Impact Analysis for a Series Hybrid Electric Propulsion System for UAV Implementation

Author: TEN/ENGAER Francisco Pereira Pedrosa
Master of Science Degree in Military and Aeronautical Sciences – Aeronautical Engineering
Air Force Academy, Sintra

Supervisor: Professor Doutor Afzal Suleman
Instituto Superior Técnico, Lisboa

Co-Supervisor: TCOR/ENGAER Luís Félix
Air Force Academy, Sintra

Abstract: The aviation sector, with the increase in restrictions and regulations that target environmental concerns, seeks to find more sustainable propulsion systems. While emission free solutions are not viable for widespread implementation, Hybrid Electric Propulsion System (HEPS) are seen as a major solution, gaining increasing support and establishment. Since these propulsion systems have numerous advantages, they are considered to be a more environmentally beneficial technology. However, the reality is more complex, and a complete study of their impact over their entire life cycle is crucial before any conclusions can be drawn. This thesis focuses on the study of various propulsion systems. Firstly, two series HEPS, Cortex-50 and Pegasus GE70, will be characterized and compared from a performance perspective to understand which is better to be installed on a multirotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Experimental tests will be carried out on Cortex-50, while Pegasus GE70 will be analyzed from a theoretical point of view, since it was not possible to test it experimentally. Next, the performance and endurance of the Cortex-50 hybrid electric, all electric and hydrogen fuel cell propulsion systems were compared to explore the feasibility of their implementation in a UAV. The hydrogen fuel cell propulsion system was the one with the best results. Finally, a study of the total life cycle assessment of the various propulsion systems is undertaken, enabling it to be determined which propulsion systems have the greatest impact on the environment during their life cycle, from production to end-of-life. Over the entire life cycle, the all-electric propulsion system has the lowest environmental impact. On the other hand, the hydrogen fuel cell propulsion system damages the environment the most.

Keywords: Hybrid Electric Propulsion System; Series Configuration; Life Cycle Assessment; Unmanned Aerial Vehicle.

1 Introduction

The climate crisis has grown in importance over time and has implications in every aspect of daily life. One of the primary reasons for global warming is the emission of greenhouse gases. In order to reverse this scenario more environmentally friendly policies and goals must be established (Silva, 2022).

The aviation sector is one of the sectors where greenhouse gas emissions are expected to grow the fastest in the near future. In 2019, according to the Air Transport Action Group, the total number of air travel passengers was 4.5 billion, which translated into 12% of global transport-related Carbon Dioxide (CO_2) emissions (Air Transport Action Group, 2020).

Strategies that aim to mitigate greenhouse gases as well as the implementation of energy policies play a vital role in reducing the emissions in this sector (European Comission, 2021). The first to be introduced was the Flight Path 2050 strategy, whose main goal is to reduce CO_2 and Nitrogen Oxides (NO_X) by 75% and 90% in 2050 compared to the year 2000 (European Commission, 2011). Another policy was mandated by the International Air Transport Association (IATA) was that airlines had to reduce their fuel consumption by 1.5% a year, between 2010 to 2020 (IATA, 2021).

In order to mitigate the greenhouse gas emissions, studies have been carried out to change the current propulsion systems with electric battery-powered ones. Although these systems offer the great advantage of not polluting during flight, the endurance is limited by the energy storage capacity of the batteries (Bolam et al., 2020). Due to this, and despite the research to advance this technology is ongoing, alternative possibilities are being explored, and this is where the Hybrid Electric Propulsion System (HEPS) comes in. In these systems, electric motors that are powered by batteries are usually combined with conventional fuel-burning propulsion systems.

Their employment, despite continuing to use fossil fuels, presents a path that mitigates the discharge of damaging emissions into the environment, when compared to conventional systems (Farinha, 2022).

HEPS offer numerous advantages in terms of powertrain efficiency, reduction of greenhouse gas emissions and pollution compared to conventional combustion engine propulsion systems (Wang & Santini, 1992). This has led to the widespread idea that these systems are a more environmentally beneficial technology. The reality is much more complex, requiring a more complete study of the environmental impacts of all these systems during their life cycle. Consistent comparisons between these new technologies and conventional solutions, through a life cycle assessment (LCA), are essential to support development and research policies and investment decisions, and to demonstrate that these systems really are environmentally advantageous (Hawkins et al., 2013).

This work focuses on the intensive investigation of a series HEPS with the aim of its integration into a multirotor. This analysis was conducted from a performance point of view, where the Cortex-50 series hybrid was characterized through ground tests, assessing the feasibility of integrating this system into a UAV. Furthermore, the performance of the series hybrid generator was compared with a all-electric and a hydrogen fuel cell propulsion systems. Lastly, an environmental analysis, through a life cycle assessment, was performed on various propulsion systems.

2 Background

2.1 Hybrid Electric Propulsion System

A HEPS indicates that the electric power source is used with at least an additional power source, generally from an internal combustion engine (ICE). A combination of hydrogen fuel cells with an electric motor (EM) or an EM/battery is also regarded as a hybrid electric system (Pornet & Isikveren, 2015).

The use of HEPS exploits the advantages of each power source while minimizing their weaknesses. Compared to conventional propulsion systems, exhibit the great advantage of a reduction in fuel consumption and emissions and allow for lower-vibration operations (Matlock et al., 2019).

According to the way the two types of power are combined, there are two main configurations for HEPS: series and parallel. In the series architecture, the propeller is only driven by the EM. The ICE produces power, supplying it to the generator. It transforms the mechanical power into electrical power, which is either used to supply power directly to the EM or stored in the batteries through a charging process. The greatest advantage of this configuration is that the ICE is able to constantly run in the best operating power and speed, since it's not mechanically connected to the propeller. The principal disadvantages are the increased mass and energy conversion losses (Xie et al., 2021).

In the parallel configuration, the ICE and the EM are connected via a mechanical coupling, meaning that the EM, powered by onboard batteries, and the ICE can work together in order to reach the required power. The connection between these two components is very complex, but it can provide savings in terms of the system's weight. Another advantage is the high energy efficiency in steady conditions and very good overall performance (Jimenez et al., 2022).

2.2 Proton-Exchange Membrane Fuel Cell

A fuel cell is a device that is capable of generating electrical power by the synthesis of water, using hydrogen (H_2) and oxygen (O_2), as fuel, in its gaseous state, while producing water

as a by-product. There are various types of fuel cell, with the proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC) being one of the most widely used. This system contains a membrane that is only permeable to the passage of protons, H^+, not allowing electrons to pass through. When H_2 is admitted to the anode side, the only possible path for the electrons is the load, where power is produced. On the cathode side, the electrons and protons bond with O_2 from the atmospheric air, producing water (Fărcaş & Dobra, 2014).

2.3 Life Cycle Assessment

Life cycle assessment is a very important method that evaluates the environmental impact of a product or process throughout its entire life cycle. There are several approaches to this analysis, the main one being cradle-to-grave, where the life cycle goes from raw material extraction/acquisition, through the production and use phases, to end-of-life and waste management (Cabeza et al., 2014).

The requirements and specifications for carrying out an LCA are defined in the ISO 14040 standard. According to this standard, an LCA is divided into four main stages: Goal and scope, where the context of the study, the functional unit and the system boundaries are defined; Inventory analysis that comprises the boundaries between the product systems, as well as all inputs and outputs to the environmental system; Impact assessment whereby the results are evaluated and associated with the respective environmental impact; and Interpretation in which the results of all the previous stages are analyzed according to the goal and scope in order to reach conclusions and recommendations (Internal Organization for Standardization (ISO), 2006).

This topic is increasingly developing, therefore various LCA software programs have been created to measure the environmental impact of products and services and facilitate their interpretation. The most widely used is SimaPro, which is very versatile as it includes several extensions enabling it to be customized and adapted to the type of analysis required. This software also enables complex life cycles to be modelled and analyzed in a systematic way, measuring the environmental impact during all phases of their lifetime. This was the software used to conduct the environmental analysis of the various propulsion systems.

2.4 MIMIQ Series Hybrid Multirotor

The development of a HEPS for a multirotor is an important step and the basis for research into this technology. With this in mind, University of Victoria - Centre for Aerospace Research (CfAR) decided to develop a multirotor to test these propulsion systems, the MIMIQ. Its main objective is to understand how the performance of series hybrid generators can be enhanced to maximize flight time and efficiency (Castellani et al., 2024).

MIMIQ is a quadcopter with a maximum take-off weight (MTOW) of 32 kg and a motor-to-motor diameter of 2.7 meters, with a capacity to carry six litres of fuel. The maximum power required is 4200 W in the climb phase, while for hover, the most important flight phase in a multirotor, it requires 3500 W. Most hybrid generators are not capable of supplying these powers, so battery power is required. The HEPS studied in this work is intended to be implemented in this UAV.

3 Series HEPS Characterisation

Two series HEPS, Cortex-50 Hybrid System and Pegasus GE70, were chosen to be characterized.

The Cortex-50 is a revolutionary two-stroke hybrid UAV engine system developed by Currawong Engineering. This hybrid system is a complex combination of various components, the main ones being: ICE, generator, hybrid transmuter, engine control unit and fuel pump. A

battery was also connected to this system, allowing extra power to be supplied. According to the manufacturer, the base weight of this system is 3.9 kg and the generator is able to provide a maximum power of 2.4 kW (Currawong Engineering, 2023).

The Pegasus GE70 is a hybrid electric powertrain developed by Pegasus Aeronautics. This system includes an ICE that burns fuel to operate the generator that produces the electric power needed to drive the propulsion motors. Similarly to the Cortex-50, this system includes several components, where the most important are engine/generator unit, the generator control unit and the fuel pump. Pegasus GE70 is capable of generating a maximum of 4000 W, although its ideal power output is between 2000 W and 3500 W and the weight of the complete system is around 5 kg (Pegasus Aeronautics, 2023).

In order to understand how these hybrid systems operate and assess their performance, to ensure that they can be integrated into MIMIQ, ground tests are necessary. The results obtained are presented below, and it is worth mentioning that in the results of all the tests, negative values indicate that the power is being supplied and positive values reveal that the power is being received.

3.1 Cortex-50 Hybrid System

The first test of the Cortex-50 consisted of verifying its mode of operation and acquiring a better overview of all its systems. In this simple test, different load powers were requested and it was examined how the hybrid system performed. During the first part of this test, the power requested was below what the manufacturer stated the generator could support, 2400W, while in the second part, the requested power was higher.

Several conclusions were achieved with this initial test. The first was that up to a required load power of 2100 W, only the generator operates. For higher values, the power supplied by the generator remains constant and the batteries supply the difference. Another deduction drawn is that the combined power supplied by the generator and the batteries is always greater than the one required by the load. This is due to energy losses in the electrical connections.

To ensure that the main systems are working within limits, the temperature evolution of the cylinder head, transmuter and generator was also assessed. The temperature of these systems always remained within the limits set by the manufacturer. The temperature of the cylinder head and generator reaches its maximum when the generator's power output is at its maximum, remaining practically constant thereafter. The transmuter's temperature behaves differently, increasing linearly until the end of the test, reaching a maximum of 70◦ C, just below the 80◦ C that is the maximum operating temperature.

The second test offered a more extensive analysis of the combustion engine and generator, consisting of a search for its ideal operating point. Several steps of 100 W were applied, until a load power of 2300 W, which was the moment when the batteries began to supply power to the system. Figure 1 displays the behavior and evolution of the power of the generator and batteries according to the power demanded by the load, while Figure 2 illustrates the Brake-Specific Fuel Consumption (BSFC).

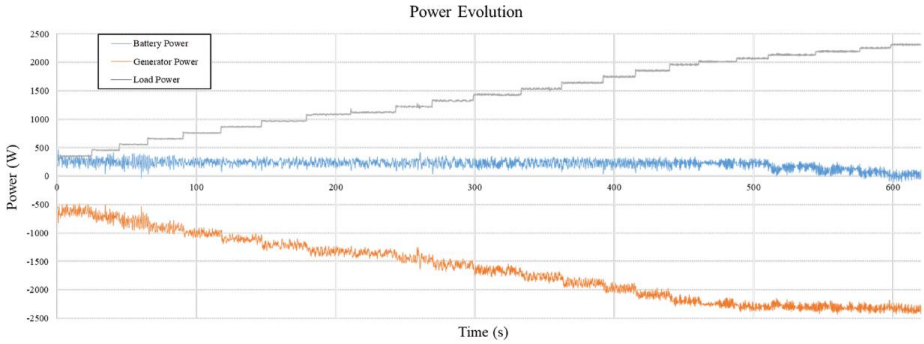


Figure 1 - Ideal Operating Point - Power Evolution.

The power evolution in Figure 1, reveals that up to a power demanded by the load of 2100 W, the generator supplies a practically constant amount of power to the batteries, in the order of 250 W. Afterwards, the power that the batteries receive consequently decreases until they have to start providing power. The generator is capable of supplying more power to the batteries, although the manufacture implemented a safety factor that doesn't allow the batteries to receive extra power, preventing them from overcharging and risking being damaged during a flight.

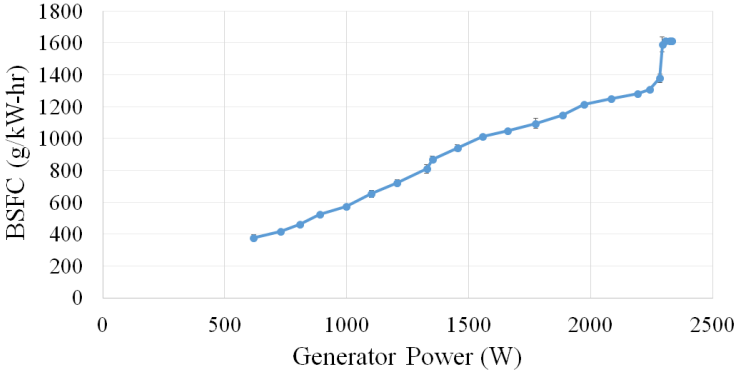


Figure 2 - Ideal Operating Point - BSFC.

According to Figure 2, the BSFC has an almost linear increase until the power output of the generator reaches a value of around 2280 W, remaining constant for higher values. The maximum value obtained for BSFC is 1600 g/kW-hr. This test revealed that this hybrid generator does not have an ideal operating point, meaning that there is no point where specific fuel consumption is minimal and the power supplied by the generator maximum.

In the third and final test, and as a way of applying the Cortex-50 to a UAV application, this system was connected to the EM and propeller chosen for MIMIQ implementation. This consisted of applying several throttle steps, and measuring the thrust and torque values. The test was

carried out three times and the results were averaged. Figures 3 and 4 present the results of thrust and torque as a function of propeller power, comparing them with the curves of the propeller characterization performed with 12S batteries.

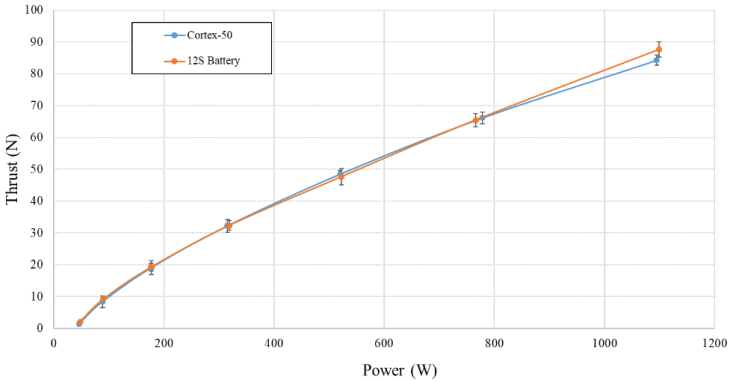


Figure 3 - Thrust as a function of power.

The results of the thrust, in Figure 3, are very similar to those obtained for the propeller characterization. The biggest discrepancy is at the last level where the thrust obtained in the test with the Cortex-50 is 84.26 N and with the 12S batteries 87.69 N, corresponding to a relative error of 3.9%. The difference between the average and maximum value of the three runs is practically negligible in all points, indicating accuracy.

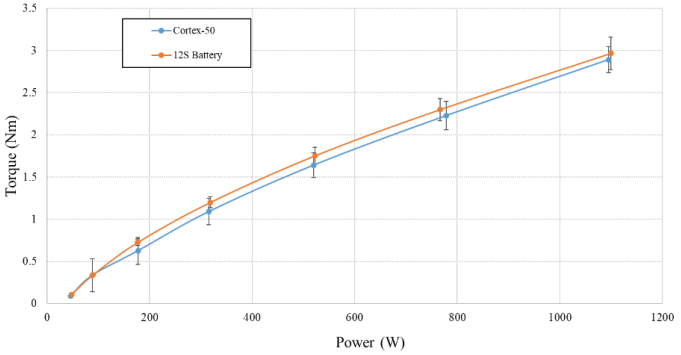


Figure 4 - Torque as a function of power.

For torque, Figure 4, although both curves behave in a similar way, the difference between each step is greater than in thrust, with a maximum of 0.11 Nm in the fourth and fifth steps. This corresponds to a relative error of 9.2% and 6.3% respectively. Furthermore, the 12S battery curve is always above the Cortex-50 curve, reaching a maximum torque value of 2.96 Nm compared to 2.89 Nm in the hybrid system test.

This test indicates that, despite some deviations, the relative error is not noteworthy, showing that there is a good correlation between the Cortex-50 and the propeller characterization tests.

These three tests on the Cortex-50 hybrid system allow to conclude that its implementation in MIMIQ is possible. However, since the generator is only able to deliver approximately 2300 W and this quadcopter requires 3500 W to hover, there is the major disadvantage of the battery having to constantly supply power, meaning that the flight time is restricted by its capacity.

3.2 Pegasus GE70 Hybrid Generator

The same three tests carried out on Cortex-50 were aimed at Pegasus GE70, to quantify its performance. This system was assembled on the test bench and powered up according to the manufacturer's instructions. As soon as this occurred, a leak was detected in the fuel pump and the test was immediately stopped. This component was sent to the manufacturer to be repaired, unfortunately it did not return in time and the tests could not be performed.

According to the manufacture's data, the ideal power output of this system is between 2000 W and 3500 W, being able of producing up to a maximum of 4000 W. These values indicate that the generator of Pegasus GE70 is able to supply the power needed for the MIMIQ to hover. Contrary to the Cortex-50, the battery is not required for all flight phases, but only during the most critical ones, namely during climb. This reveals that endurance with these systems will be limited by the amount of fuel carried. Considering the hover power and that the BSFC for the 3500 W is 700 g/kW-hr, a flight time of 107.1 minutes is achieved. Therefore, from a theoretical perspective, this system would be the most suitable for implementation in this UAV.

4 Performance of Different Propulsion Systems

After characterizing the series HEPS, it is important to understand whether this propulsion system is actually better than others, namely all-electric and hydrogen fuel cell propulsion systems. For a reliable evaluation, particularly when comparing the endurance achieved by the MIMIQ with each of these systems, it was ensured that all of them had the same weight.

For the comparison of the three systems on the test bench, a simple mission the MIMIQ may perform was defined according to the power required for each of its flight phases. This mission comprises 15 seconds of climb, followed by 45 seconds in hover, then a horizontal flight phase of 360 seconds and, finally, another 45 seconds in hover and 15 seconds of descent. The power required for the climb, hover, horizontal flight and descent phases are 4200 W, 3500 W, 2800 W and 3150 W respectively.

In the test with the all-electric system, a 14S battery was connected to a programmable electronic load. On the other hand, the test with the fuel cell used the PEMFC Aerostak 2000 from H3Dynamics. This device includes a PEMFC stack, control electronics, lightweight casing with integrated air-cooling fans and a hybrid card compatible with batteries. According to the manufacturer, this system has a rated power of 2000 W and can provide a maximum power of 2200W. The weight of the Aerostak 2000, excluding the fuel tank and battery, is 3 kg (H3Dynamics, 2023).

4.1 Experimental Tests

The first analysis concerns the distribution of power throughout the test. In the all-electric configuration, the power is much more stable for each required power step, with no significant variations. The Cortex-50, since the power requested is always higher than the generator can supply, provides a practically constant value equal to 2320W throughout the test. In this system, the battery provides the difference in power between what is requested and what the generator

can supply, being maximum and equal to 2140 W when climbing and minimum and minimum and equal to 598 W in the horizontal flight.

The Aerostak 2000 exhibits a different behavior, as can be seen in figure 5. Similarly to the Cortex-50, the fuel cell stack is not capable of providing the required power, meaning that the battery must always provide power. The power that this system can supply is not constant and increases throughout the test, being 2500 W at the start of the test and 2700 W at the end of it. These values are higher than the 2200 W that the manufacturer specifies as the maximum output power. Every 10 seconds the power drops drastically, because the fuel cell stack has a maintenance cycle of 10 milliseconds in order to rehumidify the membrane and maintain its performance. The battery provides the difference in power between what is required and what the fuel cell stack can produce. In each maintenance cycle, this system provides a peak of power to compensate for the drop in power of the fuel cell stack.

The voltage of each of the three systems was also measured throughout the test. In all of them, the voltage is maximum at the start of the test and decreases until the end. For a constant power request, the voltage decreases linearly, and the greater the value, the steeper the slope. Therefore, it can be concluded that the decrease in voltage is more pronounced in the climb phase and smaller in horizontal flight. In the Cortex-50 and Aerostak 2000, the voltage of the system is dictated by the voltage of the batteries, so the generator and fuel cell stack voltage are very similar to the respective batteries.

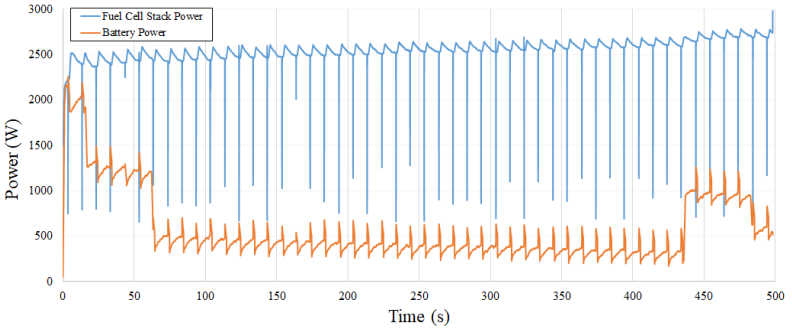


Figure 5 - Fuel Cell Power Evolution.

In order to compare the three systems, Figure 6 depicts the total current of each one. In the all-electric system, this is the battery current, in the Cortex-50 it is the sum of the generator and battery currents and in the fuel cell it is the sum of the fuel cell stack and battery currents.

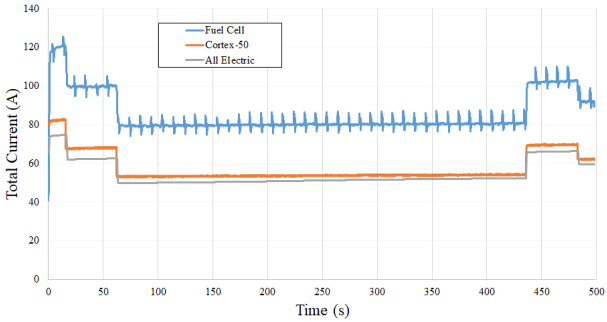


Figure 6 - Total current of the three systems.

The total current in the all-electric and cortex-50 is very similar, as the voltage in both systems is the same and equal to 14S 51.8V. The difference obtained is explained by losses in the cables. The current of the fuel cell system is significantly higher than the other two systems. This is also related with the voltage of the system. As this is 9S 33.3V, it is lower, however, the power required is the same, so the current has to be much higher to achieve it.

The hybridization factor, which relates the power provided by electrical sources with the total power, was also determined for the Cortex-50 and fuel cell propulsion systems. As expected, this is maximum in the climb phase where the power required is also maximum, being equal to 0.479 for the Cortex-50 and 0.453 for the Aerostak 2000.

One of the main characteristics of a UAV is its flight time. With this in mind, the endurance of the MIMIQ with each of these propulsion systems was estimated. The phases of climb and descent were considered to determine this, and then it was assumed that the multirotor would spend the rest of the flight in hover. This comparison can be made since it was ensured that all the propulsive systems have the same weight and therefore the same MTOW.

To estimate the flight time of the Cortex-50 and the Aerostak 2000, the endurance of the generator and fuel cell stack must be taken into account, in addition to the batteries' endurance. The maximum flight time in these propulsion systems is limited by the system with the minimum endurance.

The battery endurance was established for all systems using the same procedure. The battery capacity required for the climb and descent flight phases was determined and subtracted from the total capacity. This was calculated based on the average power supplied and the flight time for each of these phases. Then, based on the remaining capacity and the power provided, the maximum flight time was determined.

The power output of generator in the Cortex-50 is always maximum, so gasoline consumption is constant and also maximum. Endurance is determined based on the amount of fuel the MIMIQ can carry and its consumption. Similarly, the fuel cell stack is always operating at maximum regime, so the hydrogen flow will always be maximum. The flight time with this system is determined based on both flow and the amount of hydrogen being transported.

In the all-electric system, it was achieved that the battery has the capacity to provide a flight time of 40.3 minutes. In the Cortex-50, the battery can provide an endurance of 51.4 minutes. On the other hand, as the MIMIQ carries 6 liters of fuel and its flows is 5.1 L/h, the maximum flight time with the generator would be 70.8 minutes. As a result, the endurance with this system is limited by the battery and is 51.4 minutes. In the Aerostak 2000, the battery will provide less power

in all phases than the Cortex-50, resulting in a longer flight time. Therefore, it can provide a flight time of 83.2 minutes. In order to maintain the MIMIQ's MTOW, the fuel tank has the capacity to carry 144 grams of hydrogen. The hydrogen flow is equal to 21L/min, which, considering its density, results in 1.89 g/min. A maximum flight time of 76.3 minutes is thus obtained. As this value is lower than that obtained with the battery, the Aerostak 2000 is limited by the amount of hydrogen.

Table 1: Endurance of the various propulsion systems.

Propulsion Systems	All Electric	Cortex-50	Aerostak 2000
Endurance (minutes)	40.3	51.4	76.3

Table 1 provides the endurance results obtained for the different propulsion systems. The Aerostak 2000 propulsion system is the one with the highest endurance, followed by the Cortex-50 and then the all-electric system. Despite this difference, during the test the Aerostak 2000 was working at a higher regime than that stated by the manufacturer, particularly regarding maximum power. Bearing this in mind, the performance obtained in this test may not be repeated.

Regarding both performance and the endurance that the MIMIQ would achieve with each of these systems, the Aerostak 2000 is the propulsion system that revealed the best results, followed by the Cortex-50 and finally the all-electric. This study proves that, despite being a technology that is still at an early stage of development, an implementation of HEPS and hydrogen Fuel Cell in a UAV is possible.

5 Life Cycle Assessment

This section will present a life cycle assessment for an all-electric propulsion system, a hydrogen fuel cell system, the Cortex-50 and Pegasus GE70 series hybrid electric systems and an all-combustion propulsion system, all of which can be implemented on MIMIQ.

5.1 Initial Considerations

Before conducting the LCA, some considerations are necessary. Firstly, the goal was defined, being the same for all of them: evaluating the environmental impact of each of these systems from their production, throughout their use and, ultimately, to their end-of-life.

The functional unit chosen was 1000 flight hours. This choice was mainly due to the lifespan of a battery, which was the main limitation of these propulsion systems.

In all of them, the approach for the scope of LCA was cradle-to-cradle, which considers the impact from the production of the materials to the end-of-life stage. This project considers the energy for the production of each component that encompasses the respective propulsion system, as well as their transportation from the factory to the CfAR.

For assessing the environmental impacts of the propulsion systems, this project used the impacts on both the midpoint and endpoint. Midpoint presents 18 indicators that focus on specific environmental problems. These converge in three aggregation levels, the endpoint indicators. This conversion simplifies the interpretation of the LCA results, although it can increase uncertainties.

5.2 Life Cycle Inventory

The production phase considered all the components that are part of each propulsion system. In order to provide a more accurate comparison, each component was divided into its raw materials, with components that already existed in SimaPro not being used. In the case of complex components, the energy required to manufacture them was also taken into account. The use phase includes the amount of fuel consumed and/or the amount of electricity required to recharge the batteries over the functional unit. These values were obtained by considering a standard mission of one hour hovering, for which MIMIQ needs a power of 3500W.

The Cortex-50 propulsion system consists of an ICE, a generator, a battery, an ESC, a fuel tank and an EM. This propulsion system consumes 2100 kg of gasoline and 1090 kW of electricity during 1000 flight hours.

As for the Pegasus GE-70, it is made up of practically the same components as the Cortex-50, the only difference being that this system has a radiator as its cooling source. This system has a slightly higher fuel consumption, requiring 2450 kg during its life cycle, although it needs less electricity to recharge the batteries, only 250 kW.

The all-electric propulsion system is built up from the following components: battery, ESC and EM. The battery needs 3500 kW of electricity to be recharged during the use phase.

The all-combustion propulsion system is the simplest system, consisting only of the ICE, gearbox and fuel tank. For the functional unit selected, this propulsion system consumes 3150 kg of gasoline.

Finally, the hydrogen fuel cell propulsion system consists of the fuel cell stack, the hydrogen tank, the pressure regulator, the battery, the ESC and the EM. This propulsion system requires 113.3 kg of hydrogen and 765.9 kW of electricity for the 1000 hours of flight.

The end-of-life of each propulsion system was also considered in order to perform a more detailed environmental impact assessment. It was assumed that 50% of the all-electric, all combustion and hybrid electric propulsion systems, Cortex-50 and Pegasus GE70, could be recycled. The remaining were treated as municipal solid waste and incinerated.

On the other hand, the fuel cell propulsion system was considered to be 95% recycled (Ballard, 2018) and the remaining 5% treated as incineration municipal waste.

5.3 Results

Figure 7 provides the results of the complete LCA for the five propulsion systems evaluated. The six midpoint characterization categories with the higher environmental impact were chosen to be assessed. The results are divided into all stages of the life cycle, namely production, use, transportation and end-of-life.

This figure reveals that in the six categories, the fuel cell is the propulsion system with the greatest environmental impact in the production phase. This stage impact is significantly higher than the remaining propulsion systems in all categories except water consumption. It is always 10 to 50 times greater than the second most environmentally damaging system, the all-electric. The component that has the greatest hit on the production phase is the fuel cell stack, as expected, given that it is the heaviest component and is composed of materials with a high ecological production cost.

Regarding the production of the remaining propulsion systems, that the all-electric system is the worst, followed by the two series HEPS, with a similar result, and finally the combustion propulsion system. These results reveal that batteries have the greatest influence on the production phase, since the heavier they are, the greater the environmental impact of this phase. The production of the all combustion system has a significantly lower environmental impact in all

categories. This demonstrates that conventional systems, as their production is optimized, do not compromise the environment as much.

The results of the use phase presented refer to the effects of direct emissions from the combustion engine, fuel production and emissions from electricity production.

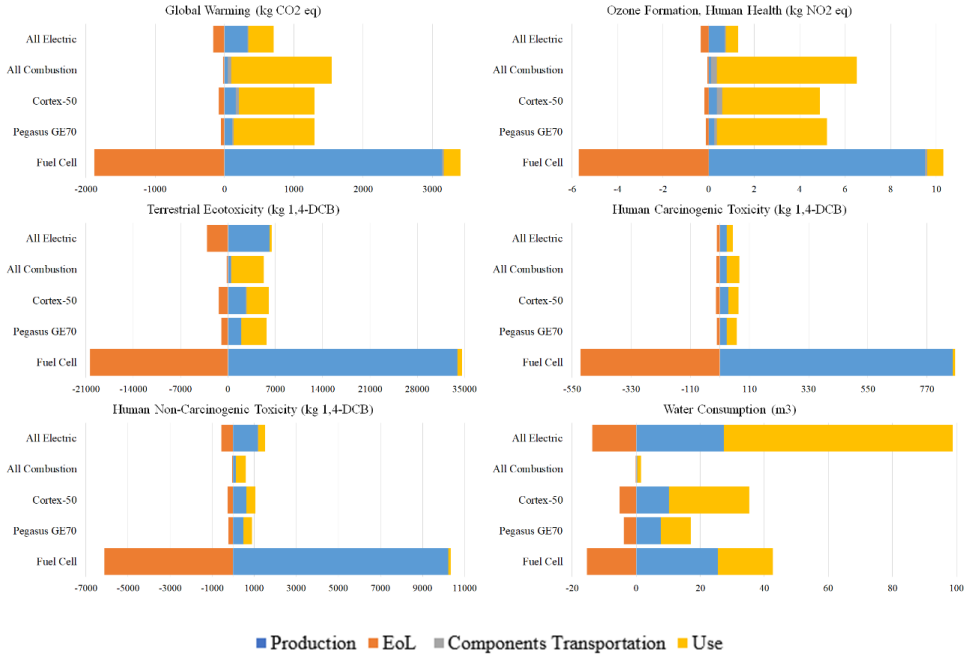


Figure 7 - Impact of all phases of the different propulsion systems.

The use phase in the all combustion propulsion system has the greatest environmental impact in 5 of the 6 categories, being between 12.5% and 25% more severe than the two series HEPS, which have the next worse impact. These results demonstrate that it is fuel, particularly gasoline, that is most damaging to the environment. Since the all combustion propulsion system consumes the most gasoline during the 1000 hours of flight it causes the most damages to the environment. As the Pegasus GE70 requires more gasoline during its life cycle, it has a greater impact at this stage than the Cortex-50.

The all electric and the fuel cell propulsion systems have a similar impact in the use phase in all categories except water consumption. The impact of the all-electric propulsion system in this category is more than three times higher than the fuel cell and can be explained by the electricity production process in steam turbines. Furthermore, is possible to conclude that the environmental impact of both hydrogen and electricity in the use phase is much lower than gasoline, since the impact of these two systems is smaller than the remaining ones that use gasoline as fuel.

The transportation of components to CfAR has almost no impact on the life cycle of these propulsion systems. Their impact is only visible in the categories of global warming and ozone

formation, which achieve the same or even more significant damage than the production phase. The Cortex-50 and the all combustion are the propulsion systems most affected by this stage, which is explained by the distance from most of their components to CfAR being much greater than in the other propulsion systems. In the other categories the impact in the life cycle is so minimal in relation to the other phases that it can be considered negligible.

The end-of-life mainly concerns the production phase, since fuel and electricity cannot be treated as waste once they have been consumed. Since 95% of the fuel cell stack can be recycled, the fuel cell propulsion system has the greatest positive impact at the end of its life, meaning that recycling it mitigates between 55% and 60% of the harmful part of the impact of its production and use phases. This stage is also more advantageous for the systems that have a more pronounced environmental impact in the production phase, namely the all-electric and Cortex-50 propulsion systems.

In order to facilitate the assessment of the impact of these propulsion systems over the course of their life cycle, the endpoint single score category was also applied. The single score is achieved by multiplying the category indicator results by a weighing factor and adding them together, allowing the three categories included in this method to be combined into a single system. Figure 8 reveals the environmental impact of each in the three respective categories, with total impact being the sum of the three indicators.

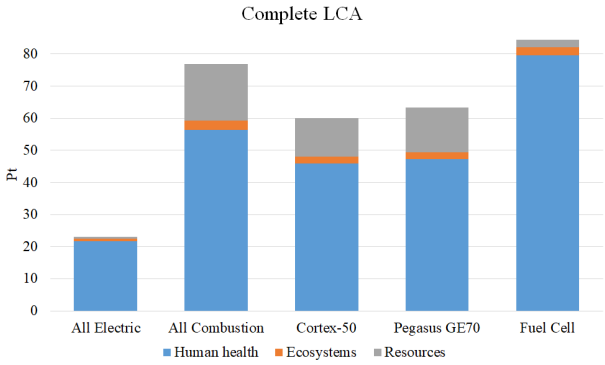


Figure 8 - Complete LCA with the Endpoint method.

The indicator that has the greatest impact on the total life cycle of the five propulsion systems is human health. In all electric and hydrogen fuel cell propulsion systems, this indicator has the same percentage, being equal to 94% of the total environmental impact. In the remaining three propulsion systems it only corresponds to around 75%. Resource depletion is the following indicator, being more severe in the all combustion and hybrid propulsion systems. This category is connected to gasoline consumption in the use phase, since the systems using it being those where this indicator has the greatest impact. Ecosystems is where the impact that the life cycle of these propulsion systems was the lowest, contributing less than 3.5% of the total impact in all of them.

The system that causes the least overall environmental impact throughout its life cycle is the all-electric propulsion system. Although it's widely acknowledged that this system, with its larger battery, would have a major impact in the production phase, the remaining phases, namely use, reduce the impact significantly compared to the alternatives studied. This system has almost

three times less impact than the next least damaging systems, the two series HEPS, a very significant value.

Hybrid systems, despite having a lower impact, around 20%, than the all-combustion, have a much higher environmental footprint than the all-electric system, with its impact being 63% higher. Comparing both HEPS, there is a 5% difference, with the Pegasus GE70 being the one to cause the most damage to the environment. The differences identified between these two systems and the others can be explained by the use phase, where gasoline consumption has the greatest impact. Although these systems have advantages over the conventional and most widely used propulsion system, the all combustion, still need to be optimized to reduce their environmental impact closer to all electric.

On the other hand, the hydrogen fuel cell propulsion system has the worst environmental impact over its entire life cycle, 10% higher than the all combustion system, which has the second worst impact. The major difference is for the all-electric propulsion system, where the environmental impact of the fuel cell is 75% higher. This disparity is minimal considering the enormous impact that production this propulsion system has in relation to all the others. This proves that the end-of-life, where it is considered that nearly all the fuel cell stack can be recycled, has a very positive impact on this propulsion system. Considering all the phases of the life cycle, it is still not worth using this propulsion system from an environmental point of view.

6 Conclusions

The main objectives of this work have been achieved. Firstly, the Cortex-50 hybrid generator was characterized, and it was concluded that its implementation in the MIMIQ is possible, however, as the batteries will have to supply energy in all flight phases, it is not the most suitable system. According to the manufacturer's information, the Pegasus GE70 would be the most suitable to be integrated into MIMIQ as the generator can provide the power required to hover and recharge the battery.

Comparing the series HEPS with the all-electric and hydrogen fuel cell propulsion systems in a possible MIMIQ mission revealed that both the Cortex-50 and the Aerostak 2000 have to use batteries in all flight phases. The endurance of the Aerostak 2000 was the greatest, being 89.3% and 48.4% superior to the all-electric and Cortex-50. Theoretically, the endurance with the Pegasus GE70 would be superior to the endurance obtained with all these systems. Although none of these systems is perfect, the Aerostak 2000 is the one with the best performance and endurance.

Finally, an environmental analysis was conducted on the various propulsion systems. It emerged that during the total life cycle, the all-electric propulsion system has the lowest environmental impact. On the other hand, the fuel cell and all combustion propulsion systems cause the most damage to the environment. HEPS are at an intermediate level, but still far behind all-electric systems.

Overall, the work carried out has provided useful information about the various propulsion systems. It was clear that the best propulsion systems regarding performance and endurance are not necessarily the ones that have the least impact on the environment. Therefore, when choosing a propulsion system, there has to be a compromise between performance/ endurance and its environmental impact throughout its life cycle.

References

Air Transport Action Group. (2020). Facts and figures — ATAG. (URL: https://www.atag.org/facts-figures/, Accessed on 09/05/2023)

Ballard. (2018). Recycling PEM Fuel Cells. (URL: https://www.ballard.com/docs/default-source/web-pdf%27s/recyclingtechnical- note final.pdf)

Bolam, R., Vagapov, Y., & Anuchin, A. (2020). A review of electrical motor topologies for aircraft propulsion. In 2020 55th international universities power engineering conference (upec) (p. 1-6). doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209783

Cabeza, L., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, 394-416. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037

Castellani, N., Pedrosa, F., Matlock, J., Mazur, A., Łowczycki, K., Widera, P., Zawadzki, K., Lipka, K., & Suleman, A. (2024). Development of a series hybrid multirotor. Journal of Physics: Conference Series, 2716, 012021. doi: 10.1088/1742-6596/2716/1/012021

Currawong Engineering. (2023). Cortex-50 Hybrid Engine. (URL: https://www.currawongeng.com/cortex-series/, Accessed on 02/10/2023)

European Comission. (2021). Reducing emissions from aviation. (URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transportemissions/reducing-emissions-aviationen, Accessed on 10/05/2023)

European Commission. (2011). Flightpath 2050: Europe's vision for aviation.

Farinha, J. (2022). On the Design and Study of a Parallel Hybrid Electric Propulsion Test Apparatus for UAVs (MSc Thesis in Aerospace Engineering). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Fărcaş, A., & Dobra, P. (2014). Adaptive Control of Membrane Conductivity of PEM Fuel Cell. Procedia Technology, 12, 42-49. doi: 10.1016/j.protcy.2013.12.454

H3Dynamics. (2023). Hydrogen Fuel Cell. (URL: https://www.h3dynamics.com/files/ugd/3029f720bd14d7c2e2474296b 8986004002b18.pdf, Accessed on 14/10/2023)

Hawkins, T., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. Journal of Industrial Ecology, 17. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x

IATA. (2021). Resolution on the industry's commitment to reach net zero carbon emissions by 2050. Internal Organization for Standardization (ISO). (2006). Environmental management-life cycle assessment-principles and framework.

Jimenez, D., Valencia, E., Herrera, A., Cando, E., & Pozo, M. (2022). Evaluation of Series and Parallel Hybrid Propulsion Systems for UAVs Implementing Distributed Propulsion Architectures. Aerospace, 9. doi: 10.3390/ aerospace9020063

Matlock, J., Warwick, S., Sharikov, P., Richards, J., & Suleman, A. (2019). Evaluation of energy efficient propulsion technologies for unmanned aerial vehicles. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 43, 481-489. doi: 10.1139/tcsme-2018-0231

Pegasus Aeronautics. (2023). Range Extender, Gas-Electric, 70cc (GE70). (URL: https://www.pegasusaero.ca/ge70, Accessed on 14/10/2023)

Pornet, C., & Isikveren, A. (2015). Conceptual design of hybrid-electric transport aircraft. Progress in Aerospace Sciences, 79, 114-135. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042115300130 doi: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.09.002

Silva, L. (2022). Integration and Testing of a Hydrogen Fuel Cell in a Hybrid Electric Propulsion System (MSc Thesis in Aerospace Engineering). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Wang, Q., & Santini, D. (1992). Magnitude and value of electric vehicle emissions reductions for six driving cycles in four US cities with varying air quality problems. Transportation Research Record. Retrieved from https://www.osti.gov/ biblio/6830754

Xie, Y., Savvarisal, A., Tsourdos, A., Zhang, D., & Gu, J. (2021). Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies. Chinese Journal of Aeronautics, 34, 432-450. doi: 10.1016/j.cja.2020.07.017

Hydrogen Fuel Cell System Testing and Characterisation for UAV Applications

Author: TEN/ENGAER Dinis Manuel da Costa Salgado
Master of Science Degree in Military and Aeronautical Sciences – Aeronautical Engineering
Air Force Academy, Sintra

Supervisor: Professor Doutor Afzal Suleman
Instituto Superior Técnico, Lisboa

Co-Supervisor: Frederico José Prata Afonso
Air Force Academy, Sintra

Abstract: Fuel Cell Hybrid Systems are being increasingly studied in aviation, as these systems appear to offer a viable and less polluting alternative to the Internal Combustion Engines (ICEs) without the as stringent energetic limitations as those of battery-powered All-Electric Systems. In this work, a series of bench tests with a final Unmanned Aerial Vehicle (UAV) integration in mind will be carried out in a commercially available 2000W proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack from H3 Dynamics. An experimental apparatus will be created in order to characterize the PEMFC performance, obtain its operational capabilities, and compare with the data provided by the manufacturer and existing computational models. The viability of the integration of this system in a UAV in a near future, by defining a flight profile and analysing the fuel cell (FC) system data while performing it. During the experimental tests, the FC will provide all the necessary power for most of the flight duration, while 9S LiPo batteries will provide additional power for the flight phases and situations where more power will be needed.

Keywords: Hybrid-Electric Propulsion; Fuel Cell; Proton Exchange Membrane; Rated Power; Passive Configuration; UAV.

1 Introduction

This research is included in the UVIC CfAR hybrid project, with the main objective of conceiving and testing powertrains that can be used as an alternative to internal combustion engines (ICEs), without such a toll on the environment (Farinha, 2022; Machado, 2019; Matlock, 2019; Pedrosa, 2023; Silva, 2022).

A Fuel Cell (FC) is an electrochemical device, composed by an anode (fuel electrode), a cathode (oxidant electrode) and an electrolyte between them (Sharaf & Orhan, 2014), that converts chemical energy directly in direct current (DC), without having any moving parts (Ozbek et al., 2021), what makes it more efficient and reliable than ICEs. In opposition to ICEs, FCs also, produce considerably lesser NOx and SOx emissions (Arat & Sürer, 2017). FCs present higher specific energy values than batteries (O'Hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016) and do not need to be charged for long periods of time. The energy produced by a FC is only limited by the ability of the system to supply fuel (O'Hayre et al., 2016). The noise and vibration produced by these devices are almost negligible (Sharaf & Orhan, 2014). In spite of these advantages, FCs have lower specific power values than batteries (Pan, An, & Wen, 2019). There are also many drawbacks associated with the use of hydrogen in these devices, such as the difficulties and safety issues that can arise from its storage and handling (Ozbek et al., 2021). Also, hydrogen is not as widely available as other fuels (Ozbek et al., 2021). These devices are also extremely more expensive than the electrical and internal combustion alternatives. Nowadays, there is already a wide variety of commercial available systems that are light and powerful enough to be implemented into UAVs, as is the case of the systems produced by H3 Dynamics and Intelligent Energy (H3 Dynamics, 2023a; Intelligent Energy, 2023). Several companies, as is the case of Airbus, are already starting to explore aircraft nacelle implementations of FCs, as the main propulsive system (Dent, 2022).

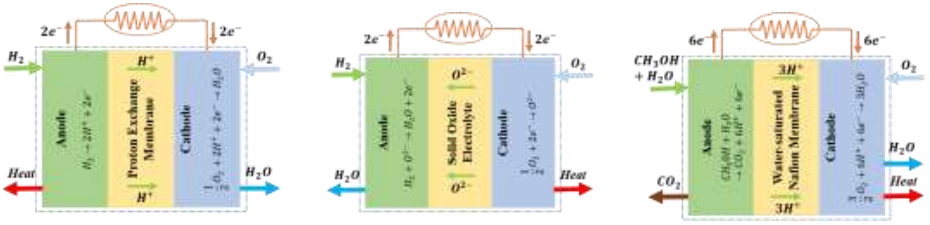
1.1 Types of Fuel Cells

The most used FCs in aviation are the Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) and the Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs), but some studies were already conducted on the implementation of Direct Methanol Fuel Cells (DMFCs) in UAVs (Arat, Sürer, Gökpinar, & Aydin, 2020).

PEMFCs can present operation temperatures ranging from 60◦C to 100◦C and efficiencies between 40% and 60%, also their specific power values are typically comprised between 400W/kg and 1000W/kg. Its relatively high specific energy, short start-up time, low operating temperature, high efficiency and safe and easy handling in comparison to other FC technologies, makes it the most suitable type of FC for UAV applications (Chia & Min, 2021). Also at low temperatures the only product of reaction is water, what makes it more environmental friendly than ICEs. The biggest drawbacks of PEMFCs, in addition to the general FC implementation difficulties already referred, are the inability to currently mass produce these systems, the degradation that they suffer during operation, and the high cost of some materials used in some of its components (Gong & Verstraete, 2017), as the Platinum used in the catalystic layers, and the proton conductor polymer used in the membrane, that typically is Nafion, a sulfonated polymer able to withstand the temperature range inside a PEMFC.

SOFCs are constituted by a solid electrolyte between a ceramic porous anode and cathode, where negative oxygen ions are transferred in the opposite direction of the hydrogen protons in PEMFCs. The operation temperature ranges from 600◦C to 1000◦C, this high temperatures allow SOFCs to use other fuels than hydrogen, like propane, which is more available and easier to store. The typical values for efficiency range from 25% to 50% (Gong & Verstraete, 2017). Due to the high operation temperatures they possess a slow start up time when compared to PEMFCs, and a slow response to rapid load changes (Gong & Verstraete, 2017). DMFCs are very similar to PEMFCs, the main difference between the two, is that a DMFC uses methanol as fuel, solving the hydrogen availability issues encountered in PEMFCs. DMFCs are characterized for having a low operating temperature (20◦C to 90◦C), a fast start-up and a rapid load following. The main drawback of this type of FC is the low efficiency (20-30%), and low specific power values. They also produce CO2 as a product of reaction (Gong & Verstraete, 2017).

Figure 1 provides a graphical representation of the chemical reactions and constitution of the main three types of FCs used in UAVs.



(a) PEMFC **(b) SOFC** **(c) DMFC**

Figure 1: Different types of FCs used in UAVs, adapted from Wang et al. (2020)

1.2 Fuel Cell Hybrid Systems

A solution to address most of the shortcomings of FCs is to hybridize it with other power providing device. In UAVs is common to hybridize the FC with LiPo batteries, exploiting the rapid battery response to variations in power, and high power densities while maintaining the high specific energy of FCs. These systems are composed by four subsystems: FC Stack, Balance of the Plant (BoP), battery and hydrogen storage. Ideally, in a UAV, the FC should be able to provide all the necessary power for cruise, while the battery is only used to manage power peaks and for flight segments that require higher power values (Apeland, Pavlou, & Hemmingsen, 2020a).

FCs and batteries can be combined, mainly, in passive or active systems (Wang et al., 2020). In an active system the power flow between the FC, the batteries and the load is actively controlled by electronic devices, such as DC/DC converters. While in a passive system both the FC and the battery pack are directly connected to the DC bus. This results in a lower weight and less complex architecture, but the problem of the energy flowing from the battery to the FC can arise, what can result in irreversible damage to the FC. A way to avoid this problem is to connect a diode to the FC. In (Wang et al., 2020), an alternative semi-active construction is suggested, which results in a stabler and lighter system, by matching the battery output voltage to the DC BUS voltage, and implementing a DC/DC converter that controls the voltage output of the stack, as shown in figure 2.

The hybridization factor (HF) is an important parameter to evaluate the operation of an hybrid system and in the studied systems can be computed, as it is presented in equation 1 (Apeland, Pavlou, & Hemmingsen, 2020b). If all the power is being provided by the stack the HF will be 0, and if all the power is provided by the battery it will be equal to 1.

$$HF = \frac{P_{batt}}{P_{batt} + P_{FC}} \quad (1)$$

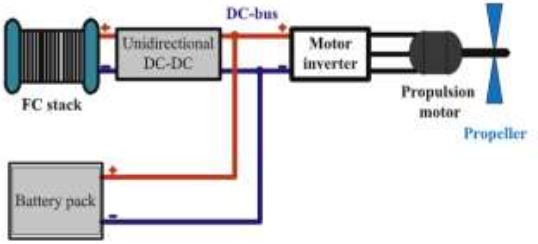


Figure 2: Semi-Active Construction: FC/Battery Hybrid System (Wang et al., 2020)

1.3 Hydrogen Storage

Three main mechanisms are used to store hydrogen in a volumetric efficient way: compressed gas, liquid hydrogen at cryogenic temperatures and chemical hydrogen generation (Gong & Verstraete, 2017). Compressed gas is the most used method in UAV applications.

The compressed gas cylinders used in UAVs are typically made of a carbon fibre composite, in order to minimize the weight. The main advantages of this technology are its simplicity and fast filling-releasing rate (Gong & Verstraete, 2017). The main drawback is the size and bulkiness of the cylinders (Gong & Verstraete, 2017).

In 2014, the Ion Tiger from the US Naval Research Laboratory, performed the longest UAV FC powered continuous flight (48h), using Liquid Hydrogen (LH2) (Swider-Lyons et al., 2013). Liquid Storage is a much more volumetric efficient way tostore the hydrogen, but a tremendous amount of energy is needed to achieve the required cryogenic temperatures (-195.5 ºC). Safety issues, also, arise from operating at these low temperatures. The design of a lightweight thermal insulation system also presents a great challenge.

In chemical storage, hydrogen is not stored in its pure state, instead it is obtained from other materials and chemicals, through two main mecanisms: chemisorption and physisorption.

Kim et al. (Kim, Shim, & Kwon, 2007) achieved a flight time of 2 hours using a UAV fueled by 360g of Sodium Borohydride, being the hydrogen obtained by chemisorption.

1.4 Considerations about PEMFC Systems

To maintain a high proton conductivity in a PEMFC, the membrane has to operate with the right values of humidity. At the same time, the water content has to be managed in order to prevent flooding of the catalystic and diffusions layers. In an ideal system the excess of water would be evaporated by blowing air on the FC, but, in real conditions this only happens for temperatures below the operating one of a typical FC. Most of PEMFCs have to rely on external humidification processes extensively explored in (Dicks & Rand, 2018).

For rated powers below 2kW, air cooling is the best option. For rated powers above 5kW the implementation of a water cooling system is a more suitable option, due to the higher cooling effect of water. Current UAV applications, mainly use air cooling systems, since the the power requirements are usually below the 2kW value. Some high power systems use specific liquid coolants, with lower specific heat values than water (Dicks & Rand, 2018).

2 Experimental Setup

2.1 Fuel Cell

A market research was conducted to acquire a UAV suitable PEMFC hybrid system. For that it is important for the system to be powerful enough, while having a high specific power value, thus having a low mass value.

From all the commercially available FC systems evaluated, the one which proved to be more promising was the Aerostack A-2000 from H3 Dynamics (H3 Dynamics, 2023a). This manufacturer recently had a breakthrough on the membrane technology that allowed their systems to reach much higher specific power values. This system can produce around 2000W of rated power and 2200W of peak power, with a specific power value of 667W/kg. Due to these characteristics the system was acquired.

This FC is composed by the 55 cell stack, BoP and its peripheral systems and the hybrid card that manages the hybridization between the FC stack and the battery. This 3 kg air cooled PEMFC operates in a voltage interval between 53V and 33V, has a hydrogen rated inlet pressure of between 0.6 and 0.8 bar, requires hydrogen with a purity of at least 99.998% and has a maximum hydrogen consumption of 21 L/min. The manufacturer suggests the utilization of 9S LiPo batteries together with the system, with a discharge rate above 100C.

A passive configuration was chosen to better characterise the FC stack. Later on, a streamlined DC/DC converter can be implemented by the manufacturer if deemed necessary for the UAV integration.

If the stack is operating below its rated power the battery will be charged with a maximum current of 1.5A. If it is operating at the rated power, the system will operate with a HF of 0. And above that power, the stack is going to operate at its maximum power while the battery supplies the remaining power required. Every 10s the stack gets disconnected from the circuit for 10ms to perform a stack re-humidification process that helps it maintain a high efficiency value throughout the duration of the operation. During this time the battery provides the power to the load and to turn on the FC again.

The acquired stack was tested for 10 hours by the manufacturer, at an ambient temperature of 30◦C, a relative humidity of 35% and a barometric pressure of 1013.25 hPa. It reached a maximum power of 2379.48W for a working current of 63.41A. The rated electrical efficiency

obtained was 57.67% for a rated power of 2041.18W. The following polarization curves (figure 3) were plotted from the data that the manufacturer provided from these tests.

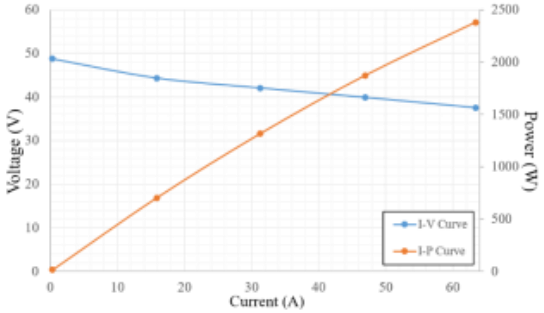


Figure 3: Polarization curves obtained from the data provided by the manufacturer

2.2 Battery

The battery that is used in the FC system is an important component: to start the FC up; to manage the power peaks; to provide power to the load during the maintenance cycle that occurs every 10s; and for redundancy purposes, if the FC fails the battery can assure that the UAV will safely land.

Two graphene 9S LiPo batteries with a 5200mAh capacity were acquired. This battery also possesses a discharge rate of 175C, fulfilling the requirement of having a discharge rate higher than 100C. If needed the two batteries can be connected in parallel, to form an equivalent 9S LiPo battery with a capacity of 10400mAh.

2.3 Hydrogen Supply System

Hydrogen is a hazardous, extremely flammable gas. So an extensive array of safety measures had to be adopted during the testing.

The hydrogen supply system consists on a hydrogen cylinder, connected to a hydrogen pressure regulator that reduces the pressure that is inside the cylinder to a pressure that can be managed by the stack.

The hydrogen cylinder used during the experimental tests referred in sections 3 and 4, was the Praxair Ultra High Purity 5.0 Cylinder, a 66 kg steel cylinder with a maximum pressure of 165.5 bar, and rated for a hydrogen purity of 99.999% (Praxair, 2023), above the minimum purity required by the stack presented in sub-section 2.1.

The cylinder outlet valve should only be open with a suitable pressure regulator attached to the cylinder, to bring the gas pressure down to a safe a level. The in-house available Harris KH1130 high purity single stage pressure regulator was used. This pressure regulator is rated for hydrogen and possess two valves, one to bring the pressure down to the required one and other that acts as a safety valve, that should only be open before the start up of the FC. Both the maximum pressure inside the cylinder (165.5 bar) and the inlet pressure of the Aerostak A-2000 (0.6 to 0.8 bar) are well within the pressure regulator inlet and outlet supported values, respectively. A modification had to be done to use the new system hose (6mm diameter), since this component had an inferior diameter than the one used in past applications (1/4 inch diameter).

2.4 Electric Load

The FC system is going to be tested with an electronic load and, to better recreate a UAV application, with an EM.

A Programmable Load or Electronic Load, is a test instrument that can be programmed to test a wide range of different loads in a wide variety of modes of control. This device sinks current and absorbs power out of a power source. This allows to thoroughly study the behaviour of the power source in question. In this research an electronic load, with a maximum power, current and voltage of 5000W, 260A and 240V, respectively, was used.

Three different EMs and four different carbon fiber propellers were tested, forming five different configurations, suggested as the maximum performance configurations for the respective EM by the manufacturer (T-Motor, 2023), obtaining the results of thrust as a function of power shown in figure 4. The MN801S KV120 was tested in a thrust test stand available at CfAR, using a 29 inches and a 28 inches of diameter propellers. The MN8014 KV100 was tested using the 30 and the 29 inches propellers. Finally, the MN701 KV135 was tested using the 26 inches propeller. Every propeller was checked for balance, in a propeller balancing stand, before the tests.

Overall, as expected from the manufacturer data, the best performance was obtained for the MN801S with the diameter of 29 inches. The behaviour obtained by comparing the different configurations was similar to the one obtained by the manufacturer. The performance obtained for the configuration that presented the best performance, was also very similar. The biggest difference was encountered in the relative error when comparing values for lower throttle percentages (in the order of 30% for both thrust and power). For higher throttles the error gradually reduces to relative errors below 5%. A different ESC, with different throttle settings, was used in the experimental tests, from the one used by the manufacturer, what explains the error encountered for lower throttles. Other aspect that can influence these values is the fact that the manufacturer used a DC/DC power source with constant voltage, while experimentally the system was powered by a 12S LiPo battery, with the voltage decreasing with the decrease on the SOC (State of Charge) of the battery.

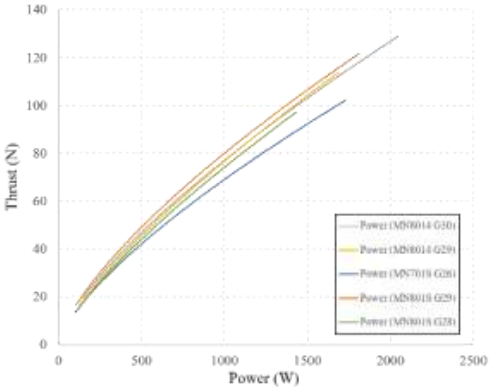


Figure 4: Thrust testing experimental results

3 Testing and Results

Before starting the testing on the FC system, a leak test procedure had to be defined and performed, in order to ensure a higher degree of safety. The leak test points were identified and tested following the defined procedure. In the first test a leak was identified in the pressure regulator, the test was promptly halted, the leak cause was identified and resolved. Before every test it is a good practice to perform a bubble test in the critical points, to ensure that every component is correctly connected.

The first startup of the FC system was important, since it was possible to get some familiarity with the system operation and the data acquisition system. This test had a duration of 39 minutes and 19 seconds, with a maximum stack power of 2300W being achieved. It was unwilling halted due to a incompatibility of the pressure regulator with the system. The variation on the stack pressure requests, creates an increasingly bigger gap in the regulator outlet valve, making the pressure to rise above 1bar, and start a constant purging cycle. This makes it impossible to perform long duration tests with the current setup, since pressures above 1bar can damage the system valves.

3.1 Polarization Curves

Two testing campaigns were performed to obtain the polarization curves. The faulty procedures identified in the first campaign were corrected in the second one, with the objective of improving the stack performance. Three distinct tests were made in each campaign and the average value from the tests was computed and plotted, and compared with the values provided by the manufacturer (Figure 5). The experimental tests consisted in gradually increasing current (A) in 60s steps using the programmable load to obtain the stack power (W) and voltage (V) as functions of current.

In figure 5, it is possible to verify that the performance obtained in the first testing campaign was below the one obtained by the manufacturer with the maximum current achieved by the stack of 56.6A being 12% inferior. To improve the stack performance, in the second testing campaign the following procedures were followed: the 10 AWG wires (cross section of 5.26mm^2) were replaced by half of the length, 6 AWG ones (cross section of 13.3mm^2), to reduce the electrical losses between the system and the load; a performance enhancing maintenance cycle with the intended duration of 1h at 1500W was run (H3 Dynamics, 2023a), but had to be cut short due to excessive inlet stack pressure; a higher current step of 70A was added to the programmable load list to increase the maximum current provided by the stack; an effort to better control the inlet pressure was made, to ensure more similar conditions between the three tests.

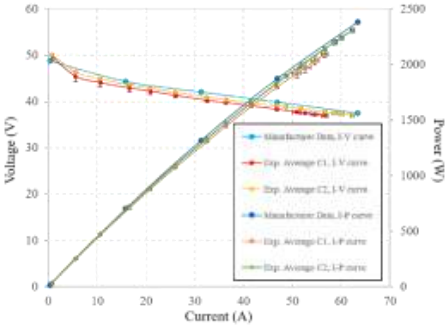


Figure 5: Comparison between the manufacturer data and the two rounds of tests

These modifications to the procedure resulted in a maximum increase of 8.6% in the power produced by the stack for the same current step introduced in the programmable load, and an increase between 0.8% and 2% in the obtained voltage values throughout the test. The increase in performance is more evident for higher currents (above 45A), as can be seen in figure 6. Also from the values obtained from the tests, it is possible to access that below the rated power there was a reduction in the provided current for the same input, that indicates a reduction in the electrical losses through the wires, and above this power there was an increase in current indicating an increase in stack performance, as well.

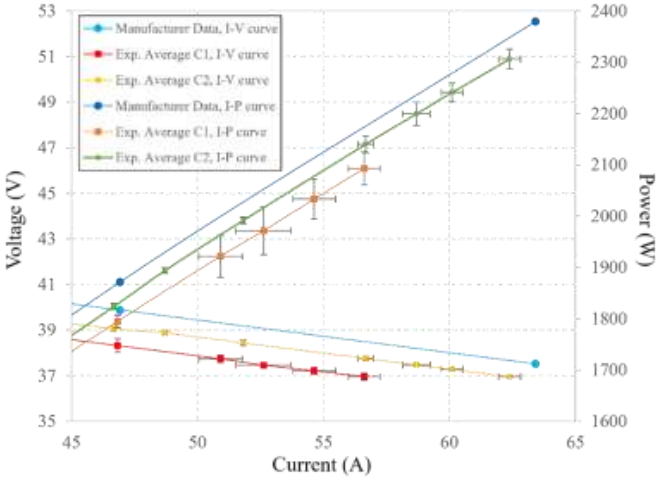


Figure 6: Close-Up for currents above 45A

Despite the increase in performance between the two testing campaigns, the overall performance was still below the one provided by the manufacturer. This can be explained, by the fact that the manufacturer retrieved the data in a 10h testing period, what gave plenty of time for the stack to reach its maximum operation performance, while each test performed had a duration of just 16 minutes, and it was not possible to conclude the maintenance cycle due to the problem encountered with the pressure regulator. The maximum current that the manufacturer reached was 1.6% higher than the one reached in the experimental test, indicating that a higher current request than 70A could have been done to the load, such was not performed since at the time the system behaviour was unknown, and following the manufacturer user manual (H3 Dynamics, 2023a) the stack shall not output with a current above 70A, since this can damage it permanently.

The experimental values were then compared with an existent computational model from MathWorks Matlab Simulink tool (MathWorks, 2023), as can be seen in figure 7. This model was constructed by using data provided by the manufacturer and by using experimental data when the required data was not provided by the manufacturer. Since this is a new PEMFC technology, and there is still no existent computational models for it, the maximum efficiency accepted by the model was 54.8%, instead of the 57.67% provided by the manufacturer.

Nevertheless, it was still possible to obtain an accurate behaviour of the polarization curves. The relative error between the experimental and the computational power values reaches a maximum of 8.8% at 20A and then it gradually decreases for higher current values. For voltage, the maximum error obtained was of 6.5% between 10 and 20A, then it also gradually decreased for higher currents. The lower performance of the stack modelled computationally corroborates the fact that the technology developments on the Aerostack A-2000 are relatively new and have not been widely studied.

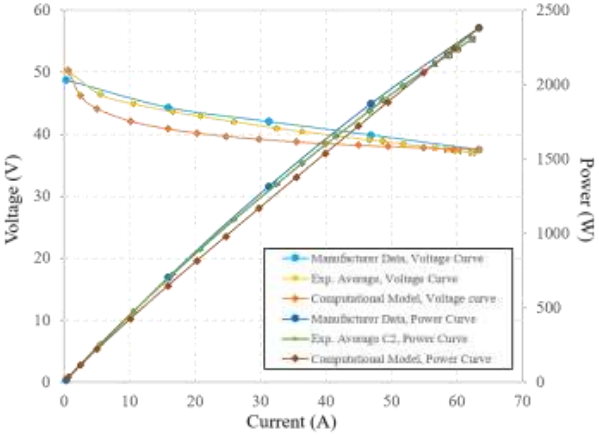


Figure 7: Computational model polarization curves

3.2 Rated Power and Efficiency

The rated power of the stack is obtained when this device is operating at a voltage correspondent to the maximum voltage of the battery, to which is connected. It is the maximum power that the stack can achieve before the battery start to provide power to the load, as well. To obtain the experimental value three tests were done, in each one of them three voltage steps of 60s were inputted in the programmable load (37.8V; 37.7V; 37.6V), since the voltage provided by the stack is not necessarily equal to one requested by the load, due to electrical losses. During the voltage step of 37.6V it was possible to retrieve some values where the stack voltage was correspondent to 37.8V, having obtain the following values for rated power, present in table 1.

Table 1: Rated Power Testing Results.

Manufacturer Test (W)	2041.18
Experimental Average (W)	2080.75
Relative Error (%)	1.94

It is unclear how the manufacturer obtained the rated power value, so the 1.94% can be explained by a difference in the experimental procedure. The difference in the meteorological conditions, namely in air humidity and temperature can also influence the obtained value. As well

as the fact, that it was not possible to obtain a stack continuous operation of 37.8V, and that the values obtained during the maintenance cycle were also considered.

An electrical efficiency of 55.07% was computed using equation 3 derived from equation 2 (Raberg-Hellsing & Kaijser, 2004).

$$\eta_{el} = \frac{U_{stack} \times I_{stack}}{\dot{n}_{hydrogen.supply} \times \Delta H_f^0(H_2O(g))} \quad (2)$$

$$\eta_{el} = P_{rated}\, \dot{V}_{hydrogen.supply} \times 179.911446 = 0.5507 \quad (3)$$

The only hydrogen flow ($V_{hydrogen.supply}$) value provided by the manufacturer is the maximum hydrogen flow that the stack can require and not the flow correspondent to the rated power value, which would be lower, what explains the 2.6% difference between the obtained efficiency and the rated electrical efficiency provided by the manufacturer (57.7%).

3.3 Transient Response

Both the transient response below the rated power (figure 8) and above it (figure 9) were evaluated. Three similar tests were made for each campaign: the system was providing 200W of power for 20s when a higher power input was introduced in the electronic load; 1800W for 60s to test the transient response below the rated power; and 3000W for 70s to test the response above the rated power. The step time was higher above rated power for the values to have more time to stabilize.

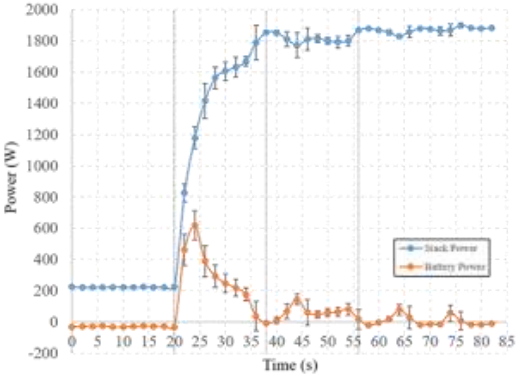


Figure 8: Transient response below the stack rated power

In figure 8, it can be seen, that the rise in the power response provided by the system follows the rise in the values asked by the load. From the slope of the graphs it can be seen that both the stack and the battery have similar responses. Achieving the 1800W in the battery peak, 4 seconds after the load has been inputted in the programmable load, this peak has a correspondent HF of 0.345. After that the stack power increases while the battery power decreases. A value below the rated power is being tested, so the system, will continuously operate with a HF of 0, and it can be seen that the response completely stabilizes 36s after the application of the load, where it can be seen a cyclic behaviour originated by the maintenance cycle that occurs every 10s.

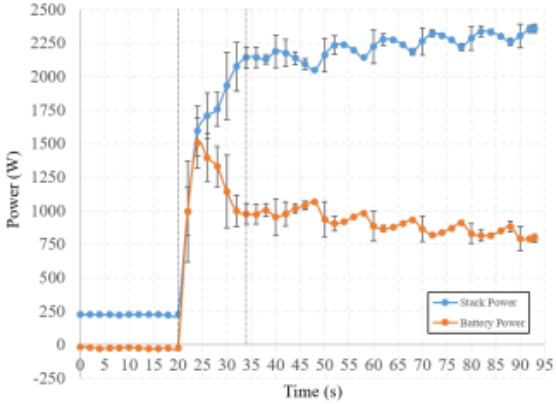


Figure 9: Transient response above the stack rated power

When a load with a higher value than the rated power is requested, the battery possess a faster response than the one seen in figure 8, what can be seen by comparing the slopes of both battery curves. In this test, the system also took 4 seconds to achieve the inputted value of 3000W, this can be seen by the peak in battery power curve, where a HF of 0.486 was obtained. The system stabilized faster than in the previous case around 20 seconds after the application of the load.

It can be clearly seen a constant increase in the power outputted by the stack and a decrease in the one outputted by the battery. The stack voltage follows the battery voltage, by operating above the rated power of the stack, the battery is being discharged and its voltage value is decreasing, so the same happens to the stack. A decrease in voltage corresponds to an increase in current, as can be seen in the polarization curves (figure 5), what leads to an increase in the power produced by the stack. Long operations in this regime can lead to stack damage. So there is the need to limit the stack voltage output to avoid this.

It can be concluded that the stack and the whole system have a very fast response, since the battery response is almost immediate (MaxAmps, n.d.), and the stack presents a very similar response to the one of the battery, showing that this system is suitable for a UAV integration. To better access the response time of the system, the plotted values have to be compared with the rise rate of the programmable load in each moment.

3.4 Electric Motor Testing

With a UAV future implementation in mind, the system was tested while powering an EM, the MN801S KV120 with the G29 propeller. This was the EM that presented the best performance from the ones used to perform the thrust tests presented in sub-section 2.4. The setup used to perform these tests was very similar to the one used in the referred thrust tests, with the difference that the FC system was powering the system, instead of LiPo batteries.

The comparison between the data retrieved by the ESC and the data obtained from the FC telemetry system can be observed in figure 10.

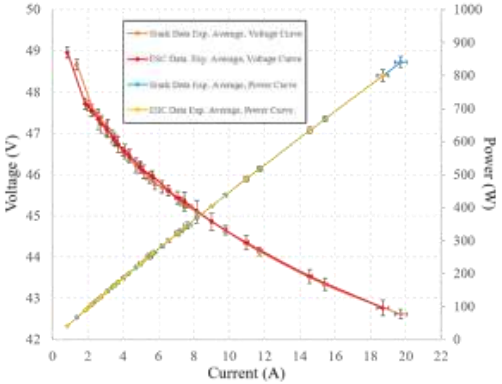


Figure 10: Comparison between the ESC and the Stack data

It was encountered, a slight difference between the power and voltage values provided by the stack and the ones read by the ESC telemetry system. The higher current (A) and power (W) provided by the stack can be explained by the fact that the stack is in this situation, powering the EM, charging the battery and powering the its auxiliary systems. There are also some electrical losses between the FC system and the ESC but can be considered negligible.

Three thrust tests were performed using the FC system, then three tests were performed only using 9S batteries. The obtain results were compared with the results obtained by using 12S LiPo batteries (Figure 11).

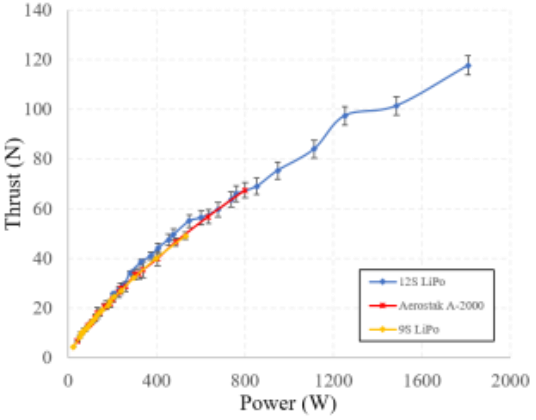


Figure 11: Difference in EM performance for the different power providing systems

It can be seen that the lowest values for thrust and power were obtained for the 9S LiPo batteries. Nevertheless, the values obtained for the 12S LiPo batteries were 2.26 times superior in power and 1.75 superior in thrust, when compared to ones obtained by the stack. This happens due to the speed constant (KV) of the EM and the stack voltage drop with the increase in current.

For a constant KV a lower voltage leads to a lower output rotational speed, and the propeller ends up producing less thrust. The voltage starts in 48.7V and drops to 42.7V at a 100% of throttle usage, while the 12S voltage is maintained fairly constant during this test at voltage near 50V.

By adopting a semi-active configuration, it is possible to control the stack voltage output with a DC/DC boost converter, for it to match the EM rated voltage, so it can operate at its maximum performance.

4 UAV Implementation Study

The dimensions of the FC system and the power amount it can provide makes it suitable for a multirotor UAV application. In this section a quadcopter configuration will be studied.

4.1 Estimated MTOW and Power Profile

The quadcopter MTOW will be the maximum weight for which the FC system can be operated continuously, with a HF of 0 in forward flight. Each of the four EMs should also be able to operate with a throttle usage near to 50% (Brun, 2018), when the aircraft is in hover. The EM used to perform these estimations was the MN801S with the 29 inches propeller 2.4. The data used in the calculations was the data provided by the EM manufacturer. The initial operation requirements were defined as a cruise altitude of 100m, a climb and a descent speed of 5m/s and a minimum cruise speed of 15m/s. In all the calculations, an effort was made to adopt the most conservative approach. An EM efficiency value of 0.9 was considered based on the literature (Ustolin & Taccani, 2018).

An initial estimation was performed by considering a TOW (take-off weight) of 18kg. A 46% of throttle usage is achieved in hover for the considered EM. Using the Momentum Theory equations for hover, defined in a classic helicopter theory book (Leishman, 2006). The figure of merit (FM) for this quadcopter configuration was obtained, by dividing the ideal power obtained for hover, calculated by using the defined equations in (Leishman, 2006), by the actual power needed to operate this EM at a 46% throttle, obtained from the data provided by the manufacturer (T-Motor, 2023). Obtaining a FM of 0.721. This FM was then used to compute the forward flight power values. The approach used to do the forward flight calculations is shown in (Ustolin & Taccani, 2018). The assumptions, shown in table 2 for air density (ρ), interference factor (k), parasitic drag coefficient (cd_0), drag coefficient (CD) and angle of attack of the rotor blades (α) were done.

Table 2: Forward flight coefficient assumptions

Parameter (units)	Value	Reference
$\rho(kg/m^3)$	1.225	(Brederode, 2018)
k	1.15	(Johnson, 2013)
C_{d0}	0.013	(Ren, Ge, Chen, Fua, & Lee, 2012)
C_D	0.022	(Ustolin & Taccani, 2018)
$\alpha(^\circ)$	3	(Ustolin & Taccani, 2018)

From these values and the defined equations in (Ustolin & Taccani, 2018), and after accounting with the FM obtained for hover and the EM inefficiencies a power of 1390W was obtained for forward flight. Showing that a higher MTOW could be achieved.

By following an iterative process using the same method as it was used to calculate the power required for a 18kg UAV, a MTOW of 22kg was achieved. Being this the last value that would require a power below the rated power of the FC system of 2041.18W at 15 m/s, while still providing a safety threshold to account with the power that is going to be provided to the battery

and FC auxiliary systems and the electrical losses through the wires. The forward velocity value that optimized the power was then obtained (20 m/s). The axial climb power was also obtained using the momentum theory (Leishman, 2006), since this was the most conservative approach. For the axial descent the semi empiric relations shown in equations 4 and 5, established in (Johnson, 2013) were used. The first equation on the system of equations 4 was used, with v_h being induced velocity in hover, computed using the momentum theory equations.

$$\begin{cases} \frac{v_{i,d}}{v_h} = k - \frac{3}{4}\frac{V_d}{v_h}, for \frac{-8k}{4k+1} \leq \frac{V_d}{v_h} \leq 0 \\ \frac{v_{i,d}}{v_h} = k\left[7 + 3\frac{V_d}{v_h}\right], for -2 \leq \frac{V_d}{v_h} \leq \frac{-8k}{4k+1} \end{cases} \quad (4)$$

$$P = T\left(V_y + k_i v_{i,d}\right) + \rho A V_{tip}^3 \left(\frac{\sigma C_{d0}}{8}\right) \quad (5)$$

The estimated power values obtained for each flight stage can be seen in table 3.

Table 3: Power values for a 22kg MTOW

Flight Stage	Power (W)
Hover	2364.8
Forward Flight	1745.7
Axial Climb	3326
Axial descent	2115

4.2 Ground testing of a flight profile

Using the power values shown in table 3, a flight profile of 1240s was defined to be tested in the system, with the programmable load. The transition power was considered to be equal to the hover power to simplify the flight profile (figure 12).

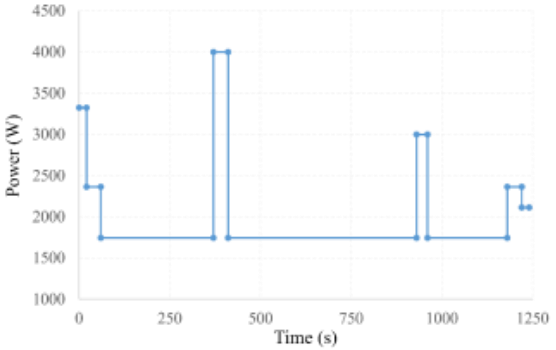


Figure 12: Defined Flight Profile

It starts with a climb phase, then hover/ transition, then a forward flight phase interrupted by two power peaks, of 4000W and 3000W, then hover/ transition and finishes with an axial descent phase. The stack and battery power response can be seen in figure 13.

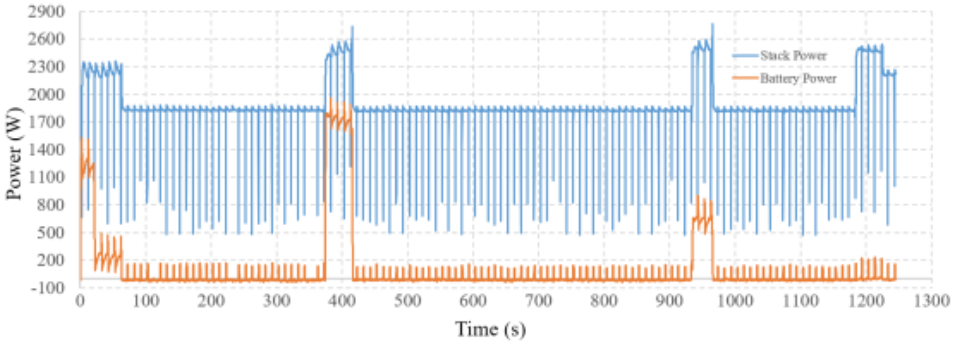


Figure 13: Stack and battery power profile

The HF obtained in forward flight was 0% as intended, while the values obtained for the other flight stages are presented in table 4

Table 4: HF values for above rated power flight stages

Flight Stage	HF (%)
Axial Climb	35.1
Hover/Transition	9.9
Power Peak (4000W)	41
Power Peak (3000W)	20
Hover/Transition	1.0
Axial Descent	0.3

It can be seen that there was a reduction of almost 9% from the first hover stage to the second, despite the requested power being the same. This happens because every time the power requested is above the rated power, the battery is providing power as well to satisfy the load request. This reduces the SOC of the battery, and in consequence its voltage, and although there is a voltage increase when the forward flight stage is being performed, it never reached the previously obtained voltage values, since an equilibrium between the power that receives and the power that needs to provide during the stack maintenance cycles is reached. In a passive configuration the stack voltage follows the battery voltage. The decrease in stack voltage by looking at the polarization curves (figure 3), leads to an increase in stack current. The current increases at a higher rate than the voltage decreases, which leads to an increase in the power outputted by the stack and to a decrease in the power value outputted by the battery. If not controlled, this behaviour can end up damaging the stack, in the 4000W power peak the current provided by the stack rose above 70A what is not desirable, following the manufacturer specifications (H3 Dynamics, 2023a). Once again, the solution is to adopt a semi-active configuration (Wang et al., 2020).

During this flight time: the stack produced 659.43Wh of energy; reached a maximum temperature 55ºC; and once again there was a rise in the inlet pressure, as seen in section 3.

4.3 Implementation on the MIMIQ

The MIMIQ (figure 14) is a 31.58kg MTOW quadcopter currently being developed at CfAR (Castellani et al., 2023). This UAV is powered by an undersized series hybrid generator, so the MTOW will have to be reduced. This is the perfect situation to integrate the studied FC system into this system.

A commercially available 12S LiPo battery sized with 1.5 safety factor, to supply all the energy needed for a 22kg MIMIQ to hover for 15 minutes, weights 1.122kg. The FC system and auxiliary streamlined components (hybrid card, DC/DC boost converter and H2 pressure regulator) weight 3.805kg. By replacing the EMs currently being used in the MIMIQ, the MN805 KV120, for the studied MN801 it is possibly to further reduce the weight in 0.6kg. From now on the airframe weight has to be reduced to incorporate a hydrogen cylinder from H3 Dynamics F-series (H3 Dynamics, 2023b). It is possible to estimate the endurance of each tank by using the energy produced by the stack in the tested flight profile. It is also possible to estimate the reduction in airframe weight that has to be done to incorporate each one of these tanks. With a 7.2L tank, a endurance of 80 mins is estimated, requiring a 16.4% weight reduction in the airframe from 11.735kg to 9.808kg. The defined FC system has a total weight of 8.217kg.

This system is 38.3% lighter than an equivalent all-electric system powered with a LiPo 12S battery, and 19.3% lighter than the series generator currently installed in the MIMIQ, with a correctly sized battery.

Figure 14: MIMIQ on its first flight test

5 Conclusions

It was proved that the studied system with the following recommendations and modifications is suited for a 22kg UAV implementation, due to its high specific power value high rated power value and rapid transient response. A semi-active configuration should be adopted, by incorporate a DC/DC boost converter on the energy output of the FC stack, to operate the EMs at their maximum performance, and to avoid reaching current values that can end up permanently damaging the FC. The pressure regulator from H^3 Dynamics should also be acquired, to avoid surpassing the 1bar inlet pressure, enabling longer tests to be performed on the system. A hydrogen cylinder from the FC system manufacturer should also be acquired, based on the required endurance and weight that can be reduced from the airframe. A wireless telemetry system also needs to be installed.

As future work, the modifications referred above should be implemented and the results should be compared with the ones obtained in this research. Flight tests should also be performed to access the in-flight suitability and performance of the system. An emission analysis should be performed in the FC purging tube to compare the NOx emissions with the ones produced by ICEs.

References

Apeland, J., Pavlou, D., & Hemmingsen, T. (2020a, 9). State-of-Technology and Barriers for Adoption of Fuel Cell Powered Multirotor Drones. In (p. 1359-1367). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (DOI: 10.1109/ICUAS48674.2020.9213971) doi: 10.1109/ICUAS48674.2020.9213971

Apeland, J., Pavlou, D., & Hemmingsen, T. (2020b). Suitability analysis of implementing a fuel cell on a multirotor drone. Journal of Aerospace Technology and Management, 12(1), 1-14. (DOI:10.5028/jatm.v12.1172)

Arat, H. T., & Sürer, M. G. (2017, 12). State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation. European Mechanical Science,2(4), 20-30. (https://doi.org/10.26701/ems.364286)

Arat, H. T., Sürer, M. G., Gökpinar, S., & Aydin, K. (2020). Conceptual design analysis for a lightweight aircraft with a fuel cell hybrid propulsion system. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. (https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1773966)

Brederode, V. (2018). Aerodinâmica Incompressível: Fundamentos (2nd ed.). Lisboa, Portugal: IST Press. (ISBN:978- 989-8481-32-0)

Brun, N. S. (2018). Preliminary design of a fuel cell-battery hybrid propulsion system for a small vtol uav (Unpublished master's thesis). Universitetet i Stavanger, Stavanger, Norway.

Castellani, N., Pedrosa, F., Matlock, J., Mazur, A., Lowczycki, K., Widera, P., … Suleman, A. (2023). Development of a Series Hybrid Multirotor. 13th EASN International Conference on Innovation in Aviation Space for Opening New Horizons.

Chia, A. F., & Min, K. M. (2021). Design and Performance Analysis of a Fuel Cell Powered Heavy-Lift Multirotor Drone. The Proceedings of the 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 1, 269-282. (https://doi.org/10.1007/978-981-19-2689-120)

Dent, S. (2022, 11). Airbus is building a hydrogen fuel-cell engine for aircraft. Retrieved from https://www.engadget.com (Last Acessed on: 06.03.2023)

Dicks, A. L., & Rand, D. A. (2018). Fuel Cell Systems Explained. John Wiley Sons Ltd. (ISBN: 9781118613528)

Farinha, J. A. (2022). On the Design and Study of a Parallel Hybrid Electric Propulsion Test Apparatus for UAVs (Unpublished master's thesis). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Gong, A., & Verstraete, D. (2017, 8). Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. International Journal of Hydrogen Energy, 42(33), 21311-21333.

H3 Dynamics. (2023a, 08). Aerostak 2000W Hydrogen Fuel Cell: Operation Maintenace Manual. (User Manual)

H3 Dynamics. (2023b). F-Series Pressurized H2 Gas Cylinders: 300bar. (Brochure)

Intelligent Energy. (2023). Hydrogen Fuel Cell Manufacturer: Intelligent Energy Limited. Retrieved from https://www.intelligent-energy.com/ Last Acessed on: 19.07.2023)

Johnson, W. (2013). Rotorcraft aeromechanics (First ed.). Cambridge University Press. (ISBN: 978-1-107-02807-4)

Kim, T., Shim, H., & Kwon, S. (2007, 01). Micro aerial vehicle powered by a micro pem fuel cell and sodium borohydride hydrogen source. Proceedings of the 7th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS), 11.

Leishman, J. G. (2006). Principles of Helicopter Aerodynamics (Second ed.). Cambridge University press. (ISBN: 9781107013353)

Machado, L. M. G. (2019). Design and Development of a Hybrid Electric Propulsion System for Unmanned Aerial Vehicles (Unpublished master's thesis). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

MathWorks. (2023). Fuel Cell Stack: Implement generic hydrogen fuel cell stack model. Retrieved from https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html (URL: https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ ref/fuelcellstack.html Last Acessed on: 10.10.2023)

Matlock, J. (2019). Evaluation of Hybrid-Electric Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles (Unpublished master's thesis). University of Victoria, Victoria, BC, Canada.

MaxAmps. (n.d.). Graphene LiPo 5200 9S 33.3v Battery Pack. Retrieved from https://maxamps.com/collections/9s-lipo-battery-33-3v/products/graphene-lipo-5200-9s-33-3-battery(URL:https://maxamps.com/collections/9s-lipo-battery-33-3v/products/graphene-lipo-5200-9s-33-3-battery Last Acessed on: 17.08.2023) O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016). Fuel cell fundamentals (Third ed.). John Wiley and Sons, Inc.(ISBN: 978-1-119-11380-5)

Ozbek, E., Yalin, G., Karaoglan, M. U., Ekici, S., Colpan, C. O., & Karakoc, T. H. (2021, 4). Architecture design and performance analysis of a hybrid hydrogen fuel cell system for unmanned aerial vehicle. International Journal of Hydrogen Energy, 346(30), 16453-16464. (https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.216)

Pan, Z. F., An, L., & Wen, C. Y. (2019, 4). Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles. Applied Energy, 240, 473-485. (https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.079)

Pedrosa, F. (2023). Characterization and Environmental Analysis of a Series Hybrid Electric Propulsion System for UAV Implementation (Unpublished master's thesis). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Praxair. (2023). Hydrogen Catalogue- Section B- Pure Gases. Retrieved from www.praxairdirect.com (URL: www.praxairdirect.com)

Raberg-Hellsing, M., & Kaijser, C. (2004, 6). Specification of Test Procedures for Polymer Electrolyte Fuel Cell Stacks. Ren, B., Ge, S. S., Chen, C., Fua, C.-H., & Lee, T. H. (2012). Modelling, Control and Coordination of Helicopter Systems (First ed.). Springer. (ISBN: 978-1-4614-1562-6)

Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014, 4). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 810-853. (https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012)

Silva, L. (2022). Integration and Testing of a Hydrogen Fuel Cell in a Hybrid Electric Propulsion System (Unpublished master's thesis). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

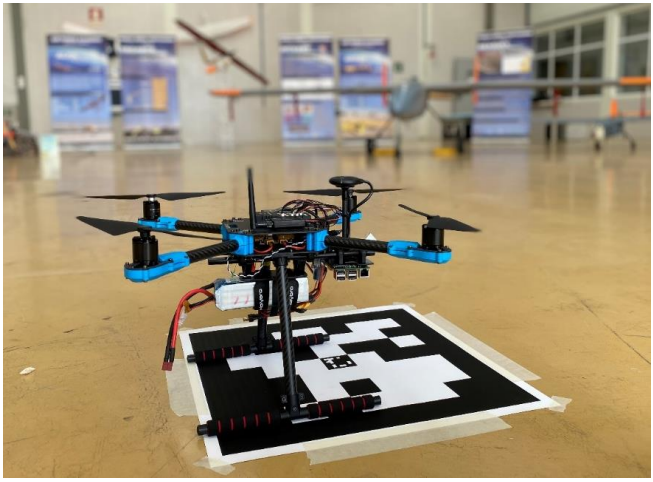
Swider-Lyons, K., Stroman, R., Rodgers, J., Edwards, D., Mackrell, J., Schuette, M., & Page, G. (2013). Liquid hydrogen fuel system for small unmanned air vehicles. (https://doi.org/10.2514/6.2013-467) doi: 10.2514/6.2013-467

T-Motor. (2023). Store. Retrieved from https://store.tmotor.com/ (URL: https://store.tmotor.com/ Last Acessed on:1.08.2023)

Ustolin, F., & Taccani, R. (2018). Fuel cells for airborne usage: Energy storage comparison. International Journal of Hydrogen Energy, 43(26), 11853-11861. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/

Wang, B., Zhao, D., Li, W., Wang, Z., Huang, Y., You, Y., & Becker, S. (2020). Current technologies and challenges of applying fuel cell hybrid propulsion systems in unmanned aerial vehicles. Progress in Aerospace Sciences, 116, 100620. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042120300324

Design and Implementation of a Vision-based Autoland System



Author: ALF/PILAV José Pedro Neves da Rocha
Master of Science Degree in Military and Aeronautical Sciences – Aviator Pilot
Air Force Academy, Sintra

Supervisor: MAJ/ENGEL Tiago Oliveira
Air Force Academy, Sintra

Co-Supervisors: MAJ/ENGEL Gonçalo Cruz
CAP/ENGEL Diogo Silva
Air Force Academy, Sintra

.

Abstract: Over the past few years, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have become increasingly popular. Regardless of the objective at hand, several efforts have been gathered to automate the landing process, considered one of the most critical flight phases. The present work aims to design, implement and validate a three-dimensional landing control system for a Vertical Take-off and Landing (VTOL) UAV. One of the main requirements for the implemented system is that its proper functioning must be ensured even when considering an application scenario where no external radio-frequency navigation signals are available, by using a computer-vision system and a data fusion method to fuse the different sources of navigation data. In particular, for the computer vision system, the use of an external square-based fiducial marker is proposed, resorting to the open-source ArUco library to obtain the relative position of the UAV. For data fusion purposes, a Kalman filter (KF) that receives inputs from a Global Navigation Satellite System/Inertial Measurement Unit (GNSS/IMU) and from the implemented computer vision system is adopted. Specifically, a linear kinematic model for the UAV is considered. The fused navigation solution is fed to a custom trajectory controller to land the UAV on top of the visual marker. The proposed landing system is validated, in an initial phase, through a set of Software-In-the-Loop (SITL) simulations, using a framework based on Python, Robot Operating System (ROS), PX4, and Gazebo. Finally, a set of flight test results under real-world conditions is presented, demonstrating an accuracy of 14 cm of the proposed method.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle; Automatic Landing; VTOL; Computer Vision; ArUco; Kalman Filter.

1 Introduction

1.1 Background, Motivation and Problem Formulation

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have become increasingly popular in the last few decades, with applications in a wide range of fields (Patruno et al., 2019). Regardless of the objective at hand, direct line-of-site is the most basic solution for monitoring the position and attitude of a UAV, by means of an external pilot (EP). However, this control technique poses several difficulties for the EP, especially during the landing phase, as presented by Williams (2006).

Due to this, several efforts have been gathered to automate the landing process, of which it is possible to highlight those that make use of computer vision. Because of their ability to capture real-time visual data and provide essential information for precise navigation and control, camera sensors have been considered as an alternative solution for this purpose (Jin et al., 2016).

The ability to automate processes, in particular the (critical) landing phase, becomes a relevant object of scientific study for the Air Force Academy Research Center (CIAFA), whose goal is focused on the development of smaller platforms to enable the rapid prototyping and in-flight testing of advanced controllers and data processing systems. Thus, considering a low-cost, electrically driven VTOL UAV that makes use of the architecture adopted by CIAFA, proposed by Alves et al. (2022) and Félix et al. (2022), the problem considered in this study can be formulated as follows:

Design, implement, and validate a three-dimensional (3D) control system based on computer vision that allows to automate the landing process of the considered vehicle, while ensuring a high level of accuracy.

1.2 Contributions

Having formulated the problem, it becomes relevant to emphasize what contributions have emerged as a result of the present study. In this context, four major contributions are identified:

i. Implementation of a modular computational architecture to obtain the position of a given onboard camera sensor, based on computer vision;
ii. Implementation and adjustment of a Kalman filter (KF) to estimate the position of a given vehicle, based on the readings of the different sensors considered;
iii. Development of a three-dimensional motion control system to command and control a VTOL UAV during the landing phase;
iv. Assembly and instrumentation of a new quadcopter, based on the architecture proposed by Alves et al. (2022) and Félix et al. (2022) in use at *CIAFA*, which allows the testing and validation of new hypotheses and academic concepts.

2 State-of-the-Art

2.1 Vision-based Landing

Generic landing control systems usually rely on the navigation solution obtained by the data fusion of several onboard sensors, such as GNSS and Inertial Navigation System (INS). While these systems have proven to be effective over time, both have some significant drawbacks (Gautam et al., 2014). Camera sensors are part of the alternatives to overcome those difficulties and have become increasingly popular over the past few years, especially for landing purposes (Jin et al., 2016).

In addition to being self-contained and not jammable, these sensors provide a great deal of information about the surrounding environment. Due to the fact that they are lightweight, energy-efficient, and in most cases low-cost, currently any UAV can be equipped with an onboard camera. Their expanding use has made it possible to classify existing methods based on their characteristics. Thus, the classification adopted for structuring this chapter is proposed by Nguyen et al. (2018) and divides the existing methods into active and passive.

2.1.1 Passive Methods

Passive methods are characterized by making use of camera sensors distributed on the ground. As an example of this method, Santos (2014) presented a vision-based system to track a fixed-wing UAV during the landing process on a ship's deck. The choice of a ground-based system allowed for the use of a smaller UAV, since the vehicle had less computational requirements. Despite this, the reliability of the system as a whole would increase if the UAV could also perform this process.

2.1.2 Active Methods

On the other hand, active methods make use of a camera onboard the UAV. With this, the vehicle is able to detect a safe region or a cooperative target on the ground, performing a markerless-based or marker-based approach, respectively (Nguyen et al., 2018). Forster et al. (2015) proposed a markerless-based approach in which the vision-based depth estimates generated an elevation map in order to compute the safest landing site. Fusing these with the Inertial Measurement Unit (IMU) readings via an Extended KF (EKF) provided the required information regarding the position of the UAV.

On the other hand, in marker-based approaches, a specific image pattern, usually displayed with a white colour on a dark background, is combined with a detection algorithm that makes use of it to extract the desired information (Jin et al., 2016). According to Kendoul (2012), there are two main types of landing pads. The firsts, known as point fiducial markers, consists of

a set of points, as the name suggests. The seconds are comprised of a broader range of geometric shapes and therefore are referred to as various curve fiducial markers. Different studies originated multiple cooperative targets of this nature, from a set of concentric circles (Lange et al., 2009) to the international helicopter landing target (Patruno et al., 2019). Also in this category, square-based fiducial markers were used several times, relying on several open-source libraries (such as ArUco) to create them, as in the study proposed by Khazetdinov et al. (2021).

Additionally, Acuna & Willert (2018) proposed the combination of two various curve fiducial markers in a dynamic solution that, by employing any type of display technology, changed its appearance according to spatiotemporal requirements. Another variation was suggested by Xu et al. (2009)in which a 'T'-shaped cooperative object was used. This differed from the aforementioned objects by actively emitting IR light, with the purpose of enhancing detection accuracy, especially in low-light conditions.

Further categorization can be made by analysing whether the proposed methods employ Machine Learning (ML) techniques or not. The main concept behind the detection using deep learning is to improve the target detection algorithm in terms of detection speed and accuracy. However, these ML-based approaches are computationally demanding and require an embedded hardware system that can support the calculation complexity (Xin et al., 2022).

2.2 Sensor Data Fusion

Data fusion refers to the theory, methods, and tools developed to take advantage of the synergy in the information obtained from various sources so that the final decision or action is superior to what would be possible if these were used separately (Dasarathy, 2001). According to Raol (2009), there are several advantages of data fusion, such as sensor redundancy and extended temporal coverage, resulting in an overall ensured performance of the multisensory integrated systems.

Data fusion can be categorized using a number of parameters. Regarding the abstraction level, low-level fusion involves combining multiple sources of raw preprocessed data to create a more informative data collection. Intermediate-level fusion combines various features into a feature map, while high-level fusion integrates decisions from different experts using methods like voting or statistical approaches.

In addition, Durrant-Whyte (1988) proposed a classification criterion based on the sensor configuration. In the complementary type, sensors are independent of one another and the input sources represent various aspects of the environment, allowing the fusion process to be rather simple. Alternatively, in the redundant/competitive configuration, each sensor provides different readings of the same feature, offering robustness and fault tolerance. Lastly, in the cooperative fusion, information that would not be obtained from a single sensor is derived using data from two distinct sensors.

The last addressed characterization is done by analysing the data fusion architecture. According to Castanedo (2013), a centralized system receives the information from all the input sources in a central processor, which houses the fusion node. A decentralized fusion, on the other hand, is made of a network of nodes, each with independent processing power and no central point for fusing data. Thus, each node fuses its local information with the data it receives from its peers, performing the process of data fusion in an autonomous way. Alternatively, in a distributed system, measurements from every source node are processed separately before being delivered to the fusion node.

3 Computer Vision

3.1 Marker Design

Bearing in mind the requirements established for this study, preference was given to a system based on active methods, where the camera was onboard the UAV and it was not necessary to resort to complex and difficult to assemble ground systems. Among the several fiducial marker systems proposed in the literature, those based on square markers have gained favour since they allow to extract the camera pose from its four corners, provided the camera is properly calibrated. The open-source ArUco (Augmented Reality University of Cordoba) library, introduced by Garrido-Jurado et al. (2014),provided not only an algorithm for generating configurable marker dictionaries, but also a method for automatically detecting the markers and correcting possible errors.

To promote the detection of the collaborative target at the different flight altitudes that can be assumed during the landing, the marker was modified according to suggested by Khazetdinov et al. (2021). Thus, to create the embedded ArUco (e-ArUco) two markers with 7x7 dimensions were used. The outer marker was chosen for having a black square in its center, which was replaced by a second marker with more black area than white, so as not to impair the detection of the first one. The final result is shown in Figure 1 and is composed of the marker 129 with the 280 in its interior. It was printed with a size of 45x45 cm, which, according to Khazetdinov et al. (2021), can be detected from 0.2m to 30m.

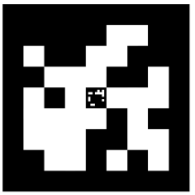


Figure 1 - Cooperative target based on the e-ArUco proposed by Khazetdinov et al. (2021).

3.2 Computer Vision Module

To ensure the proper functioning of the computer vision system, a set of ROS nodes that were responsible for all the necessary steps was created. The Image Publish node receives a video stream, transforms it into a set of frames, and converts them into a ROS message published in the */sensor_images* topic.

This topic is subscribed to by the ArUco Detection node, responsible for detecting the markers with the IDs that match the ones in the e-ArUco presented in the previous section. To do so, it scans the images for square forms that could represent markers and evaluate whether they are indeed ArUcos by assessing their inner codification. Each identified marker is composed of its ID number and the image coordinates of its four corners, which are published in */uav/marker/arucos* topic and used to estimate the relative position of the camera.

However, before this can be estimated, the vision sensor must be properly characterized. Thus, the pinhole camera model was employed to establish the correct relation between the spatial point and its corresponding image pixel. Thus, it is essential to obtain the camera matrix composed of the sensor's intrinsic parameters, such as the focal length for the x and y-axis (f_x and f_y, respectively) and the coordinates of the optical center (c_x, c_y). In addition, camera lenses suffer from radial and tangential distortion, which affects the viewed scene. To overcome this limitation, it is important to characterize these parameters that describe the amount of lens distortion, known as distortion coefficients. These are (k_1, k_2, k_3) and (p_1, p_2) and refer to radial

and tangential distortion, respectively. The process by which these values are obtained is known as camera calibration and consists of passing a set of images of a specific pattern to the Camera Calibration node, which uses OpenCV tools to extract them. In this particular application, a 9x6 chessboard pattern was used as the calibration pattern.

Finally, the parameters referring to the camera as well as the information associated with the detected markers are used by the Position Estimation node to obtain the relative position of the sensor with respect to the cooperative target. This position is obtained in the form of a 3D translation vector, outputted by the OpenCV '*cv2.aruco.estimatePoseSingleMarkers'* function applied in this node. Since the physical size of the marker must be taken into consideration, this function was modified to be compatible with e-ArUco. Thus, depending on the detected ID, it assumes the corresponding edge of 45 cm or 5 cm.

Nevertheless, the translation vector cannot be used directly in this application due to the misalignment between the local coordinate system (East-North-Up) and the one used by the ArUco's algorithm, which is attached to the UAV, as shown in Figure 2. To convert the latter to the local coordinate system, a rotation matrix dependent on the UAV's heading (ψ) was applied. This heading was received from the autopilot's sensors and the rotation matrix is as follows:

$$\begin{bmatrix} x_{local} \\ y_{local} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & sen(\psi) \\ -sen(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{ArUco} \\ y_{ArUco} \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Z-coordinate estimates did not change with this conversion due to the fact that these axes are coincident in both of the coordinate systems mentioned above. After this process, the converted estimates are published in the */uav/marker/position* topic, is subscribed to by the KF node.

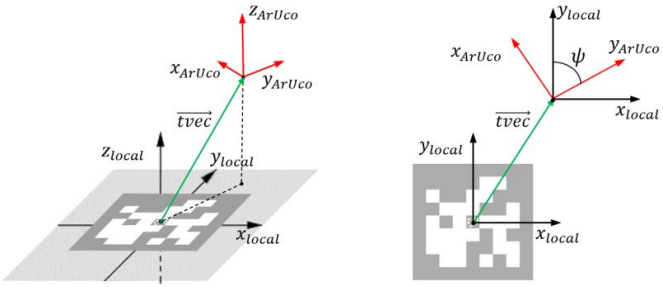


Figure 2 – Visual representation of the local and ArUco's coordinate systems misalignment.

4 Sensor Data Fusion

The KF has been a crucial part of countless navigation systems. This filter uses feedback control to estimate a process: it estimates the process state at one point and then receives feedback in the form of noisy measurements. As a result, the equations that describe it can be divided into two categories: time update equations and measurement update equations. Time update equations are in charge of projecting the present state and error covariance estimates forward in time to get the *a priori* estimates for the next time step. Measurement update equations, on the other hand, are responsible for providing feedback, i.e., adding a new measurement into the *a priori* estimate to generate an improved *a posteriori* estimate (Welch & Bishop, 2006).

For this particular application, the goal of the KF is to fuse the position estimates given by the autopilot navigation solution, composed of multiple sensors such as GPS and IMU, with the ones based on computer vision, described in the previous chapter. To do so, a discrete time linear KF, considering a model of constant position with velocity inputs, was implemented. Running at a constant rate of 20 Hz, this is characterized by having three state variables, since the tracking of the UAV is done based on a three-dimensional referential, and three measurement inputs, due to the fact that the sensors provide information for each axis. Furthermore, the size of the control input is also set to three considering that the velocity of the UAV is discriminated along these same axes.

Regarding the filter's tunning, this was achieved mainly by adjusting the process noise uncertainty and the measurement noises of both sensors. The values presented in Table 1 are the result of an adjustment based on an empirical process and were validated through multiple simulations. The process noise uncertainty was set to 0.01 m in all three axes, resulting in a considerable confidence that was possible as a result of the model considered. Given the characteristics associated with a VTOL landing and the limits imposed on the controller, the considered aircraft operates in low-velocity regimes. For this reason, it has low inertia and few delays in the actuation of the received commands, which, along with the wide range of onboard sensors that allow to accurately obtain its velocity, increases the reliability of the proposed model and the confidence in it.

Additionally, since no documentation indicating the accuracy of each sensor is known, the measurement noises were adjusted according to the observed response of the system, first in a simulated environment and then under real-world conditions. The result considered most appropriate was the one presented in this chapter, where the confidence in the vision sensor is 25 times higher than that associated with the autopilot navigation solution.

Table 1 - KF settings.

	Description	Term	Value
Time Update Equations	State Transition Matrix	A	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Control Matrix	B	$\begin{bmatrix} 1/rate & 0 & 0 \\ 0 & 1/rate & 0 \\ 0 & 0 & 1/rate \end{bmatrix}$
	Process Noise Uncertainty	Q	$\begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$
	Control Input Variable	u	$\begin{bmatrix} v_{x_{UAV}} \\ v_{y_{UAV}} \\ v_{z_{UAV}} \end{bmatrix}$
Measurement Update Equations	Autopilot/Vision-based Position	z	$\begin{bmatrix} P_{x_{UAV}} \\ P_{y_{UAV}} \\ P_{z_{UAV}} \end{bmatrix}$
	Autopilot Measurement Noise	R_{GPS}	$\begin{bmatrix} 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix}$
	Vision Measurement Noise	R_{Vis}	$\begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$
	Observation Matrix	H	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

5 UAV Control System

5.1 Motion Control Law

Regarding UAV control, it is common to assume that the considered vehicle has an internal loop controller (autopilot) that accepts kinematic level references, such as linear velocities, and generates the control signals necessary to follow these references in the presence of model uncertainty and external disturbances. The outer loop control laws described in this chapter are thus derived using a kinematic model of the vehicle that provides the references for the inner control loop.

The problem addressed in this study assumes a given VTOL UAV and a virtual particle, which the considered vehicle aims to follow throughout the entire process, minimizing the error between their positions. After deducing this, the resulting control law was based on a proportional (P) controller. However, taking into consideration the benefits of the integral component associated with Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers, this term was added in the horizontal plane. This allows for compensating any sensor's biases and to overcome the proportional control's drawback by removing offset without using an unnecessarily high controller gain. Regarding the vertical plane controller, a hyperbolic tangent function was applied so that the velocity resulting from the proportional component of the error was limited to ± 1 m/s. In addition, the returned velocity along this axis also considers the velocity of reference of the virtual particle ($v_{Z_{REF}}$), explained below. Accordingly, the designed control law can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} v_{X_{UAV}} &= K_p e_x + K_i \int e_x \, dt \,, \\ v_{Y_{UAV}} &= K_p e_y + K_i \int e_y \, dt \,, \\ v_{Z_{UAV}} &= v_{Z_{REF}} + \tanh\left(K_p e_z\right) . \end{aligned} \tag{5.1}$$

Considering this, two separate controllers were implemented, one for the horizontal plane and one for the vertical plane. Regarding the horizontal plane PI controller, the outputted velocity was limited at ±0.05 m/s and the integral component was saturated at 20% of this value to prevent the windup effect. Alternatively, the velocities resulting from the P controller along the vertical plane were limited to ±0.2 m/s. Figure 3 sums up the entire control system architecture detailed in this section.

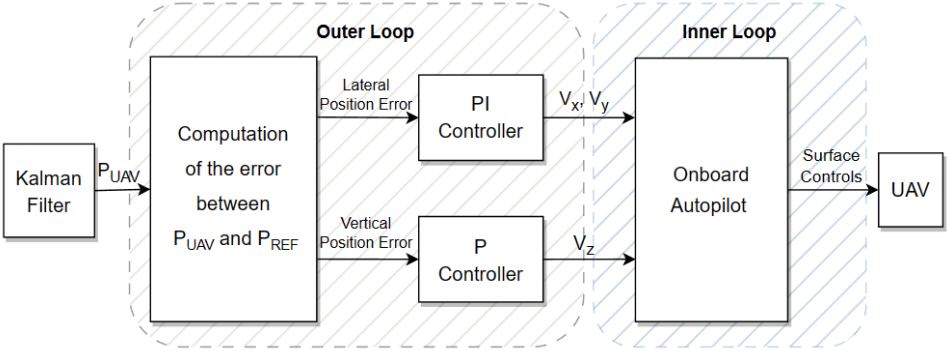


Figure 3 - Control system architecture.

The tuning of the controllers' gains was made based on the Ziegler-Nichols' method since there was no expedite approach to obtain an accurate kinematic model of the considered vehicle. However, considering that the gains resulting from this process are often too aggressive (Ogata, 2010), their value was reduced until the desired behaviour was achieved. The value of the proportional gain (K_p) was set to 1 for both controllers and the integral gain of the horizontal plane controller (K_i) to 0.1.

5.2 Landing Process Overview

Having designed the control law, it becomes imperative to describe the particle's kinematics and the expected behaviour of the UAV throughout the entire process. For this purpose, the state machine illustrated in Figure 4 was implemented. Once this process is initiated, the UAV remains in the first state until it receives the virtual particle's initial position, referred to as landing coordinate. Having received it, it progresses to the 'descend_to_hover' state, in which the control system designed in this chapter is started. Thus, if the UAV is not at the landing coordinate, the associated controllers are responsible for moving it there.

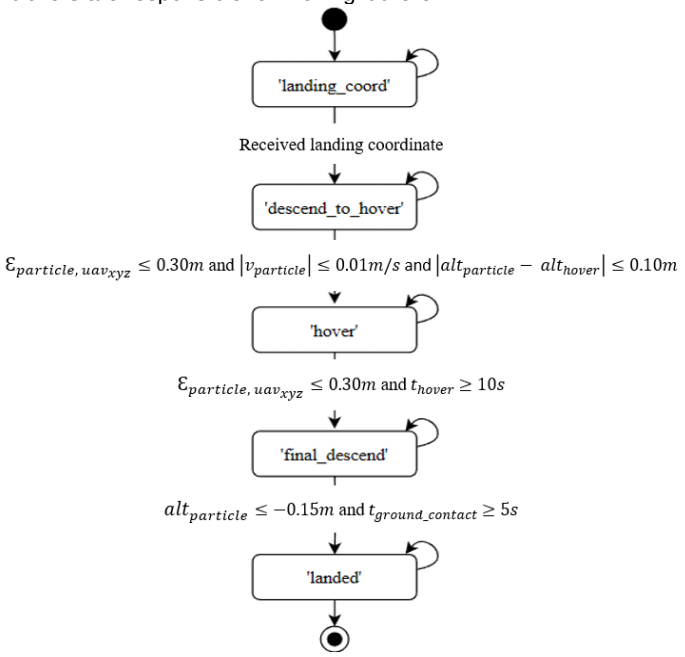


Figure 4 - State machine diagram.

Once the Euclidean distance between the position of the UAV and the virtual particle is less than 30 cm ($\mathcal{E}_{particle,\ uav_{xyz}} \leq 0.30\ m$), the particle begins its downward motion until it reaches the height at which the UAV is supposed to hover. If, for some reason, the UAV moves further away than allowed, this particle stops its movement until the vehicle regains its position. To provide smoother vertical velocity references and to ensure that the particle does not stop abruptly at this altitude, the virtual particle's velocity is filtered by a first order system as in Figure 5.

$$V_{particle} = \begin{cases} -0.1\ m/s\ , & \varepsilon_{particle,\ uav_{xyz}} \leq 0.30m \\ 0\ m/s\ , & \varepsilon_{particle,\ uav_{xyz}} > 0.30m \end{cases}$$

$$V_{particle} \rightarrow \boxed{\frac{1}{s+1}} \rightarrow V_{Z_{REF}}\ \text{, used in Equation (5.1)}$$

Figure 5 - First order system applied to provide smoother vertical references for the UAV.

Once this filter is implemented, it is important to note that the velocity of the particle will not instantaneously become zero. Instead, it takes a small-time interval to reach a value close to it, depending on the first order filter parameters. Thus, the transition altitude at which the particle's velocity must be set to zero so that it stops at the desired hover altitude must be computed. This is done according to Equation (5.3).

$$alt_{transition} = alt_{hover} - \frac{K}{a}e^{-at} + \frac{K}{a}, \tag{5.3}$$

where K stands for the velocity pulse amplitude and t = 4 / a corresponds to the settling time required for the output to reach and stabilize within a tolerance range of 2% of the desired value. In this particular implementation, the hover altitude is set to 0.90 m, which corresponds to a transition altitude of 1.10 m.

The conditions for progressing in the state machine are met once the UAV is within the admissible margin of 0.30 m with respect to the virtual particle and the latter is nearly stationary close to the hover altitude ($\left|v_{particle}\right| \leq 0.01\ m/s$ and $\left|alt_{particle} - alt_{hover}\right| \leq 0.10\ m$).

Once in 'hover' state, the UAV will hover at the established height for at least 10 consecutive seconds ($t_{hover} \geq 10\ s$). After this time period, it proceeds to the 'final_descend' state, and the particle's vertical velocity is reduced to -0.05 m/s. The particle will descend to an altitude below ground level to ensure that the UAV makes contact with the surface. Five seconds after reaching this position ($t_{ground_contact} \geq 5\ s$), the UAV transitions to the 'landed' state and all velocities are brought to zero.

6 Software-In-the-Loop Testing

To validate the previously described chapters, the first step consisted of the Software-in-the-Loop (SITL) testing. For this purpose, the simulations' setup was defined, where the trajectory of the UAV was detailed. To make the tests more time efficient, the initial altitude of the virtual particle was set to 3 meters. This allows to evaluate the most common scenario where only the outer ArUco is detected, as well as the most critical phase of the flight, which is the landing itself.

6.1 Software Architecture

To simulate a more realistic environment, the software toolchain proposed by Alves et al. (2022) and Félix et al. (2022) was adopted. This architecture is shown in Figure 6 and can be divided into four major components: the PX4 SITL interface, the ROS environment, the ground control station (QGC), and the Gazebo simulator. Lastly, the Micro Air Vehicle Link (MAVLink) communication protocol was used to establish communication between these components.

In addition, this figure provides a visual representation of interactions between de previously defined solutions. As can be seen, the computer vision module receives a video stream from an UDP source and extracts the position estimates from the detected markers. This data is fused in the data fusion module, along with the information provided by the autopilot, and the obtained estimates are fed to the controller node. This computes the commanded velocities at

the outer loop level and sends them to PX4 interface to be converted into control surface commands.

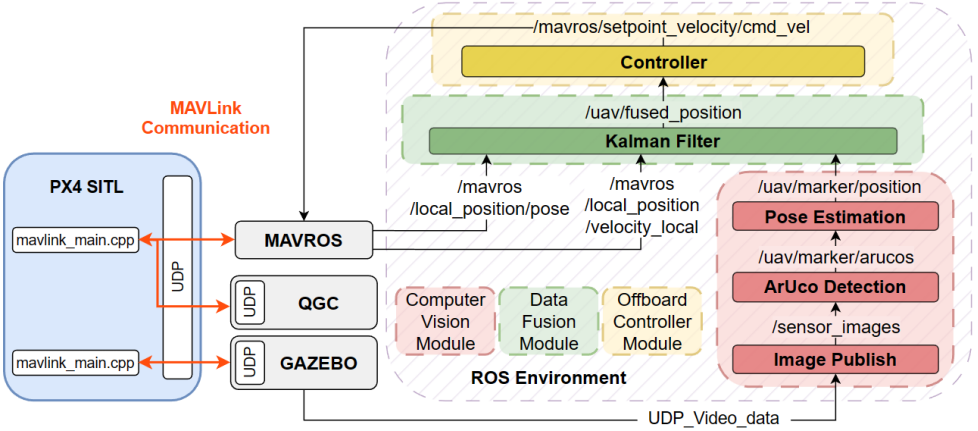


Figure 6 – System software architecture.

6.2 Simulation Results

Over the course of 100 simulations, different metrics were established to evaluate the performance of the implemented modules. Regarding the validation of the estimates derived from the computer vision and from the KF, the performance metric created was based on the assessment of the Root Mean Square Error (RMSE). This consisted of comparing the different position estimates sources with the true position of the UAV (ground truth position) along the 'hover' state.

Across all simulations, it was possible to conclude that the vision-based estimates were the most accurate when compared to the ground truth, with an average RMSE approximately five times inferior than the one associated with the autopilot readings. The RMSE of the resulting data fusion estimates was not as low; however, this value was closer to the one obtained by the vision sensor due to the higher confidence assigned to it in the KF. The statistics obtained for each sensor throughout the simulations are detailed in Table 2.

Table 2 – Sensor estimates RMSE statistics over the SITL simulations.

	Minimum RMSE	Maximum RMSE	Average RMSE	Standard Deviation
(Autopilot)	0.027 *m*	0.173 *m*	0.090 *m*	0.031 *m*
(Vision)	0.010 *m*	0.033 *m*	0.017 *m*	0.004 *m*
(Data Fusion)	0.013 *m*	0.054 *m*	0.029 *m*	0.009 *m*

The metric that aimed to validate the applied control law and its ability to maintain the desired position also resorted to the RMSE and was assessed by comparing the position estimates read from the data fusion solution and the exact coordinates of the virtual during the 'hover' state, for each simulation. The average calculated RMSE from this analysis was 6.2 cm, with a standard deviation of 2.2 cm.

Lastly, the landing accuracy is assessed through the Euclidean distance between the center of the e-ArUco and the projection of the camera's center on the ground plane. The results achieved demonstrate that the average landing accuracy based on the proposed solution was 8.2 cm, with a standard deviation of 6.4 cm, thus meeting the requirements of this study.

7 Flight Testing

7.1 Instrumentation

Further validation of the proposed solution was made through a test flight under real-world conditions. For this purpose, the *Holybro* PX4 Development Kit - X500 V2, which consists of an easy-to-assemble quadcopter, was acquired. This kit includes a set of additional equipment, from which it is possible to emphasize the *Pixhawk* 6C flight controller, compatible with the PX4 firmware, the SiK Telemetry Radio, and the M8N GPS Module, powered by a *Gens Ace* 5300 mAh 4S Lithium-Polymer (LiPo) battery. The control of this quadcopter, as well as the transition between the different flight modes configured in the autopilot, was done via the *Futaba* T10J Radio Control (RC) transmitter and the onboard R3008SB receiver.

In addition, a companion computer was connected to the autopilot to enable the computationally demanding features concerning the landing process described in this study. For this purpose, the Linux-based *Raspberry Pi* 3 Model B was chosen, which allows for efficient integration with a camera model from the same manufacturer. The camera used was the *Raspberry Pi* Camera Module V2.

7.2 Results and Discussion

Having performed the proper instrumentation of the model and defined the necessary pre-flight configurations, it was time to proceed with the test flight. This section exposes and analyses the results obtained from it, aiming to take a critical look at them. To contextualize the reader and promote the graphical analysis of the obtained results, Figure 7 shows the corresponding UAV states, as well as the time interval during which it was associated with them. In addition, it details the virtual particle's altitude throughout the entire process.

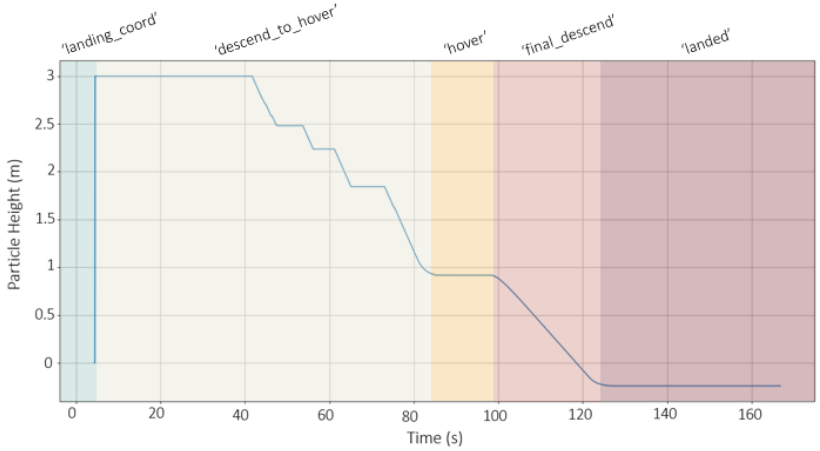


Figure 7 – UAV states and virtual particle height throughout the test flight.

One of the parameters analysed consisted of the position estimates obtained from the different sensors, as performed in the simulated environment. However, it was not possible to resort to the ground truth values for comparison purposes since they were obtained from the simulation software itself.

Despite this, it was verified that the estimates coming from the autopilot presented quite considerable errors. This was due to the fact that the tests were carried out in an indoor scenario, which impaired the reception of the GPS signal and explained the high drift values. As a result, the position readings from this sensor were discarded and the KF considered only the vision-based estimates and the constant position kinematic model. Figure 8 shows the position measurements obtained from the different sources during the test flight and demonstrates he previously mentioned significant drift associated with the autopilot navigation solution.

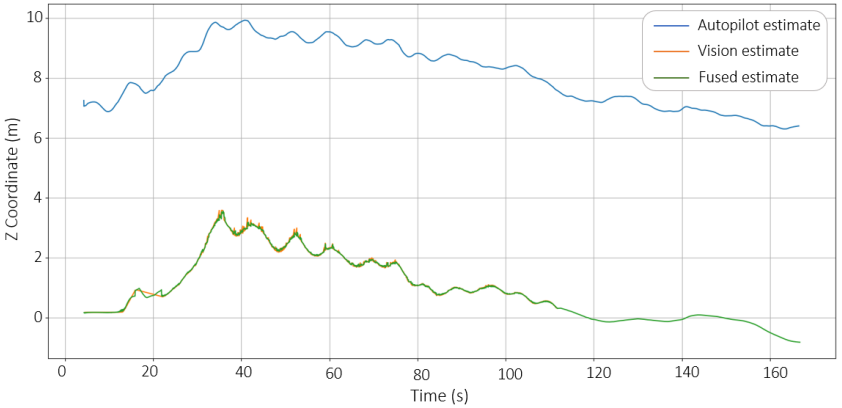


Figure 8 – Position estimates along the z-axis.

Moreover, an analysis of the error between the estimates coming from the KF, by which the UAV is driven, and the position of the virtual particle throughout the simulation was conducted, as shown in Figure 9.

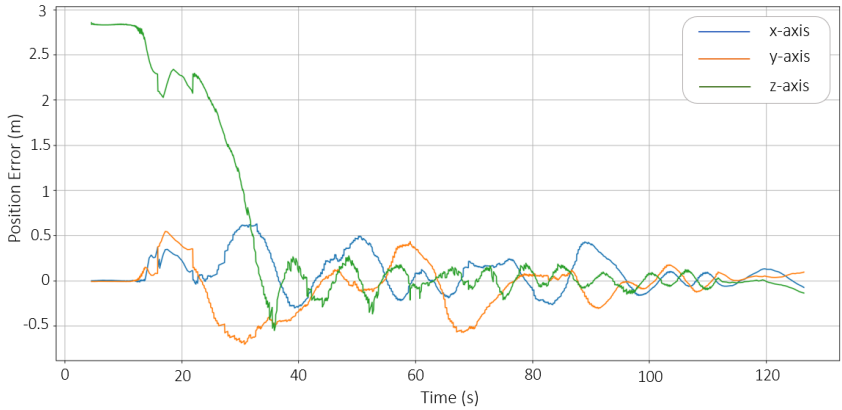


Figure 9 – Error between the KF estimates and the virtual particle position along each axis.

Through this, it is possible to note that the PI and P controllers described in Chapter 5 cause this distance to tend toward zero. By examining this figure, it can be seen that when the UAV is grounded, the offset to the initial position of the particle is not exactly 3 m since the camera sensor is already at an altitude of approximately 20 cm while onboard the quadcopter. In addition, it is important to note that until shortly after the 20-second mark, the UAV is manually moved to the vertical of the target. Therefore, the distance between the fused estimates and the virtual particle's position before that period does not allow to assess the performance of the controllers as they were not active.

Considering that this metric directly related to the velocities outputted by the controllers, an analysis of these velocities was performed. According to this, the limit of ±0.05 m/s along the horizontal plane was considered too restrictive, since the velocities were often saturated. Nevertheless, this configuration was kept due to the fact that the test was conducted in a confined environment and that some conservatism in the swiftness of the UAV's movement was desired. This way, manual control could be regained before the vehicle deviated excessively from the landing site in the event of an unexpected erratic behaviour. This similarity was not observed in the vertical plane since the imposed limits were more permissive than the previous ones. Therefore, the saturation of the outputted velocity only occurred at an early stage, when the position errors assumed considerable values.

Lastly, the landing accuracy was assessed to determine if the obtained result was in line with what was expected from the SITL simulations. In this test, the distance between the considered centers was 14 cm, which is consistent with the values presented in Section 6.3.3. This proved to be a very satisfactory result mainly due to the fact that, unlike in the simulated environment, the position information from the autopilot navigation solution was completely discarded. Moreover, it was found that the occurrence of the ground effect, inexistent in the SITL testing, affected the final part of the landing, causing the motion of the UAV to be more oscillatory in this stage than at higher altitudes.

8 Conclusions

This study proposed a multidisciplinary approach to design, from scratch, a vision-based landing control system for a VTOL UAV. The main topics addressed in it included: i) the use of a

computer vision system; ii) data fusion between different navigation sources; iii) the design of a trajectory-tracking controller and iv) thorough validation using computer simulation and a real-world flight test in an indoor environment.

Initially, the State-of-the-Art sought to briefly motivate the reasons for using computer vision during the landing process, describing some of the existing methods. After this introductory study, the vision-based technique that allowed to obtain the position of the UAV was discussed. The proposed solution was based on an active method, due to the fact that the camera was onboard the UAV, and resorted to a cooperative target, more specifically a square-based fiducial marker from the ArUco library modified as suggested by Khazetdinov et al. (2021).

Then, the implementation of a KF for the fusion of the estimates provided by the different navigation sensors was discussed. In particular, a discrete-time linear KF was applied, considering a constant position model with velocity inputs.

Following that, the control law by which the UAV was governed during the entire landing process was designed. This whole process was carried out assuming that the navigation data input would be provided by a data-fusion routine to the trajectory controller. The derived control law consisted of a Proportional-Integral controller, that accepted position navigation data and outputted velocity commands to the UAV. Since there was no expedite method to obtain an accurate kinematic model of the considered vehicle, the Ziegler-Nichols' general tuning method was adopted. Subsequently, the behaviour of the UAV throughout the entire landing was characterized, being divided along a finite state machine that comprises five distinct states.

The performance of the previously described chapters was initially validated through a set of metrics assessed over a number of SITL simulations, which made used of the toolchain proposed by Alves et al. (2022) and Félix et al. (2022). These allowed to conclude that the average RMSE of the vision-based estimates relative to the ground truth was approximately five times inferior when compared to the RMSE associated with the autopilot standalone. Additionally, the average RMSE obtained from the data fusion estimates was slightly superior to the one referring to computer vision, but was closer to it due to the KF adjustments.

Having concluded the SITL simulations, the last step of this work was the validation under real-world conditions. To do so, it was necessary to choose the platform that would be operated, as well as to proceed to its correct instrumentation in accordance to the equipment available at CIAFA. After performing all the required pre-flight configurations, the test was conducted and its results were discussed. Due to the conditions under which it was performed, the robustness of the system to operate in a GPS-denied environment was proven, since the flight test was carried out relying only on the constant position kinematic model and on the vision-based position estimates. Regarding the landing accuracy, it was possible to conclude that the deviation of 14 cms from the marker center was consistent with what was observed in the simulations and that the objective set for this study was fulfilled.

To summarize, a 3D control system that allowed to control a VTOL UAV during its landing phase was developed throughout this study. In addition, a modular computational architecture was implemented to estimate the relative position of the onboard camera sensor with respect to a cooperative target, more specifically a square-based fiducial marker, and a KF was used to integrate those readings with the ones coming from the autopilot navigation solution. The assembly and instrumentation of a new quadcopter acquired by the CIAFA allowed not only to test the work developed in this study but also the validation of new academic hypotheses and studies which can be further developed in future works.

References

Acuna, R., & Willert, V. (2018). Dynamic markers: UAV Landing proof of concept. Proceedings - 15th Latin American Robotics Symposium, 6th Brazilian Robotics Symposium and 9th Workshop on Robotics in Education, LARS/SBR/WRE 2018, 503–508. https://doi.org/10.1109/LARS/SBR/WRE.2018.00093

Alves, J., Oliveira, T., Cruz, G., & Silva, D. (2022). Software Architecture for Low-cost UAVs: An application considering automatic target tracking mission scenarios. AFA.

Castanedo, F. (2013). A Review of Data Fusion Techniques. In The Scientific World Journal. Hindawi Publishing Corporation. https://doi.org/10.1155/2013/704504

Dasarathy, B. v. (2001). Information Fusion - what, where, why, and how? (Editorial). Information Fusion 2, 75–76.

Durrant-Whyte, H. F. (1988). Sensor Models and Multisensor Integration. The International Journal of Robotics Research, 7(6), 97–113. https://doi.org/10.1177/027836498800700608

Félix, M. G., Oliveira, T., & Silva, D. (2022). Target Tracking Control System for Multi-UAV Maritime Applications. AFA.

Forster, C., Faessler, M., Fontana, F., Werlberger, M., & Scaramuzza, D. (2015). Continuous On-Board Monocular-Vision-Based Elevation Mapping Applied to Autonomous Landing of Micro Aerial Vehicles. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 111–118.

Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Marín-Jiménez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. Pattern Recognition, 47(6), 2280–2292. https://doi.org/10.1016/J.PATCOG.2014.01.005

Gautam, A., Sujit, P. B., & Saripalli, S. (2014). A survey of autonomous landing techniques for UAVs. 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2014 - Conference Proceedings, May, 1210–1218. https://doi.org/10.1109/ICUAS.2014.6842377

Jin, S., Zhang, J., Shen, L., & Li, T. (2016). On-board Vision Autonomous Landing Techniques for Quadrotor: A Survey. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), 10284–10289.

Kendoul, F. (2012). Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems. In Journal of Field Robotics (Vol. 29, Issue 2, pp. 315–378). https://doi.org/10.1002/rob.20414

Khazetdinov, A., Zakiev, A., Tsoy, T., Svinin, M., & Magid, E. (2021, May 13). Embedded ArUco: A novel approach for high precision UAV landing. SIBCON 2021 - International Siberian Conference on Control and Communications. https://doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438855

Lange, S., Sünderhauf, N., & Protzel, P. (2009). A vision based onboard approach for landing and position control of an autonomous multirotor UAV in GPS-denied environments. 2009 International Conference on Advanced Robotics, ICAR 2009, November.

Nguyen, P. H., Arsalan, M., Koo, J. H., Naqvi, R. A., Truong, N. Q., & Park, K. R. (2018). LightdenseYOLO: A fast and accurate marker tracker for autonomous UAV landing by visible light camera sensor on drone. Sensors (Switzerland), 18(6). https://doi.org/10.3390/s18061703

Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering (Fifth Edition). Prentice-Hall.

Patruno, C., Nitti, M., Petitti, A., Stella, E., & D'Orazio, T. (2019). A Vision-Based Approach for Unmanned Aerial Vehicle Landing. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 95(2), 645–664. https://doi.org/10.1007/s10846-018-0933-2

Raol, J. R. (2009). Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB. CRC Press, Inc.

Santos, N. (2014). Sistema de Visão para Aterragem Automática de UAV. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Welch, G., & Bishop, G. (2006). An Introduction to the Kalman Filter.

Williams, K. W. (2006). Human Factors of Remotely Operated Vehicles: Flight Control Problems. Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research, 7, 105–116. https://doi.org/10.1177/154193120605000135

Xin, L., Tang, Z., Gai, W., & Liu, H. (2022). Vision-Based Autonomous Landing for the UAV: A Review. Aerospace, 9(11), 634. https://doi.org/10.3390/aerospace9110634

Xu, G., Zhang, Y., Ji, S., Cheng, Y., & Tian, Y. (2009). Research on computer vision-based for UAV autonomous landing on a ship. Pattern Recognition Letters, 30(6), 600–605. https://doi.org/10.1016/J.PATREC.2008.12.011

O Bem-estar na Força Aérea Portuguesa: Influência da Autenticidade e personalidade

Fonte: Força Aérea Portuguesa (2021)

Autor: ALF/PILAV Manuel Sousa Tavares Alves Valadadres
Mestrado Integrado em Aeronáutica Militar
Academia da Força Aérea, Sintra

Orientadora: Professora Doutora Sónia P. Gonçalves
Instituto Superior de Ciências Sociais e Políticas, Universidade de Lisboa

Coorientador: CAP/PSI Adelino Pereira
Força Aérea Portuguesa, Centro de Psicologia da Força Aérea, Lisboa

Resumo: O presente estudo teve como objetivo geral analisar o bem-estar, a autenticidade e a personalidade na Força Aérea Portuguesa e a relação entre estes. Para tal optou-se por uma metodologia quantitativa por questionário. A recolha de dados foi feita em todo o universo militar da organização, obtendo 628 respostas válidas. O questionário utilizado foi composto pela Escala de Bem-Estar no Trabalho (EBET) desenvolvida por Paschoal e Tamayo (2008); O Individual Authenticity Measure at Work (IAM Work), desenvolvido por van den Bosch e Taris (2013) e por último foi utilizado o Inventário de Personalidade dos Cinco Factores NEO (NEO-FFI 20), desenvolvido por Pais-Ribeiro e Bertoquini (2006). O tratamento de dados foi feito com recurso aos programas estatísticos SPSS, JASP, PROCESS e EXCEL. Concluiu-se que a autenticidade apresenta um papel preditor do bem-estar no trabalho, que todas as dimensões de personalidade têm um papel preditor do bem-estar no trabalho e que à exceção da abertura, as restantes quatro dimensões da personalidade têm também um papel preditor de autenticidade. Sendo a relação entre estas quatro dimensões de personalidade e o bem-estar no trabalho mediada pela autenticidade. Esta investigação expande o conhecimento atual desta área do comportamento organizacional, numa organização militar portuguesa. No final do estudo são apresentadas, sugestões para as organizações, limitações deste estudo bem como recomendações para futuras investigações.

Palavras-chave: Bem-estar; Autenticidade; Personalidade; Força Aérea Portuguesa.

1. Introdução

Esta investigação visa estudar três conceitos importantes da psicologia e saúde mental: o bem-estar, a autenticidade e a personalidade.

O bem-estar organizacional é cada vez mais um fator crítico de sucesso das organizações, sendo um preditor que é principalmente instigado por fatores organizacionais. A prática da intervenção organizacional nesta área traduz-se numa redução de níveis de stress e burnout, e promoção de bem-estar ou *well-being* (WB), resultando em sucesso individual e organizacional (Tawfik et al., 2019; Tov & Diener, 2013).

Ao nível laboral, os problemas de saúde mental são a principal causa de os indivíduos receberem prestações por incapacidade, estando estas relacionadas com a perda de capital humano produtivo (World Health Organization, 2022). A implementação de medidas de bem-estar é assim uma ferramenta essencial para qualquer cultura organizacional que pretenda melhorar o seu desempenho, lucro e felicidade dos trabalhadores (Angner, 2010; Wright & Walton, 2003).

A autenticidade é um conceito pouco abordado neste âmbito, sendo que alguém autêntico, "that one acts in accord with the true self, expressing oneself in ways that are consistent with inner thoughts and feelings" (Harter, 2002, p. 382), tenderá a ter níveis de bem-estar e felicidade mais elevados, como analisado por Ménard e Brunet (2011). Além disso a inautenticidade leva a distúrbios mentais que se traduzem em estados psicológicos negativos (Higgins, 1987). Pelo que a promoção de autenticidade no trabalho traduz-se em resultados positivos para os trabalhadores e para as organizações.

A personalidade atua como conjunto de diferenças individuais que nos caracterizam (Burger, 2008). Na teoria dos traços de personalidade destaca-se o modelo *big-five* apresentando cinco dimensões da personalidade (Mccrae & Costa, 1987). Tais dimensões, Neuroticismo, Extroversão, Abertura, Amabilidade e Conscienciosidade, estão associadas a diversos efeitos positivos tanto a nível pessoal como profissional, tendo um indivíduo que tenha obtido valores positivos para as cinco dimensões maior suscetibilidade de ter maiores níveis tanto de bem-estar como de autenticidade (Grant et al., 2009; Maltby et al., 2012).

A compreensão dos níveis destes construtos e da forma como se afetam irá contribuir de forma estratégica para a promoção de bem-estar na Força Aérea Portuguesa (FA), e em outras organizações.

No seguinte estudo pretende-se responder à seguinte pergunta de partida: "*Qual a influência da autenticidade e da personalidade no bem-estar dos militares?".*

2. Revisão da literatura

2.1 Bem-estar

O bem-estar, objeto de estudo principal desta investigação, pode ser definido como "state of happiness and contentment, with low levels of distress, overall good physical and mental health and outlook, or good quality of life" (American Psychological Association, 2023, n.d.). O estudo do bem-estar no trabalho ou *well-being at work* (WBW) permite a identificação e colmatação dos elementos de risco para os trabalhadores. Nomeadamente as características do trabalho, práticas de saúde, segurança e relações interpessoais nas organizações (Danna & Griffin, 1999).

Ao analisar-se o bem-estar neste estudo, este é abordado no sentido subjetivo, ou seja, avaliação que cada indivíduo faz das suas vivências e aspetos da sua vida. Este é bastante associado à felicidade e à saúde mental, sendo em diversos estudos utilizado como preditor destes e de longevidade (Diener & Chan, 2011; Sadler et al., 2011). Ao se analisar subjetivamente o bem-estar encontram-se associadas ao mesmo as visões subjetiva e psicológica. O bem-estar subjetivo, *subjective well-being* (SWB), está associado à teoria hedónica, que considera o bem-estar como prazer, felicidade ou satisfação com a vida, avaliando-o como a presença de bom humor e definindo-o como o objetivo a alcançar na vida (Diener, 1984). Sendo avaliado globalmente através da qualidade de vida e das emoções, nas dimensões cognitiva e emocional respetivamente. Já o bem-estar psicológico, *psychological well-being* (PWB), baseia-se na teoria eudaimónica, considerando o bem-estar como a realização do potencial humano e significado de vida, dimensionado na capacidade de enfrentar desafios (Ryff & Keyes, 1995). Este modelo assume assim que o ser humano procura alcançar o seu melhor desempenho possível e a realização dos seus talentos únicos. Ryff (1989) propôs um modelo explicativo do bem-estar psicológico que incluía seis componentes: aceitação pessoal – avaliação positiva do passado do indivíduo; domínio circunstancial – capacidade de gerir efetivamente a própria vida e mundo em redor; propósito de vida – convicção de que a sua vida tem propósito e significado; relações positivas com outros – perceção de relações de qualidade; crescimento pessoal – perceção de desenvolvimento pessoal contínuo; e por último, autonomia – perceção de determinação pessoal.

2.2 Bem-estar no trabalho

O trabalho assume um papel principal nas vidas das pessoas, tanto a nível individual como coletivo. É a oportunidade de um indivíduo se sustentar, criar segurança financeira e aumentar as suas capacidades e riquezas materiais (McDaid et al., 2005). Warr (1999) destaca o trabalho remunerado como um ponto central do funcionamento das sociedades e da saúde mental dos indivíduos. Sendo o trabalho um ambiente onde os indivíduos passam a maior parte do seu dia, pode-se concluir a importância que o trabalho tem para o nosso bem-estar pessoal geral, representando, segundo o Instituto Nacional de Estatística (2022), mais de um quinto do tempo disponível para um trabalhador geral, contando com as horas de sono (em média). Como esperado, o bem-estar profissional influência positivamente o bem-estar geral, tal como analisado por Judge e Locke (1993), estes dois campos afetam-se mutuamente, tendo também o bem-estar geral um grande impacto no bem-estar profissional de um indivíduo.

A Organização Internacional do Trabalho (OIT) define o bem-estar no trabalho ou profissional como todos os aspetos da vida profissional, desde a qualidade e segurança do ambiente físico, até ao modo como os trabalhadores se sentem em relação ao seu trabalho, ambiente, clima e organização profissional (International Labour Organization, 2023, n.d.). Outros autores destacam também a remuneração, as ligações interpessoais, condições de trabalho, fatores de stress, entre outros (Gonçalves, 2013). Diversos estudos concluíram a forte relação positiva entre o bem-estar laboral e a produtividade organizacional (Rothmann & Joubert, 2007), promovendo-a como uma mais-valia nas culturas organizacionais das empresas (Tov & Diener, 2013). "Workers well-being is a key factor in determining an organisation's long-term effectiveness. Many studies show a direct link between productivity levels and the general health and well-being of the workforce." (International Labour Organization, 2023, n.d.). A OIT (2022) destaca que o não reconhecimento e promoção da importância do WBW aumentará os problemas relacionados com o trabalho como stress, conflitos entre trabalhadores, utilização de drogas, danos psicológicos, entre outros. Sendo uma forma de tornar o local de trabalho mais agradável a aposta na comunicação, liderança e desenvolvimento dos trabalhadores e a promoção de políticas informativas de bem-estar mental.

2.3 Autenticidade

A palavra 'Autenticidade' deriva do grego de *authenteo* que significa "Aquele que faz por ele próprio", "autor" ou "quem age por sua própria autoridade" (Polybius, 1962). O que sugere o controlo próprio. Por ser difícil de caracterizar este conceito, ao longo do tempo foram criadas várias definições para o mesmo, observando a autenticidade sob perspetivas diferentes. A destacar para a definição de autenticidade no presente trabalho que a perspetiva em uso é a perspetiva humanística, baseando-se na autorrealização e livre-arbítrio (Maslow, 1962).

Será sintetizado o estudo da autenticidade neste trabalho restringindo-a apenas como fenómeno sociopsicológico que relaciona a própria pessoa e a sua identidade pessoal, existindo autenticidade quando os dois campos são coerentes e inautenticidade quando incoerentes.

Nesta dimensão entre as primeiras explorações da autenticidade surge William James descrevendo o lado social do Homem, a sua necessidade de reconhecimento e as diferentes formas como nos apresentamos às pessoas consoante as nossas audiências (Vannini & Franzese, 2008). Estes conceitos impulsionaram bastante a psicologia humanística, pelo que a inautenticidade é descrita como a maior causa de necessidades de psicoterapia, revelando a necessidade de coragem para se ser autêntico (Bugental, 1965).

A pesquisa de Goffman (1974) acrescentou a importância das questões da identidade de ego e da experiência individual e subjetiva de cada um para além do desejo de aprovação dos outros como até então. Pelo que para entendermos o conceito de autenticidade temos como ponto de partida entender as experiências emocionais de cada um à cerca de ser ou não verdadeiro consigo mesmo e também as ideias concebidas por cada um sobre o seu verdadeiro eu (Rosenberg, 1979). Também Ferrara (1998) na sua obra *Reflective Authenticity* enfatizou a ideia da autenticidade se basear na reflexividade e introspeção, sendo uma experiência pessoal com o poder de moldarmos o nosso próprio ser. Um indivíduo experiência autenticidade quando é verdadeiro consigo mesmo. Não tendo sido concluído se isto quererá dizer, agir em concordância com aquilo que acreditamos que somos ou com aquilo ambicionamos ser (Vannini & Franzese, 2008). Talvez até mesmo a interseção de todas estas partições do ser.

2.4 Personalidade

A personalidade é definida pela *American Psychological Association* (2023, n.d.) como a configuração contínua de características e comportamento únicos de um indivíduo na vida, incluindo os principais traços, interesses, impulsos, valores, autoconceito, habilidades e padrões emocionais. A personalidade é geralmente vista como uma integração dinâmica e complexa que é moldada por diversas forças, incluindo tendências hereditárias; envelhecimento físico; educação pré-escolar; identificação com indivíduos e grupos; valores e papéis culturais; e experiências críticas e relacionamentos. Várias teorias explicam a estrutura e o desenvolvimento da personalidade de maneiras diferentes, mas todas concordam que a personalidade de um indivíduo contribui para a determinação do seu comportamento.

A personalidade é estudada em duas grandes vertentes, são elas: diferenças individuais em características particulares de personalidade ou traços de personalidade, como a sociabilidade e a irritabilidade; e a compreensão de como todas as partes de um indivíduo se unem num todo (Kazdin et al., 2000). Burger (2008) aborda a personalidade como o conjunto de características individuais que nos levam, tanto a lidar com cada situação de determinada forma, como a reagir emocionalmente a esta. Pelo que pessoas diferentes terão comportamentos e sentimentos diferentes resultantes de uma mesma experiência. Contudo o comportamento de um sujeito não é apenas ditado pelas suas características individuais e passado. As situações a que somos sujeitos também têm influência no nosso comportamento. Podemos resumir o estudo da personalidade, segundo o autor, em duas componentes, são elas: padrões de comportamento coerentes e processos intrapessoais. Procurando para a primeira componente saber o porquê de determinadas pessoas serem mais propensas a adotar determinado tipo de comportamento, padronizado a resposta em diferentes situações, dado que se espera que a personalidade seja coerente. A segunda componente refere-se a todos os processos emocionais, motivacionais e cognitivos que afetam a forma como cada indivíduo age e se sente.

Dentro dos diversos modelos de traços, a grande parte dos estudos que relaciona traços de personalidade e o WB utilizam o modelo *Big-Five* (BIG5) para analisar a personalidade dos indivíduos. Sendo esta das medidas de traços personalidade mais aceite cientificamente. Diversos autores trabalharam neste modelo desde 1943, chegando Mccrae e Costa (1987) a intitular cinco dimensões agregadoras de diversos traços: (1) – Extroversão (EXTRO): comunicativo, assertivo, energético; (2) – *Agreableness* ou Amabilidade (AMAB): compassivo , cooperante, que acredita nos outros; (3) – Conscienciosidade (CONSC): metódico, responsável, confiável; (4) – Estabilidade Emocional / Neuroticismo (NEURO): calmo, não neurótico, difícil de se chatear ou irritar; (5) – Abertura à experiência (ABER): interesse e curiosidade multidisciplinar, imaginativo, criativo, arrojado. Chegando assim às cinco dimensões do modelo *Big-Five* que descrevem num todo a personalidade de um indivíduo.

2.5 Hipóteses e perguntas de investigação

Com base na pergunta de partida e revisão da literatura iniciada por esta, surgem os seguintes objetivos gerais:

- A verificação da relação entre os construtos;
- A análise do papel mediador da autenticidade na relação entre a personalidade e o bem-estar.

De acordo com a revisão de literatura abordada anteriormente, a personalidade é um dos melhores preditores de bem-estar, pelo que personalidades com elevados níveis das dimensões *big-five* estarão associadas a ter um WB mais elevado. Consistentemente com inúmeros estudos (Anglim et al., 2020; Costa & Mccrae, 1980; Deneve & Copper, 1998; Grant et

al., 2009; Librán, 2006; Lucas & Diener, 2009; Schmutte & Ryff, 1997) que demonstram de forma clara a influência dos traços de personalidade no bem-estar, surge primeira hipótese:

H1: Os *Big-Five* são preditores do Bem-Estar no Trabalho

Sendo as hipóteses específicas de H1A a H1E as respetivas às cinco dimensões de personalidade: Neuroticismo, Extroversão, Abertura, Amabilidade e Conscienciosidade.

A literatura também nos mostra o papel preditor da autenticidade no bem-estar, estando esta positivamente relacionada com este. Seguindo a literatura (Ariza-Montes et al., 2017; Balbino, 2015; Ménard & Brunet, 2011; Sutton, 2020; van den Bosch & Taris, 2014; Wood et al., 2008), dá-se assim origem à segunda hipótese:

H2: As dimensões da Autenticidade predizem o Bem-Estar no Trabalho.

Sendo as hipóteses específicas de H2A a H2C respetivas às três dimensões de autenticidade: Vida Autêntica, Autoalienação e Aceitação de Influência Externa.

E da mesma forma, como anteriormente revisto, a relação entre personalidade e autenticidade, estando estas relacionadas e sendo os traços personalidade preditores autenticidade, tal como sugerido nos estudos (Fleeson & Wilt, 2010; Maltby et al., 2012; Shahzad et al., 2021; Sheldon et al., 1997; Wood et al., 2008), surge a seguinte hipótese:

H3: Os *Big-Five* predizem a Autenticidade.

Sendo as hipóteses específicas de H3A a H3E respetivas às cinco dimensões de personalidade: Neuroticismo, Extroversão, Abertura, Amabilidade e Conscienciosidade.

Pela forma já analisada como o preditor autenticidade influencia a variável final de bem-estar, este pode ser classificado como mediador da relação personalidade e bem-estar (Baron & Kenny, 1986). Dá-se origem à última hipótese:

H4: A influência dos *Big-Five* no Bem-Estar no Trabalho é mediada pela Autenticidade.

Sendo as hipóteses específicas de H4A a H4E respetivas às cinco dimensões de personalidade: Neuroticismo, Extroversão, Abertura, Amabilidade e Conscienciosidade.

3. Metodologia

Dada a natureza do estudo e o seu objetivo, optou-se por uma metodologia quantitativa para recolha e análise dos dados, utilizando-se o método de inquérito por questionário, de forma, a quantificar o nível das variáveis de estudo. Através de um estudo hipotético-dedutivo, com base na teoria abordada no estado de arte, estabeleceu-se um modelo de análise que relaciona o bem-estar, a autenticidade e a personalidade. Baseando-se na medição numérica e na análise estatística para estabelecer padrões de comportamento, usando-se recolha de dados para testar as hipóteses.

3.1 Caracterização do instrumento de recolha de dados

O instrumento utilizado neste estudo foi um inquérito por questionário dividido em quatro partes. A primeira secção do questionário refere-se aos dados demográficos da amostra (idade, sexo, estado civil, posto, especialidade, tipo de contrato e tempo de serviço). Na segunda secção foi aplicado a Escala de Bem-Estar no Trabalho (EBET) (Paschoal & Tamayo, 2008). Na terceira secção foi aplicada o Individual Authenticity Measure at Work (IAM Work) (van den Bosch & Taris, 2014). Na quarta secção do questionário foi aplicado o Inventário de Personalidade dos Cinco Factores NEO (NEO-FFI 20) (Pais-Ribeiro & Bertoquini, 2006).

A EBET compreende três dimensões: Emocional Positiva (EP), Emocional Negativa (EN) e Exressividade e Realização (ER). Avaliando cada um dos seus 21 itens numa escala do tipo *Likert* de cinco pontos. O IAM Work compreende também três dimensões da autenticidade no trabalho (AUT): Vida Autêntica (VA), Autoalienação (AA) e Aceitação de Influência Externa (AIE). Avaliando cada um dos seus 12 itens numa escala do tipo *Likert* de sete pontos. Por último o

NEO-FFI 20 engloba cinco dimensões respetivas às cinco dimensões do modelo *Big-Five*, avaliando todos os seus 20 itens numa escala do tipo *Likert* de cinco pontos.

3.2 Procedimento de recolha e análise de dados

Antes da aplicação do questionário, e devido à sensibilidade do tema em questão, foi feiro um requerimento a Sua Excelência o Chefe de Estado Maior da Força Aérea Portuguesa, tendo sido obtida a sua anuência de acordo com o seu despacho de 16 de dezembro de 2022.

Com o objetivo de fazer chegar este questionário a todos os militares da FA, foi solicitada a cooperação das Relações-Públicas da FA, tendo sido partilhado para cada militar o link para preenchimento do questionário via *Google Forms*. Esta divulgação foi enviada através de *Groupwise*, a ferramenta de correio eletrónico interno da FA. O corpo de mensagem desta divulgação continha a explicação do objetivo do estudo, questão de confidencialidade, anonimato e subjetividade de respostas.

Após o fecho do questionário, os dados foram tratados através do programa informático *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versão 29.0. Neste foram feitas análises das qualidades psicométricas dos instrumentos, análise fatorial também com recurso ao JASP (versão 17.1), onde se validou a escala de autenticidade traduzida para português. Por fim as análises de mediação e regressões lineares foram efetuadas através da extensão PROCESS MACRO para SPSS.

3.3 População e amostra

A presente investigação tem como participantes todos os militares da FA que pertencem às categorias de oficiais, sargentos, praças e cadetes. Neste apesar de o objetivo ser incluir todos os grupos de militares, os questionários não chegaram até aos oficiais generais, não estando estes presentes nesta amostra. A partir dos 630 questionários recebidos, foram criados índices agregados para cada dimensão. Estes índices foram submetidos a uma análise de *outliers*, onde foram encontrados dois severos nas dimensões: Vida Autêntica (autenticidade) e Conscieosidade (personalidade). Os mesmos foram excluídos da amostra, ficando com uma amostra final de 628 elementos (n=628). Esta ficou composta por militares com idades compreendidas entre os 18 e os 64 anos e uma idade média de 33,34 anos (DP=11,14), e com um tempo serviço compreendido entre menos de um e 42 anos, com uma média de 13,29 anos de serviço (DP=10,82). A presente amostra é na sua maioria do sexo masculino (74,7%).

A Tabela 1 apresenta as diferenças entre a população em estudo e a amostra obtida. Como se pode verificar, a representação relativa dos indivíduos de cada categoria encontra-se equilibrada e a distribuição dos indivíduos na amostra está genericamente distribuída de forma semelhante que os indivíduos da população.

Tabela 1 - Caraterização comparativa da amostra e população em estudo

		População		Amostra	
		n	%	n	%
Total		5200	100	628	100
Categoria	**Oficial Superior**	566	10,88	74	11,78
	Oficial Subalterno/Capitão	985	18,94	174	27,71
	Cadete	186	3,58	150	23,89
	Sargento	2397	46,10	216	34,39
	Praça	1066	20,50	14	2,23

4. Resultados

4.1 Análise descritiva

Após serem verificadas as qualidades psicométricas do instrumento em estudo, foram analisadas as médias e desvios-padrão das diferentes variáveis.

Tabela 2 - Estatística descritiva das variáveis

Dimensões	EP	EN	ER	VA*	AA*	AIE*	NEURO	EXTRO	ABER	AMAB	CONSC
Média	2,94	2,75	3,22	5,78	2,70	3,27	2,58	3,50	2,96	3,48	4,06
Desvio-Padrão	0,92	0,89	0,90	0,89	1,43	2,30	0,75	0,60	0,93	0,77	0,56

Nota: * significa escala tipo *Likert* de 1 a 7 (em vez de 1 a 5 como as restantes)

Podemos verificar na Tabela 2 que para as dimensões com escalas tipo *Likert* de 1 a 5, a dimensão com a maior média é a Conscienciosidade, com uma média de 4,06 enquanto a inferior é a de Neuroticismo com 2,58 de média. Já nas variáveis com escala tipo *Likert* de 1 a 7, a dimensão com maior média é a Vida Autêntica com uma média de 5,78 e a de menor média, a Autoalienação com 2,70 de média.

4.2 Regressões lineares e mediações

Para as análises de predição foram verificadas as relações utilizando todas as variáveis sem excluir nenhuma em processo de análise correlacional, pois segundo Hayes (2022) a correlação entre duas variáveis não é um pressuposto de mediação.

Dado o elevado número de variáveis foram realizadas diversas análises de mediação múltiplas em paralelo, *Parallel Multiple Mediator Model*, para o intervalo de confiança de *bootstrap* de 95%, utilizando 5000 amostragens (Hayes, 2022). Utilizando como fatores de mediação as dimensões de autenticidade, as dimensões de personalidade como variáveis iniciais e as dimensões de bem-estar como variáveis finais.

Foram utilizadas 12 dimensões nesta análise, com respetivamente quatro para a personalidade, três para autenticidade e finalmente três para o WBW. Ficando com um total de 45 (5x3x3) combinações de mediações simples. Destas 45 mediações simples apresenta-se na Tabela 3 os valores preditivos (coeficientes das regressões lineares) entre as variáveis.

Tabela 3- Síntese dos resultados de predição das variáveis

			Variáveis Finais					
			AUT			WBW		
			VA	AA	AIE	EP	EN	ER
Variáveis Iniciais	BIG5	NEURO	(-0,38)	(0,86)	(0,44)	(-0,37)	(0,42)	(-0,22)
		EXTRO	(0,45)	(-0,60)	(-0,31)	(0,46)	(-0,24)	(0,31)
		ABER	(-0,02)	(0,02)	(0,02)	(0,09)	(-0,02)	(0,05)
		AMAB	(0,24)	(-0,34)	(-0,02)	(0,06)	(-0,10)	(0,03)
		CONSC	(0,68)	(-0,50)	(-0,48)	(0,02)	(0,01)	(0,24)
	AUT	VA	-	-	-	(0,03) *	(0,06) *#	(0,14) *
		AA	-	-	-	(-0,29) *	(0,29) *	(-0,28) *
		AIE	-	-	-	(0,18) *	(-0,08) *	(0,15) *

Nota: Cor verde- Relação significativa (0,05); Cor vermelha – Relação não significativa (0,05); * Valor médio (valores divergiam poucas centésimas); # Uma das relações foi significativa (0,05)

Pode-se verificar que na personalidade se destaca o Neuroticismo e a Extroversão como preditores de todas as dimensões da autenticidade e bem-estar. A conscienciosidade também se apresentou como preditor total da autenticidade. Além destas, destacam-se também a Autoalienação e a Aceitação de Influência Externa como as dimensões da autenticidade que são preditores de bem-estar no trabalho na sua totalidade.

Além das mediações simples (utilizando as dimensões da AUT) foram analisadas as mediações gerais efetuadas utilizando a autenticidade como um todo, com o somatório dos efeitos indiretos das variáveis mediadoras da autenticidade, como sugerido *no Parallel Multiple Mediator Model* de Hayes (2022). Os resultados destas mediações gerais podem-se verificar na Tabela 4. Esta mostra o significado de cada conclusão apresentada, correspondendo os casos de mediação às relações onde o intervalo de confiança (bootstrap de 95% para 5000 amostragens) não abrange estatisticamente o zero. Além disso vejamos que para cada relação classificada como mediação o valor absoluto de *t-test* é superior a 1,96 correspondendo a um nível de significância inferior a 0,05. A tabela apresenta também as descrições das mediações: totais (MT) e parciais complementares (MP+) definidas por Hair Jr et al. (2021) mediações cujos efeitos diretos e indiretos apresentam o mesmo sentido. Não correspondendo nenhuma a uma parcial competitiva, onde os mesmos efeitos apresentariam sentidos diferentes. As relações entre variáveis apresentam a seguinte estrutura: VARIÁVEL INICIAL>MEDIADOR>VARIÁVEL FINAL.

Tabela 4 - Síntese das Mediações Gerais

Relação	c (Efeito Total)	c´ (Efeito Direto)	a*b (Efeito Indireto)	IC		t	Conclusão
				LI	LS		
NEURO>AUT>EP	-0,50	-0,37	-0,15	-0,19	-0,07	-4,39	MP+
NEURO>AUT>EN	0,55	0,42	0,13	0,08	0,18	4,62	MP+
NEURO>AUT>ER	-0,42	-0,22	-0,19	-0,26	-0,13	-6,08	MP+
EXTRO>AUT>EP	0,57	0,46	0,11	0,04	0,18	3,27	MP+
EXRTO>AUT>EN	-0,36	-0,24	-0,12	-0,19	-0,06	-3,50	MP+
EXTRO>AUT>ER	0,48	0,31	0,17	0,10	0,24	4,79	MP+
ABER >AUT>EP	0,09	0,09	-0,00	-0,05	0,04	-0,21	-
ABER >AUT>EN	-0,01 NS	-0,02 NS	0,00	-0,03	0,04	0,22	-
ABER >AUT>ER	0,04 NS	0,05 NS	-0,01	-0,05	0,04	-0,30	-
AMAB>AUT>EP	0,18	0,06 NS	0,11	0,06	0,16	4,49	MT
AMAB>AUT>EN	-0,19	-0,10	-0,09	-0,13	-0,04	-3,79	MP+
AMAB>AUT>ER	0,16	0,03 NS	0,13	0,08	0,18	5,03	MT
CONSC>AUT>EP	0,14	0,02 NS	0,12	0,32	0,20	2,65	MT
CONSC>AUT>EN	-0,08 NS	0,01 NS	-0,10	-0,18	-0,02	-2,31	MT
CONSC>AUT>ER	0,38	0,24	0,14	0,06	0,23	3,33	MP+

Nota: NS não significativo ao nível de 0,05; MP+ Mediação Parcial Complementar; MT Mediação Total

Quanto às mediações gerais, pode-se verificar que a autenticidade se verificou como mediadora em todas as relações entre as dimensões de personalidade e o bem-estar no trabalho à exceção das que incluíam a dimensão de personalidade Abertura, que não possuiu nenhuma mediação geral significativa.

5. Discussão de resultados

Veja-se de seguida os resultados dos testes de hipóteses formulados no final da revisão de literatura. A Tabela 5 apresenta um resumo das conclusões dos testes de hipóteses que serão de seguida descritos.

Tabela 5 - Resumo dos Testes de Hipóteses

Hipóteses Gerais	Hipóteses Específicas	Conclusão Específica	Conclusão Geral
H1 (B5-WBW)	H1A (NEURO)	Confirmada	**Parcialmente confirmada**
	H1B (EXTRO)	Confirmada	
	H1C (ABER)	Parcialmente confirmada	
	H1D (AMAB)	Parcialmente confirmada	
	H1E (CONSC)	Parcialmente confirmada	
H2 (AUT-WBW)	H2A (VA)	Parcialmente confirmada	**Parcialmente confirmada**
	H2B (AA)	Confirmada	
	H2C (AIE)	Confirmada	
H3 (B5-AUT)	H3A (NEURO)	Confirmada	**Parcialmente confirmada**
	H3B (EXTRO)	Confirmada	
	H3C (ABER)	Rejeitada	
	H3D (AMAB)	Parcialmente confirmada	
	H3E (CONSC)	Confirmada	
H4 (B5-AUT-WBW)	H4A (NEURO)	Confirmada	**Parcialmente confirmada**
	H4B (EXTRO)	Confirmada	
	H4C (ABER)	Rejeitada	
	H4D (AMAB)	Confirmada	
	H4E (CONSC)	Confirmada	

Teste da H1: A hipótese 1 afirmava que as dimensões de personalidade *big-five* eram preditores de bem-estar no trabalho. Para cada uma destas dimensões foi analisado o seu papel preditor no WBW. Vejamos que se destacam o Neuroticismo e a Extroversão, preditores de todas as dimensões do WBW, sendo o Neuroticismo um preditor negativo (H1A: r=-0.37 para EP; r=0.42 para EN; r=-0.22 para ER) e a Extroversão positivo (H1B: r=0.46 para EP; r=-0.24 para EN; r=0.31 para ER). Quanto à Abertura, Amabilidade e Conscienciosidade, foram apenas preditores (positivos) de uma dimensão do WBW, respetivamente da Vida Autêntica, Autoalienação e Aceitação de Influência Externa (H1C: r= 0,09 para EP; p>0,05 para EN e ER; H1D: r=-0,10 para EN; p>0,05 para EP e ER; H1E: r=0,24 para ER; p<0,05 para EP e EN).

Conclui-se que, das cinco hipóteses específicas que constituem a primeira hipótese geral (H1), duas delas foram confirmadas e três parcialmente confirmadas, **sendo parcialmente confirmada H1: As dimensões de personalidade *big-five* são preditores do Bem-Estar no Trabalho**.

Estes resultados apresentam-se de forma consistente com a literatura abordada, onde todos os traços de personalidade resultaram como influentes no bem-estar dos sujeitos, como sugerido por Grant et al. (2009). Além disso destacam-se os efeitos do Neuroticismo e da Extroversão como preditores de todas as dimensões do Bem-Estar no Trabalho.

Teste da H2: A hipótese 2 afirmava que as dimensões de Autenticidade eram preditores de bem-estar no trabalho. Para cada uma destas dimensões foi analisado o seu papel preditor no WBW. Veja-se que se destacam a Autoalienação e a Aceitação de Influência Externa, preditores de todas as dimensões do WBW, sendo estes respetivamente preditores positivo e negativo (H2B: r=-0,29 para EP; r=0,29 para EN; r=-0,28 para ER; H2C: r=0,18 para EP; r=-0,08 para EN; r=0,15 para ER). Quanto à Vida Autêntica esta apenas se apresentou significativamente como preditor para a Expressividade e Realização de forma positiva (H2A: r=0,14 para a ER; p<0,05 para EP e EN).

Conclui-se que, das três hipóteses específicas que constituem a segunda hipótese geral (H2), duas delas foram confirmadas e uma parcialmente confirmada, **sendo parcialmente**

confirmada H2: As dimensões da Autenticidade predizem as dimensões do Bem-Estar no Trabalho.

Os resultados apresentados encontram-se de acordo com a literatura, sendo as dimensões da Autenticidade preditores de Bem-Estar no Trabalho. Da mesma forma Ménard e Brunet (2011) afirmaram que havia uma relação entre estes dois conceitos. Tal como no estudo de Balbino (2015) onde as dimensões da autenticidade surgem com um importante preditor do bem-estar. Corroborando assim Sutton (2020) quando este afirma que a autenticidade é um fator chave para o bem-estar no trabalho.

Teste da H3: A hipótese 3 afirmava que as dimensões de personalidade *Big-Five* eram preditores de autenticidade no trabalho. Para cada uma destas dimensões foi analisado o seu papel preditor na AUT. Veja-se que se destacam o Neuroticismo, a Extroversão e a Conscienciosidade, preditores de todas as dimensões da AUT, sendo o Neuroticismo um preditor negativo (H3A: r=-0,38 para VA; r= 0,86 para AA; r=0,44 para AIE) e a Extroversão e a Conscienciosidade positivos (H3B: r=0,45 para VA; r=-0,60 para AA; r=-0,31 para AIE; H3E: r=0,68 para VA; r=-0,50 para AA; r=-0,48 para AIE). Quanto à Abertura e Amabilidade, a primeira não foi considerada preditor significativo de nenhuma dimensão da AUT (H3C: p>0.05 para todas as dimensões da AUT) enquanto a Amabilidade foi considerada preditor da Vida Autêntica e da Autoalienação (H3D: r=0,24 para VA; r=-0,34 para AA; p<0,05 para AIE) contribuindo de forma positiva para a AUT.

Conclui-se que, das cinco hipóteses específicas que constituem a terceira hipótese geral (H3), três delas foram confirmadas, uma parcialmente confirmada e outra rejeitada, **sendo parcialmente confirmada H3: Os traços de personalidade *big-five* predizem as dimensões da Autenticidade.**

Estes resultados apresentam-se de acordo com a literatura, sendo que as dimensões Extroversão, Amabilidade e Conscienciosidade se relacionam positivamente com a Autenticidade e o Neuroticismo de forma negativa como sugerido por Wood et al. (2008) e também por Fleeson e Wilt (2010). Apenas a Abertura se exclui do apresentado na literatura não predizendo nenhuma dimensão da Autenticidade.

Teste da H4: A última hipótese geral afirmava que a relação entre as dimensões de personalidade e o Bem-Estar no Trabalho era mediada pela autenticidade. Para cada uma das relações entre as dimensões de personalidade e de bem-estar foi verificado o potencial da autenticidade como mediador destas relações, contribuindo esta com todas as suas dimensões. Verificou-se que à exceção das relações que continham a Abertura (H4C: p>0,05 para todas as dimensões de WBW), em todas as restantes dimensões da personalidade a Autenticidade se apresentou como mediador (H4A: r=-0,15 para EP; r=0,13 para EN; r=-0,19 para ER; H4B: r=0,11para EP; r=-0,12 para EN; r=0,17 para ER; H4D: r=0,11 para EP; r=-0,09 para EN; r=0,13 para ER; H4E: r=0,12 para EP; r=-0,10 para EN; r=0,14).

Conclui-se que, das cinco hipóteses específicas que constituem a quarta hipótese geral (H4), quatro delas foram confirmadas, e uma rejeitada, **sendo parcialmente confirmada H4: A influência das dimensões de personalidade no Bem-Estar no Trabalho é mediada pela Autenticidade.**

Estes resultados encontram-se de acordo com o espectado visto que os preditores eram autonomamente explicadores das variáveis finais, realizando assim as diversas mediações apresentadas (Baron & Kenny, 1986).

6. Conclusões

O presente estudo procurava determinar a influência das dimensões da personalidade e da autenticidade no bem-estar dos militares da FA. Com o fundamento da literatura procedeu-se à análise dos traços de personalidade *big-five*, da autenticidade no trabalho e do bem-estar no trabalho e da relação entre estes construtos. Através desta concluiu-se que todos os objetivos foram atingidos e hipóteses respondidas de forma congruente com a literatura revista.

Procurar-se-á, de seguida, apresentar as conclusões deste estudo, começando por responder à pergunta de partida desta investigação: "*Qual a influência da autenticidade e da personalidade no bem-estar dos militares?*". Para responder a esta questão, a resposta será dividida em três partes: a influência da personalidade no bem-estar dos militares, a influência da autenticidade no bem-estar dos militares e por fim a influência da autenticidade na relação entre personalidade e bem-estar dos militares.

Concluiu-se que os *big-five* são preditores do bem-estar no trabalho, destacando-se o Neuroticismo e a Extroversão como preditores do WBW na sua totalidade. Além disso também se constatam os efeitos positivos de todos estes preditores no bem-estar dos militares excetuando o Neuroticismo onde os seus efeitos são negativos.

Concluiu-se também que a autenticidade é preditor de bem-estar no trabalho, destacando-se Autoalienação e a Aceitação de Influência Externa como preditores do WBW na sua totalidade. Além disso também se constata que a Vida Autêntica e a Aceitação de Influência Externa afetam positivamente o bem-estar dos militares enquanto a Autoalienação o afeta negativamente.

Por fim, concluiu-se que a autenticidade é mediadora da relação entre as dimensões de personalidade *big-five* e o bem-estar no trabalho, para todos os traços exceto para a Abertura. Além disso constata-se também que a Autenticidade como mediadora amplifica todas as relações entre os traços de personalidade e dimensões de WBW que se apresentam como significativas (mediações parciais).

Tendo sido a pergunta de investigação respondida, atingiram-se também diversos objetivos gerais, nomeadamente a análise das relações entre personalidade autenticidade e bem-estar e a análise do papel mediador da autenticidade na relação entre personalidade e bem-estar.

Por fim, como implicações práticas deste estudo surgem diversas de propostas para melhorar a gestão dos três construtos na FA com base nas conclusões apresentadas. Isto pelo que como já foi abordado, tanto a autenticidade como a personalidade são preditores de bem-estar, traduzindo-se a sua maior presença também em bem-estar. Serão de seguida apresentadas as sugestões para a FA:

I. O bem-estar tanto a nível geral como no contexto de trabalho tem consequências muito benéficas para qualquer trabalhador, pelo que os trabalhadores ao estarem a par de tais impactos, irão certamente procurar agir de encontro ao seu próprio bem-estar. Sendo a comunicação e a partilha de conhecimento útil promotores de "um clima organizacional adequado e favorável a um desenvolvimento de excelência, que incentive e favoreça o alcance de objetivos" (Devesa, 2016, p. v). Pelo que a primeira sugestão fruto desta investigação, para a Força Aérea ou para qualquer outra organização, é a divulgação aos militares/trabalhadores, através de variadas formas, da importância do bem-estar tanto a nível pessoal e de saúde, mas também a sua importância ao nível organizacional e para uma promoção de uma sociedade mais feliz e com melhor saúde mental.

II. A segunda sugestão, no seguimento da primeira prende-se com a forma como as organizações conseguem selecionar e até mesmo moldar os seus trabalhadores, algo que é inerente às organizações militares onde existe uma adaptação completa nos indivíduos (Jackson

et al., 2012). A FA poderá então continuar a fazer o seu recrutamento abordando características de personalidade e implementar também a análise da autenticidade e bem-estar dos candidatos. Além das diversas estratégias para a melhorar a seleção dos candidatos, a FA sendo uma organização militar, tem uma grande influência na forma como os indivíduos se comportam, pelo que o enquadramento dos futuros militares na organização poderá ter também em conta ferramentas de promoção de bem-estar, com o intuito mais uma vez promover a saúde mental e felicidade dos militares, contribuindo para o sucesso da organização.

III. Até agora nas sugestões foram abordadas estratégias que levam o militar/trabalhador a obter por si mesmo mais bem-estar – estratégias micro organizacionais. Agora serão apresentadas as sugestões macro organizacionais, ou seja, as mudanças que estão ao alcance das chefias para ao alterar características essenciais adotadas pela organização. São exemplos de áreas macro organizacionais onde podem ser feitas mudanças para a promoção de bem-estar: o clima e cultura organizacionais, condições de trabalho, política de desenvolvimento pessoal, práticas de gestão e liderança, condições de trabalho, características e conteúdo do trabalho, relações interpessoais, entre outros (Gonçalves, 2013). Estas alterações nas características gerais da organização deverão ir ao encontro de práticas que promovam dimensões *big-five*, autenticidade e bem-estar.

III. O acompanhamento psicológico já foi considerado em diversos estudos como um potenciador de bem-estar dos indivíduos (Kraiss et al., 2022) pelo que esta se apresenta como uma ferramenta fulcral de qualquer organização para a promoção de bem-estar dos trabalhadores. A FA já possui um centro de psicologia com diversos psicólogos disponíveis para apoiar os militares consoante o requerimento destes. Sugere-se então que, dadas as vantagens do acompanhamento psicológico, que as chefias da FA tornem mais recorrentes a presença das equipas de psicólogos no trabalho dos militares bem como o acompanhamento destes.

IV. À semelhança da estratégia que foi lançada no Reino Unido em 2017 para melhoria da saúde mental e bem-estar das forças Armadas (UK Ministry of Defence, 2017), sugere-se que o Ministério da Defesa de Portugal ou a própria FA faça a sua própria estratégia fazendo da mesma forma uma pesquisa geral e implementação de medidas de deteção, tratamento e promoção de saúde mental e bem-estar nas forças armadas portuguesas ou na FA.

V. Como última sugestão apresenta-se o maior apoio às famílias por parte da FA visto que o conflito entre o trabalho e a família se apresenta como uma grande causa de mal-estar entre os militares (Bowles et al., 2017). Iniciativas como apoio à estabilidade financeira, promoção de um bem-estar às famílias e de eventos entre trabalho e família, apoio ao conflito familiar, seminários promotores de amizades fora da organização, chefias preocupadas com o bem-estar familiar dos militares, ente outros.

A maior contribuição deste estudo está relacionada com o a forma ambiciosa como foram exploradas as relações entre os construtos de bem-estar, autenticidade e personalidade, tendo estas diversas dimensões associadas eles mesmos. Além disso a aplicação deste estudo numa organização das forças armadas acrescenta o seu carater inovador, sendo uma área ainda menos abordada na comunidade científica. De uma forma geral, todos os resultados se apresentaram de forma coerente com a literatura, tendo tanto a personalidade como a autenticidade influência no bem-estar dos militares.

A autenticidade é um construto ainda pouco abordado em comportamento organizacional, como analisado este tem um grande impacto nas emoções e realização dos indivíduos. Os resultados positivos obtidos nesta investigação mostram a validade e associação desta variável com a personalidade e o bem-estar pelo que se promove seu estudo em futuros projetos. Já a personalidade já é um construto mais analisado no passado, relacionando-o com o bem-estar. Contudo o autor da presente investigação não encontrou nenhum estudo que

realizasse a relação entre a personalidade e o bem-estar, sendo esta mediada pela autenticidade. Tal mediação também obteve resultados bastante positivos pelo que se abre mais uma porta a futuras investigações: a influência da autenticidade em mais relações entre variáveis em contexto micro e macro organizacionais.

Além disso, o presente estudo pretendia fazer uma avaliação global da FA pelo que a amostra deveria compreender elementos de todos os postos, idades e especialidades da organização, sendo o mais heterogénea possível. No processo de envio de questionário pelos canais institucionais da organização, este não se fez chegar à categoria de oficiais generais, pelo que não foi recebida nenhuma resposta desta categoria. Esta é sem dúvida uma grande limitação desta investigação, pois os oficiais generais representam os postos mais altos da FA e, portanto, caracterizam a sua liderança e chefia em posições mais estratégicas. O não englobamento destes militares faz com que o presente estudo não represente uma peça tão específica e importante da organização. Embora se tenha recebido um elevado número de respostas válidas (n=628), mais de 10% do valor da nossa população (Lindley, 1997), ao verificarmos alguns grupos de militares, verificamos que o seu número de elementos é bastante reduzido, o que diminuiu a capacidade de extrapolar e fortalecer resultados. Por fim, visto que os questionários foram respondidos pelos próprios militares existe a possibilidade de encontrarmos nas respostas um enviesamento por diversos fatores tal como sugerido por (Almiro, 2017).

Este estudo abre portas para diversas futuras pesquisas. Sugere-se que se realize a análise semelhante dos três construtos nos restantes ramos das FFAA para comparação de resultados e incentivo da pesquisa no âmbito da saúde mental e bem-estar a nível militar, onde os seus efeitos são fulcrais e necessários dada a sua natureza stressante (Harms et al., 2013). Sugere-se também a adaptação dos construtos utilizados unidimensionalmente de forma a tornar mais prática a relação entre construtos. Além disso seria bastante relevante a prática de um estudo longitudinal que verificasse as alterações nos três construtos mediante o ingresso, adaptação e permanência nas FFAA. Por último sugere-se a realização de estudos que relacionem outras variáveis com as aqui utilizadas, de forma a complementar a presente investigação.

Referências bibliográficas

Almiro, P. A. (2017, September 1). Uma nota sobre a desejabilidade social e o enviesamento de respostas. Avaliacao Psicologica, 16(3). https://doi.org/10.15689/ap.2017.1603.ed

American Psychological Association. (n.d.). APA Dictionary of Psychology. Retrieved February 21, 2023, from https://dictionary.apa.org

Anglim, J., Horwood, S., Smillie, L. D., Marrero, R. J., & Wood, J. K. (2020). Predicting Psychological and Subjective Well-Being From Personality: A Meta-Analysis. Psychological Bulletin. https://doi.org/10.1037/bul0000226

Angner, E. (2010). Subjective well-being. Journal of Socio-Economics, 39(3), 361–368. https://doi.org/10.1016/j.socec.2009.12.001

Ariza-Montes, A., Giorgi, G., Leal-Rodríguez, A., & Ramírez-Sobrino, J. (2017). Authenticity and subjective wellbeing within the context of a religious organization. Frontiers in Psychology, 8(JUL). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01228

Balbino, I. F. (2015). Autenticidade e Bem-Estar: Vivência e Precepção. Universidade Autónoma de Lisboa.

Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The Moderator-Mediator Variable Distinction in Social Psychological Research: Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations. Journal of Personality and Social Psychology, 51(6), 1173–1182.

Bowles, S. V., Bartone, P. T., Ross, D., Berman, M., Rabinowitz, Y., Hawley, S., Zona, D. M., Talbot, M., & Bates, M. J. (2017). Well-being in the military. In Handbook of Military Psychology: Clinical and Organizational Practice (pp. 213–238). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66192-6_14

Bugental, J. F. (1965). The existential crisis in intensive psychotherapy. Psychotherapy: Theory, Research & Practice, 2(1), 16–20. https://doi.org/10.1037/h0088602

Burger, J. M. (2008). Personality (7th ed.). Thomson/Wadsworth.

Costa, P. T., & Mccrae, R. R. (1980). Influence of Extraversion and Neuroticism on Subjective Well-Being: Happy and Unhappy People. Journal of Personality and Social Psychology, 38(4), 668–678.

Danna, K., & Griffin, R. W. (1999). Health and well-being in the workplace: A review and synthesis of the literature. Journal of Management, 25(3), 357–384. https://doi.org/10.1177/014920639902500305

Deneve, K. M., & Copper, H. (1998). The Happy Personality: A Meta-Analysis of 137 Personality Traits and Subjective Well-Being. In Psychological Bulletin (Vol. 124, Issue 2).

Devesa, L. M. (2016). A importância da comunicação no contexto organizacional. Instituto Politécnico de Setúbal.

Diener, E. (1984). Subjective well-being. Psychological Bulletin, 95(3), 542–575. https://doi.org/10.1037/0033-2909.95.3.542

Diener, E., & Chan, M. Y. (2011). Happy People Live Longer: Subjective Well-Being Contributes to Health and Longevity. Applied Psychology: Health and Well-Being, 3(1), 1–43. https://doi.org/10.1111/j.1758-0854.2010.01045.x

Ferrara, A. (1998). Reflective Authenticity: Rethinking the Project of Modernity. Rouledge.

Fleeson, W., & Wilt, J. (2010). The relevance of big five trait content in behavior to subjective authenticity: Do High levels of within-person behavioral variability undermine or enable authenticity achievement? Journal of Personality, 78(4), 1353–1382. https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.2010.00653.x

Goffman, E. (1974). Stigma Notes on the management of spoiled identity. In Jason Aronson, New York, N.Y. (4th ed.). Penguin. https://doi.org/10.2307/2575995

Gonçalves, S. P. (2013). Stress e Bem-Estar no Trabalho. In Sociedade Portuguesa de Medicina do Trabalho.

Grant, S., Langan-Fox, J., & Anglim, J. (2009). The big five traits as predictors of subjective and psychological well-being. Psychological Reports, 105(1), 205–231. https://doi.org/10.2466/PR0.105.1.205-231

Hair Jr, J. F., Hult, · G. Tomas M., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Danks, N. P., & Ray, S. (2021). Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) Using R. Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7

Harms, P. D., Krasikova, D. V., Vanhove, A. J., Herian, M. N., & Lester, P. B. (2013). Stress and emotional well-being in military organizations. Research in Occupational Stress and Well Being, 11, 103–132. https://doi.org/10.1108/S1479-3555(2013)0000011008

Harter, S. (2002). Handbook of Positive Psychology. In C. R. Snyder & S. J. Lopez (Eds.), Handbook of Positive Psychology. Oxford University Press.

Hayes, A. F. (2022). Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis (T. D. Little, Ed.; 3rd ed.). Guilford Press. www.guilford.com/MSS

Higgins, E. T. (1987). Self-Discrepancy: A Theory Relating Self and Affect. Psychological Review, 94(3), 319–340. https://pdfs.semanticscholar.org/a59e/1e54374a90b854e0d1d443168325a26bef48.pdf

Instituto Nacional de Estatística. (2022). PorData. Duração Média Semanal Do Trabalho Efectivo Dos Trabalhadores Por Conta de Outrem: Total e Por Sector de Actividade Económica. https://www.pordata.pt/portugal/duracao+media+semanal+do+trabalho+efetivo+dos+trabalhadores+do+sexo+masculino+por+conta+de+outrem+total+e+por+setor+de+atividade+economica-820

International Labour Organization. (n.d.). Workplace well-being. Retrieved January 30, 2023, from https://www.ilo.org/safework/areasofwork/workplace-health-promotion-and-well-being/WCMS_118396/lang--en/index.htm

Jackson, J. J., Thoemmes, F., Jonkmann, K., Lüdtke, O., & Trautwein, U. (2012). Military training and personality trait development: Does the military make the man, or does the man make the military? Psychological Science, 23(3), 270–277. https://doi.org/10.1177/0956797611423545

Judge, T. A., & Locke, E. A. (1993). Effect of Dysfunctional Thought Processes on Subjective Well-Being and Job Satisfaction. In Journal of Applied Psychology (Vol. 78, Issue 3).

Kazdin, A. E., Allport, F. H., & Willard, G. (2000). Encyclopedia of Psychology: 8 Volume Set Main Topics.

Kraiss, J., Redelinghuys, K., & Weiss, L. A. (2022). The effects of psychological interventions on well-being measured with the Mental Health Continuum: a meta-analysis. Journal of Happiness Studies, 23(7), 3655–3689. https://doi.org/10.1007/s10902-022-00545-y

Librán, C. (2006). Personality Dimensions and Subjective Well-Being. The Spanish Journal of Psychology, 9(1), 38–44.

Lindley, D. V. (1997). The choice of sample size. The Statistician, 46(2), 129–138.

Lucas, R. E., & Diener, E. (2009). Personality and SubjectiveWell-Being. In E. Diener (Ed.), The Science of Well-Being: The Collected Works of Ed Diener,Social Indicators Research Series (Vol. 37). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2350-6

Maltby, J., Wood, A. M., Day, L., & Pinto, D. (2012). The position of authenticity within extant models of personality. Personality and Individual Differences, 52(3), 269–273. https://doi.org/10.1016/j.paid.2011.10.014

Maslow, A. H. (Abraham H. (1962). Toward a psychology of being.

Mccrae, R. R., & Costa, P. T. (1987). Validation of the Five-Factor Model of Personality Across Instruments and Observers. Journal of Personality and Social Psychology, 52(1), 81–90.

McDaid, D., Curran, C., & Knapp, M. (2005). Promoting mental well-being in the workplace: A European policy perspective. International Review of Psychiatry, 17(5), 365–373. https://doi.org/10.1080/09540260500238397

Ménard, J., & Brunet, L. (2011). Authenticity and well-being in the workplace: A mediation model. Journal of Managerial Psychology, 26(4), 331–346. https://doi.org/10.1108/02683941111124854

Pais-Ribeiro, J., & Bertoquini, V. (2006). Estudo de formas muito reduzidas do Modelo dos Cinco Factores da Personalidade [Faculdade de Psicologia e de Ciências da Educação]. https://www.researchgate.net/publication/310458188

Paschoal, T., & Tamayo, A. (2008). Construção e Validação da Escala de Bem-Estar no Trabalho. Avaliação Psicológica, 11–22.

Polybius. (1962). The Histories of Polybius (Vol. 23). Indiana University Press.

Rosenberg, M. (1979). Conceiving the Self. Basic Books.

Ryff, C. D. (1989). Happiness Is Everything, or Is It? Explorations on the Meaning of Psychological Well-Being. Journal of Personality and Social Psychology, 57(6), 1069–1081.

Ryff, C. D., & Keyes, C. L. M. (1995). The Structure of Psychological Well-Being Revisited. Journal of Personality and Social Psychology, 69(4), 719–727. https://doi.org/10.1037/0022-3514.69.4.719

Sadler, M. E., Miller, C. J., Christensen, K., & McGue, M. (2011). Subjective wellbeing and longevity: A co-twin control study. Twin Research and Human Genetics, 14(3), 249–256. https://doi.org/10.1375/twin.14.3.249

Schmutte, P. S., & Ryff, C. D. (1997). Personality and Well-Being: Reexamining Methods and Meanings.

Shahzad, K., Raja, U., & Hashmi, S. D. (2021). Impact of Big Five personality traits on authentic leadership. Leadership and Organization Development Journal, 42(2), 208–218. https://doi.org/10.1108/LODJ-05-2019-0202

Sheldon, K. M., Ryan, R. M., Rawsthorne, L. J., & Ilardi, B. (1997). Trait Self and True Self: Cross-Role Variation in the Big-Five Personality Traits and Its Relations With Psychological Authenticity and Subjective Well-Being. Journal of Personality and Social Psychology, 73(6), 1380–1393.

Sutton, A. (2020). Living the good life: A meta-analysis of authenticity, well-being and engagement. Personality and Individual Differences, 153, 109645. https://doi.org/10.1016/j.paid.2019.109645

Tawfik, D. S., Profit, J., Webber, S., & Shanafelt, T. D. (2019, March 15). Organizational Factors Affecting Physician Well-Being. Current Treatment Options in Pediatrics, 5(1), 11–25. https://doi.org/10.1007/s40746-019-00147-6

Tov, W., & Diener, E. (2013). Culture and Subjective Well-Being. In Culture and Well-Being: The Collected Works of Ed Diener,SocialIndicators Research Series (Vol. 38, pp. 9–41). Springer Science Buisness Media. https://doi.org/10.2139/ssrn.2199219

UK Ministry of Defence. (2017, July 19). MOD launches Defence People Mental Health and Wellbeing Strategy. https://www.gov.uk/government/news/mod-launches-defence-people-mental-health-and-wellbeing-strategy

van den Bosch, R., & Taris, T. W. (2014). Authenticity at Work: Development and Validation of an Individual Authenticity Measure at Work. Journal of Happiness Studies, 15(1), 1–18. https://doi.org/10.1007/s10902-013-9413-3

Vannini, P., & Franzese, A. (2008). The Authenticity of Self: Conceptualization, Personal Experience, and Practice. Sociology Compass, 2(5), 1621–1637. https://doi.org/10.1111/j.1751-9020.2008.00151.x

Warr, P. (1999). Well-being and the Workplace. In Well-Being: The Foundations of Hedonic Psychology (pp. 392–412). Russell Sage Foundation. https://www.researchgate.net/publication/294721247

Wood, A. M., Linley, P. A., Maltby, J., Baliousis, M., & Joseph, S. (2008). The Authentic Personality: A Theoretical and Empirical Conceptualization and the Development of the Authenticity Scale. Journal of Counseling Psychology, 55(3), 385–399. https://doi.org/10.1037/0022-0167.55.3.385

World Health Organization. (2022, June 8). Mental disorders. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders

Wright, T. a, & Walton, a P. (2003). Affect, psychological well-being and creativity: Results of a field study. Journal of Business & Management, 9(1), 21–32.

Stabilization of Compressed Earth Blocks Through the Incorporation of the Cementitious Fraction Recovered from Concrete Residues – Durability

Author: TEN/ENGAED José Frederico Teodoro Rodrigues
Master of Science Degree in Military and Aeronautical Sciences
Air Force Academy, Sintra

Supervisor: José Alexandre De Brito Aleixo Bogas
Assistant Professor, Instituto Superior Técnico (IST) - University of Lisbon, Portugal

Abstract: Earth construction, more specifically compressed earth blocks (CEB), has reappeared in recent years in the search of constructive solutions that are more eco-friendly and sustainable. However, one of the big disadvantages of earth construction is its reduced durability when subject to water, making it necessary to chemically stabilize it. Portland cement is effective as a CEB stabilizer, although its high environmental impact makes the look for alternatives a priority. Therefore, in the present work, the use of recycled cement (CR) will be explored as a way to stabilize CEB, with a big focus on their behaviour in terms of water durability. An experimental campaign was implemented with the objective of characterizing stabilized CEB of various compositions. As such, the selection and characterization of the soil and construction debris and waste (CDW) that will be incorporated in the blocks was completed. Then, the RC was produced, through milling and thermal activation of cement and concrete debris. The RC was also characterized. With these materials, blocks were produced with varying types of cement (PC42.5, PC32.5, RC from cement, RC from concrete), different percentage of binder (0, 4 and 8%), of RC-PC replacement (0, 20, 50 and 100%), of CDW (0, 15 and 25%) and water content. These blocks were, then, tested in terms of fresh density and after 28 days, mechanical strength by compression, water absorption by immersion, capillarity and at low pressure, erosion and accelerated erosion, vapour permeability and drying. The test results were compared with each other, with unstabilized blocks, and with previous works. The stabilized CEB showed improved properties, especially in reducing the water degradation. They also presented bigger mechanical resistances, less porosity, bigger densities and smaller absorptions. Binder content, w/b ratio and the compaction method all proved to influence the final characteristics of the block. CDW incorporation, up to 25%, produced slightly better results of compaction and compression strength, demonstrating that the use of this material is viable, improving the sustainability nature of this technique. It is concluded that CEB stabilization is fundamental, with RC being a viable alternative to PC.

Keywords: Compressed earth block; Rrecycled cement; Sustainability; Durability; Water resistance.

1. Introduction

Though earth construction is a technique that has been used for thousands of years, all throughout the world, it has in recent times been replaced by modern materials, such as concrete (Hall et al. 2012). However, this material has a major environmental impact, causing the construction industry to be responsible for around a third of total CO_2 emissions, 60% of natural resource consumption, and producer of 30% of worldwide waste, a third of which is concrete debris (Kamali et al. 2019).

Because of this, it is important to find ways to reduce this impact, namely through the use of new materials, that have a smaller carbon footprint, but also ones that can reuse and recycle construction debris and waste (CDW), promoting a circular economy and industry and sustainability. Earth construction, more specifically compressed earth blocks (CEB), encompasses these ideals. However, there are some properties of this material that may make it undesirable, such as little compressive strength but, most of all, its susceptibility to water contact and erosion. Therefore, forms of stabilization are necessary to improve these characteristics.

Mechanical stabilization is very common, but it is the chemical one that produces the most improvements. Portland cement (PC) is the most common binder to be used for this purpose (Rigassi, 1985; Uzoegbo, 2019. However, its use goes against the low impact philosophy of CEB discussed earlier. Due to this, the use of recycled cement (CR) has been studied as an alternative, ensuring the control of emissions, but also the reduction of landfill waste, by recycling concrete debris (Sousa et al. 2021; Bogas et al., 2022a; Real et al. 2022).

The present study's objective is to evaluate the influence, on mechanical, but mostly durability properties, of stabilizing CEB with different types of cement, of different binder contents, of the incorporation of CDW in the CEB composition and of varying water content. CEB is considered the technological evolution of both rammed earth and regular adobe, combining elements of both, the most important of which is the compaction (mechanical stabilization), which can be made with manual or, as in the case of this work, hydraulic presses. On the other hand, the chemical stabilization of CEB using cement, tends to increase internal cohesion through the process of hydration and the production of new compounds that combined with the different soil fractions, interlock through the porous surfaces increasing binding forces between both materials (Silva, 2015). This stabilization, using RC, is the main focus of the present work. Therefore, an experimental campaign was developed in order to choose and characterize the components, produce the CEB of various compositions, characterize them in terms of strength, absorption, erosion, drying and permeability. The results of the laboratory tests were interpreted and compared with literature and previous works, leading to the conclusions presented in the final section.

2. Experimental Campaign

2.1 Soil and CDW Characterization

Soil is a highly variable material in terms of grain size, physical properties and composition, especially mineralogical composition. Being the main component of CEBs, it's properties strongly influence the characteristics of the blocks it composes in terms of mechanical strength and durability. Therefore, it is relevant to define the criteria that set the acceptable values and limits for each property to help recognize if the tested soil sample is fit for the production of CSEB. There were 2 soils used in this work: FAP, the main soil, and TV, a soil mostly composed of clay, used for correcting the FAP soil. The CDW was also tested. These were characterized in terms of: grain size and clay content, mineralogic composition, organic matter, Attenberg limits, optimum moisture content, density and water absorption, and CDW composition.

The fewer the voids, the closer the particles are, leading to more contact and bigger friction between particles and, therefore, increased mechanical strength. The reduction of voids also leads to more durability, since water has a more difficult path of entry. With this in mind, the minimization of the volume of voids is crucial to the block quality, and it the basis of the parameters chosen for most of the tests.

In terms of grain size analysis, the objective is to maximize the arrangement between particles, using a soil with an extended granulometric curve, as suggested by Uzoegbo (2019) and XP P13-901 (2022) (Figure 1).

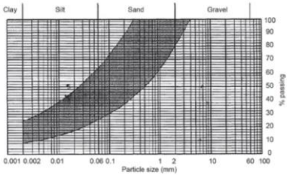


Figure 1: Particle size grading for the production of stabilized CEB

The Attenberg limits allow the distinction of the behavior of a given soil when together with water, determined by its consistency (liquidity limit, plasticity limit, shrinkage limit and plasticity index). It is also important to ensure an admissible range of clay content, especially in the non-stabilised CEB, in order to ensure good cohesion, and good bonding between cement and soil, in stabilized soils (Uzoegbo, 2019). It is also important to determine the optimum water content parameter, which will show the most effective water percentage in the mixes, maximizing the blocks' compactness. In Table 1 the main guide criteria for soil selection are summarized.

Table 1: Overview of criteria for CEB production

For stabilized earth	% Clay	% Clay+%Silt	LL (%)	IP (%)
	5-20	10-35	25 - 40	2 - 20
Authors	(Malkanthi et al., 2021)	(Houben & Guillaud, 2008)	(Silva, 2015)	

For soil characterization, the following laboratory tests were performed: particle size distribution analysis (LNEC E 239 - 1970); density (NP-83: 1965 and EN 1097-7: 2008; water absorption (NP EN 1097-6: 2012**);** consistency limits, or Attenberg limits (NP-143:1969); compaction test, or Proctor test (ASTM D698: 2000); organic matter (WD-ARS 1333: 2018); clay fraction determination (3rd party test); mineralogic composition (DRX test); CDW composition (NP EN 933-11: 2011). The soil FAP had been pre-selected, based on primary tests conducted by the owner of the soil, since it was not native to the location of production of the CEB. The TV soil was selected to correct the mixtures in terms of clay. The native soil was used in previous studies of the same project, and did not present properties as good as FAP soil did. In terms of difficulty of pulverization, measured subjectively, FAP soil presented low difficulty of treatment, low clay content (10.70%) and low clay+silt content (2.30%). Regarding the consistency limits, the selected soil presented values (LL=24% and IP=6.0%) slightly lower than those suggested by other authors, as in WD-ARS 1333: 2018 (LL=25%). However, the IP is within the limit indicated in Table 1, between 2 and 20%. For TOA, the selected soil presented reduced water demand (12.80%), organic material percentage of 0.8%, density of 2633 kg/m^3 and absorption of 1.4%.

The TV soil presented high clay content (42.2%), Attenberg limits equal to LL=47.0% and IP=21.0%, organic material percentage of 1.5%, density of 2630 kg/m^3 and absorption of around 1%.

In terms of mineralogic composition, both soils presented tectosilicates and phyllosilicates as the majority. The clays were considered non expansive, which is ideal for CEB.

The granulometric curves of FAP soil and CDW were very similar. The latter showed a density of around 2400 kg/m^3, and absorption of 4.3%. CDW was consisted of mostly concrete and stone debris (45.3% and 27.9%).

2.2 Production and characterization of Recycled Cement

The RC and its effect on CEB are the main focuses of this dissertation. The production of RC comprehended three stages: production of the original cement and concrete pastes and blocks, crushing and grinding of paste residue, and thermal activation, the final process of producing RC. This production followed the methodology described in previous works carried out in Instituto Superior Técnico (Leal, 2021; Real et al., 2020). The original pastes were produced with CEM I 42.5 R and water/binder (w/b) equal to 0.55, similar to real concrete elements. The paste was mixed using a vertical mixer and poured into cubic molds. The blocks were left to cure for at least 90 days, after which they were crushed and grinded into particles below 10mm of dimension. Afterwards, the material was dried in an oven at constant temperature and then processed in a ball mill present in the GEOLAB at IST, until below 2mm of dimension. The concrete pastes were subjected to additional steps of separation (sieving and magnetic) in order to isolate the cement portion of the residue (Hu, 2019; Bogas et al. 2022). Finally, the pastes were subjected to thermal activation, on a rotary kiln, which returned the ability to develop hydration to a certain extent to the material (Shui et al., 2009). The kiln temperature curve was as follows: heating ramp at a rate of 10°C/min up to 150°C, where it remained for 1h, second heating ramp at a rate of 10ºC/min until the plateau of 650ºC, where it remained for 3 hours. Then, the paste was left to cool down inside the kiln until room temperature. After the thermal activation, the material was sealed in double plastic bags and kept in closed barrels to avoid the occurrence of carbonatation and/or hydration of the recycled cement.

Before the final product could be incorporated into earth mixtures, it was important to determine its properties through laboratory tests. As such, the recycled cement paste's (CRP) granulometric curve was obtained through laser scanning, along with its density (3000 kg/m^3) (EN 1015-6:1998), compressive strength (23.4MPa) (EN 1015-:1998), ideal w/b ratio (0.74), setting time (170/460min) (NP EN 196-3: 1990), surface area, and other accessory characteristics. A thermogravimetric test was also conducted, that allowed to measure the degree of hydration of the RC before thermal activation, and also the degree of hydration and carbonatation of the RC at the time of its utilization. Additionally, the cement recycled from concrete debris (CRC) was subjected to thermogravimetric tests to different ranges of particle dimension in its composition, in order to determine the range where cement is most present (150-500 μm) and the percentage of it (67.2%). The CRC density was calculated as 2885 kg/m^3.

It should be highlighted that the RC has a higher water demand than CP, mainly due to its porous nature and high surface area, about 5x higher than that of CP (Bogas et al., 2022b; Carriço et al., 2020). The CaO_3 percentages (17.9%) were found to be higher when compared with PC.

2.3 Preliminary study

Before starting the production of the actual blocks that were to be tested, a set of preliminary compositions was produced, in order to confirm the results that came from the characterization tests, but also the incorporation of TV and CDW, and the ideal water content of the mix, depending on the type and quantity of binder used in stabilization. These compositions also took into account optimization to the Fuller reference curve, in order to achieve maximum compaction. The blocks were characterized or tested in terms of density, compressive strength and estimated porosity. Proctor tests were also conducted on these mixtures, in order to determine each ideal water content. The results of this study led to the definition of the compositions adopted in the final mixtures of the CEB.

2.4 Production and characterization of CEB

About 150 blocks were produced, with dimensions 295x140x90 mm^3, for which about 1.4m^3 of soil was used, 40kg of PC, 20 kg of CRP and 3kg of CRC. The PC consisted of CEM I/42,5 R and CEM II/B-L 32,5, the latter of which was used in order to produce a cheaper and less impactful composition. The blocks were produced in a hydraulic press, guaranteeing a small variation between blocks of the same composition, and bigger compacting force (5-6MPa). In Table 2 is a summary of the compositions of the blocks produced.

Table 2: Composition of CEB and estimated total porosity, PT

	Binder (%)	Water (%)	CDW %)	TV(%)	RC (%)	P_T (%)
CEM8	8	9	25	11	0	26.0
CEM8TH	8	12	25	11	0	28.1
CME8CDW0	8	9	0	11	0	26.4
CEM8CDW15	8	9	15 (S)	11	0	26.4
CEM8CDW25	8	9	25 (S)	11	0	25.8
CEM4	4	9	25	14	0	26.2
32.5CEM8	8	9	25	11	0	26.0
CRP8	8	12	25	11	100	29.8
CRP4	4	10	25	14	100	28.7
CRP20CEM80	8	9	25	11	20	26.6
CRP50CEM50	8	10	25	11	50	28.2
CRC20CEM80	8.8	9	25	11	20	27.0
CRC50CEM50	10	9	25	11	50	27.0
UCEB	0	9	25	18	0	26.2

(S) – Sieved

The CEB were characterized according to the following laboratory tests: Density (NP EN 772-13: 2002); compressive strength (EN 772-1: 2000 and NBR 8492: 1984); erosion (drip test) (NZS 4298 :1998); accelerated erosion (spray test) (NZS 4298: 1998); absorption by immersion (LNEC E 394: 1993 and NBR 8492: 1984), by capillarity (NTC 5324: 2004 and NP EN 772-11: 2002) and low pressure (Karsten) (RILEM Nº 11.4: 1980 and EN 16302: 2013); drying (EN 16322: 2013); and steam permeability (ASTM E96: 2000 and EN 1015-19: 1998).

The density was measured both in the fresh state, immediately after production of the blocks, and in the hardened state, at 28 days of age. The density in the fresh state is a good indicator of the degree of compaction of the blocks, since it is strongly influenced by the compressive force exerted during pressing. All the other tests were carried out after at least 28

days of curing. The test conditions were either after remaining in laboratory environment, after drying the blocks or after water saturation of these.

The density was calculated in terms of the measured mass and volume of the block. The compressive strength test was carried out in half blocks, in laboratory curing conditions, but also with saturated blocks (sat) and as unconfined state, through a factor of 0.58 (un). In the waster absorption by immersion test, the blocks were left in water until reaching constant mass, with measurements at 24h, 48h and end of test. The unstabilized earth blocks proved impossible to test in this characteristic, since they quickly disintegrate when placed in water. The same was verified for most other durability tests, which include some form of water contact. The absorption by capillarity test was conducted on blocks placed both vertically and horizontally. Due to fast water absorption in the Karsten test, measurements were taken in much shorter time intervals than recommended by the standard. In the drip test, the erosion was too weak to have significant and comparable effects on stabilized blocks. Due to the blocks showing very little degradation, the water pressure in the spray test was increased fivefold for an additional hour, after the standard test was completed. The vapour permeability was measured with the use of $CaCl_2$, in order to promote vapour transmission through the material. The drying test was conducted in and environment of around 75 relative humidity and 22ºC.

3. Analysis of Results

The purpose of this chapter is to present and discuss the results obtained from the laboratory tests described in chapter 2.4. Table 3 summarizes the average values obtained for each of the properties evaluated, except Drip test.

Table 3: Main results obtained from the tests described in 2.5

Mixture	**Density$_f$** (kg/m^3)	**Density$_{28d}$** (kg/m^3)	**$f_{c,28d,}$ (MPa)**	**$f_{c,sat,28d}$ (MPa)**	**$f_{c,un,28d}$ (MPa)**	**$abs_{i,v,t}$ (%)**	**$C_{abs,10min-6h}$ (x10^{-2} g/cm^2.min$^{0.5}$)**	**$C_{abs,5m}$ (kg/m^2 .s$^{0.5}$)**	**DI**	**$PH_{250\ kPa}$ (mm)**	**W_{vp} (x10^{-11} kg/s.m.Pa)**
CEM8-V	2155	2018	13.6	6.5	7.9	21.6	5.30	0.154	0.706	26	1.16
CEM8TH-V	2151	1986	12.6	5.6	7.3	24.7	6.47	0.253	0.679	66	1.71
CME8CDW0	2169	2082	13.6	-	7.9	18.8	5.60	0.236	0.679	28	1.39
CEM8CDW15	2153	2043	11.9	-	6.9	21.2	6.01	0.236	0.713	32	1.27
CEM8CDW25	2159	2058	14.1	-	8.2	22.0	5.37	0.123	0.664	21	1.17
CEM4	2168	2012	9.4	-	5.5	21.7	8.05	0.626	0.540	35	1.93
32.5CEM8	2157	2038	11.0	-	6.4	22.4	5.51	-	0.639	37	1.35
CRP8-V	2097	1978	9.8	4.8	5.7	25.1	9.34	0.329	0.679	31	1.62
CRP4	2112	1961	6.0	-	3.5	23.3	11.93	0.443	0.545	90	1.95
CRP20CEM80	2137	1998	12.5	6.2	7.2	21.3	5.35	0.288	0.668	21	1.27
CRP50CEM50	2107	1960	10.9	5.3	6.3	21.2	6.18	0.366	0.637	28	1.23
CRC20CEM80	2122	2018	12.5	6.1	7.2	22.0	5.25	0.310	0.618	28	-
CRC50CEM50	2118	2012	11.1	5.5	6.4	22.6	6.05	0.281	0.583	36	-
UCEB	2188	2001	3.6	-	2.1	-	-	-	-	-	2.82
CEM8-H	2155	2018	13.6	6.5	7.9	21.6	4.36	0.154	0.644	26	1.16
CEMTH-H	2151	1986	12.6	5.6	7.3	24.7	4.72	0.253	0.577	66	1.71
CRP8-H	2097	1978	9.8	4.8	5.7	25.1	8.01	0.236	0.586	31	1.62

DI – Drying Index; $abs_{i,v,t}$ – total absorption by volume; C_{abs} – absorption coefficient; PH - Water penetration; W_{vp} -Vapour permeability.

3.1 Density and porosity

Based on CEB composition, on each component's density and fresh density, it is possible to estimate the voids in the CEB, along with the total porosity, whose value is present in Table 3. The fresh density obtained in this work varied between 2097 and 2188 kg/m^3, which is in line with the values suggested by Rigassi (1985) and are slightly higher than the values reported by Lopes (2021), Azevedo (2021) and Silva (2015), which were all under 2100 kg/m^3. This is attributed to the fact that in the present work, a hydraulic press was used, in replacement of a manual one, but also to the optimization of the mixes with the Fuller reference curve, based on the recommended CEB parameters.

The porosity percentages, in turn, varied between 25.8% and 29.8% (Table 2), depending on the composition. For the same reasons presented before, these values were inferior to the ones obtained in the referred previous works. A direct proportion between a decrease in fresh density and an increase in porosity is verifiable (Figure 2), proving a good relationship between these parameters.

However, UCEB tend to present a bigger porosity in relation to their density, when compared with SCEB. This is due to the fact that the porosity calculation considers that water will be consumed in the hydration process. The same can be seen in mixtures with different water%. CRP stabilization led to an overall reduction of fresh density (3%) and increase in porosity (14%), when compared with PC or UCEB. This is due to the fact that the CRP blocks are produced with a higher water% and w/c, due to its higher water demand (Baldusco, *et al.,* 2019; Real *et* al., 2020; Bogas et al., 2022b).

The density after 28 days of curing led to similar results, as expected. This is due to the same factors, but also the hydration degree of different cement types. The UCEB showed the biggest reduction in density over time, since the water is not retained through hydration and, therefore, evaporates. The CRP and PC showed similar variations over time, meaning that the CRP achieved a hydration degree close to the one reached by PC. The same was concluded by Real et al. (2020), Bogas et al., (2022) and Azevedo et al., (2021).

The use of reduced binder content (4%) produced results that are between UCEB and 8% stabilization, due to less water being consumed in hydration, evaporating afterwards. The same can be said for partial replacement of PC. The use of a lower class of cement had no influence on the results, as expected (32.5 vs 42.5).

Since the CDW has an inferior density and bigger porosity, the blocks in which it was incorporated also presented this property. The sieving of the CDW in order to make a better substitution of the FAP soil, also didn't produce different results, due to the fact that these two materials have a very similar granulometric curve. It is concluded that the replacement, at 25%, proved viable.

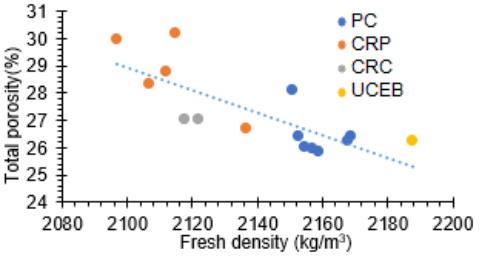


Figure 2: relation between total porosity and fresh density

3.2 Compressive strength

The compressive strength was measured after 28 days and, additionally, the CEB were characterized in saturated conditions and in unconfined conditions (Table 3).

The compressive strength of CEB comes from low porosity, the interconnection between the soil fractions and the products resulting from the cement hydration reactions (Houben & Guillaud, 2008). The geometry, water%, curing conditions of the block and press utilized all affect these results, making comparisons with other works harder.

Compressive strength values in this study, for 8% PC stabilization, are between 6.4 and 8.2MPa, depending on the type of cement and CDW content. These results are above the ones reported by Bahar et al. (2004), Elahi et al. (2020) and Namago (2006). Gonçalves (2023) achieved values of 7.9Mpa. This is associated with the Fuller curve optimization which was conducted (as well as in the present study). CEB stabilized with CRP achieved strengths between 3.5 and 5.7MPa. All of these are well above the 2,0MPa minimum recommended by HB-195 (2002), as well as the UCEB. The same standard suggests that, in saturated conditions, the strength should be superior to 1,0MPa. Since the values of 8%CRP and 8%PC are 2.8 and 3.8MPA, respectively, we can say that these recommendations are obeyed.

Binder content produced a decrease in strength, as was to be expected (Bahar et al.: 2004; Namago: 2006; Silva: 2015). The reduction was 21% and 39% for 8% and 4% of CP and CRP, respectively. Therefore, the CRP was less effective at increasing mechanical resistance. CRP was 38% weaker when using 8% binder content, and 57% when using 4%. Even with equal water%, the strength was still 27% inferior.

In Figure 3, we can see the good relation between porosity and resistance, as expected.

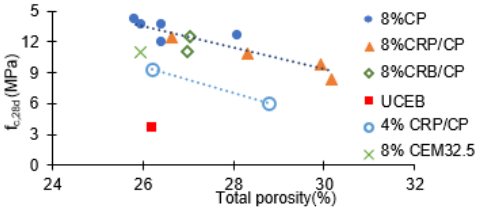


Figure 3: Compressive strength at 28 days after air curing versus total porosity.

It is important to note that the CRP and CP share the same relation. The same was observed by Gonçalves (2023). This confirms that both stabilizers have a similar binding action and the strength differences are mostly related to the compaction and porosity variations. If these could be made equal in CRP and CP, then strength would also be equal. This validates the utilization of CRP as a stabilizing agent.

The use of lower binder content (4 vs 8%) and a lower class cement (32.5) produced inferior strengths, as was to be expected. However, CRP proved more effective than 32.5 cement in stabilization. Partial substitution of PC with CR, produced strengths between those of its isolated components. It can be concluded that the separation process in CRC was effective.

CDW incorporation produced little to no variation in resistance results. This can be associated with the lower strength of these blocks compared to concrete, being that the block fails through its matrix, and not through its aggregates, causing the CDW to not be the critical factor.

It can be concluded that the present work produced better results than the previous (Azevedo: 2021), Gonçalves: 2023), and Silva: 2015), due to using a hydraulic press and improving the soil composition through Fuller optimization. CR proved to be able to ensure good results in terms of stabilization.

3.3 Absorption by immersion

This characteristic is related to the open porosity, accessible to water. It gives an indication of the degree of interconnection of the microstructure of the material and penetrability of water. As mentioned, the UCEB completely disintegrate when in contact with water. This is because only binding element (clay), loses its properties when this happens and the presence of water pressure inside the pores leads to the destruction of the matrix (Kerali, 2001; Azevedo, 2021). Therefore, it's concluded that UCEB mustn't be used in outside environments without some protection. All other blocks showed good behavior in terms of water resistance.

The results obtained in the present study are 14% and 19% inferior to Silva (2015) and Azevedo (2021), respectively, due to the inferior porosities. Kerali (2001), on the other hand, was able to report values 7% inferior. This is associated with the w/b used, which as 1.06. This shows that paste characteristics are heavily influenced by w/c ratio.

All the blocks of the present work are considered apt to be applied in humid environments, according to NBR 8492 (1984) and HB 195 (2002), since they show absorptions inferior to 20/25% after 24 hours.

Both short- and long-term absorption was superior in CEB stabilized with CR than with CP, which was expected, by taking porosity into account. For same binder content, the absorption by volume was 7% and 16% bigger for CRP stabilization for 4% and 8% binder content, respectively.

Binder content and cement class, however, were shown not to be major influencers of this type of absorption. This is because these factors influence the strength of the bonds, but not necessarily the matrix and geometry of the particles, which is the main factor concerning absorption. The increase in water% (CEM8TH), made the composition have absorptions close to the ones shown by CRP mixtures. This is due to the higher w/c and porosity of this composition.

In terms of CDW incorporation, an increase in absorption was seen, when CDW content increased, which goes against the porosity trend. This suggests that, after immersion, a bigger number of CDW pores become accessible to water, increasing absorption.

The long-term absorptions were equivalent to about 80-88% of the total porosity first estimated, meaning that most of it is accessible to water. When 0% CDW was used, this value fell to 71%. Azevedo (2021) reported values of 87-90%, associated to less compact blocks.

3.4 Absorption by capillarity

The absorption by capillarity was seen to increase in a constant fashion, the first 6 hours of the test, as expected (Bogas et al. 2015). Between 6-24 hours, that evolution was no longer linear, because of a reduction in absorption, due to the progressive saturation of the pores. On the other hand, the first 10 minutes saw a faster absorption, justified by the first mm of the block, which were submerged in 5mm of water. Therefore, the $C_{abs,10min-6h}$ and $C_{abs,10min}$ coefficients were chosen as parameters for comparison in this section.

Azevedo (2021) report values of $C_{abs,10min}$ very similar to the ones found on the present study. Silva (2015) reported values about 2 times larger than in the present study, for 8%PC. The same can be said for Bahar et al. (2004). These results are associated with a lesser compacting force, using a manual press.

In this study, $C_{abs,10min}$ varied between 7.3 and 20.9 $x10^{-2}$ $g/cm^2.min^{0.5}$. According to NETC 5324 (2004), the tested blocks can all be considered “very low absorption”.

As was observed in 3.3, the CRP stabilized CEB showed a greater final absorption, along with absorption coefficients, due to higher porosities and w/c ratios. Therefore, it can be concluded that RC promotes a higher absorption rate than PC, due to a more refined microstructure, associated with a greater amount of small dimension pores, causing the capillarity forces to be greater, promoting faster and more absorption.

There is an expected absorption rate increase when the binder content or binder class decreases, associated, in both cases, with a smaller w/clinker ratio. Partial substitution of 20% produced no variation of results. However, 50% replacement caused the absorption to increase. CDW incorporation at different percentages didn’t produce different results. The absorption rate was similar to the on at 3.3, after 72 hours. Nevertheless, the trend over time was more closely correlated with the results from the compressive strength test. Therefore, $C_{abs,10m-6h}$ is a good indicator of CEB quality variation. The blocks tested horizontally showed smaller absorption rates (by 35-40%) and coefficients (by 73-86%). This is due to the compaction direction producing anisotropic properties in the blocks. This becomes relevant when we consider that the blocks will

be placed in construction according to the direction perpendicular to compaction, but the water rises from the soil according to the opposite face.

3.5 Low pressure absorption (Karsten)

In this test, the $C_{abs,k,5min}$ coefficient was chosen to characterize the blocks, due to the fact that in the first 5 minutes, the absorption is linear in time. The test was conducted according to the direction perpendicular with compaction, in the same way that the blocks will be placed in real construction. Azevedo (2021) obtained values inferior to those found in the present work, unlike expected. This may be due to the blocks having reabsorbed some water in Azevedo (2021), when cooling after drying in oven, reducing absorption capacity. The RC stabilized CEB showed, as previously, greater absorption coefficients, and smaller test durations, for the same reasons as 3.3 and 3.4. The CDW content decrease also led to an increase in the absorption coefficient. Partial substitution of PC by RC showed trends similar to 3.4, with the 50% replacement showing the most variation.

3.6 Drying

Faster drying rates are preferable, since they guarantee that water won't remain in the material, which jeopardizes mechanical resistance (Ngoulou, 2019). In the test results, two distinct stages of dying were identified (Azil, 2023): first stage of faster drying rate (liquid water transport to the surface); and second stage, of slower drying rate (water vapor most relevant). It is also relevant to note that different compositions may absorb more water than others. Therefore, a comparison must also be made taking that into account. The $DR_{1\text{-}172h}$ (drying rate between 1 and 172 hours) was determined through a regression of the values of absorbed water. The DI (drying index) was also calculated, after 1130 hours. This value varied between 0.54 and 0.71, meaning the CEB were far from complete dry state. It is important to note that a bigger DI means a lesser loss of water, and harder drying.

As was observed in other properties, the drying rate increased based on binder content reduction, since this is related to a bigger porosity and cement matrices of larger w/c. However, contrary to what was expected, drying rate didn't increase with the replacement of PC by CR (CEM8 vs CRP8 and CEM4 vs CRP4). This may be associated with a larger refinement of the matrix of the material. The CR CEB are composed of smaller pores, in which water resides. Although medium sized pores will permit evaporation of water at relatively high relative humidities (RH), these smaller pores have a bigger influence of surface tension of water. Since this test was conducted at around 75% RH, this causes the CR to retain more water and have a more difficult drying, in the test conditions (Voight and Tomlinson, 1955).

The substitution of PC by RC didn't follow the logical trend, in the sense that a 20% substitution increased the drying rate but then decreased for higher percentages. This may be due to the fact that the negative impact of the use of 50% CR overcame the positive impact of a lesser compaction observed in these.

The increase of RCD content led to a slight reduction of drying rate (Figure 4), which is expected and in accordance with the trends of lesser total porosity and better compaction.

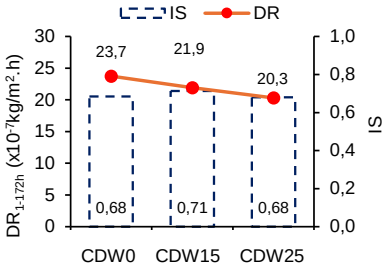


Figure 4: Drying rate and Drying index of varying CDW compositions.

3.7 Erosion (Drip test)

As is known, water is one of the biggest erosion mechanisms that deteriorate earth construction (Heathcote, 1995). As such, the blocks are characterized in terms of their resistance to erosion (rain) and accelerated erosion (heavy rain). This erosion if carried out in two ways: removing of material by impact and softening of the material in contact with water. The results of this test are shown in Table 4.

In the stabilized blocks, there was no visible erosion, regardless of binder type. The UCEB, on the other hand, showed an erosion rate of 0.23mm/min. The erosion values were larger than those observed by Silva (2015) (2 to 6 mm). This may be due to the type of soil used, since the one used in the present study has an IP above 6, while the one used by Silva (2015) has a value of 2.

The RC proved to be very effective in stabilizing the soil, since it showed erosions similar to PC. The composition of higher water% also showed good results. This is due to the very low aggression character of this test. Cid-Falceto (2012) found similar results, of little to no erosion, even with higher fall height of the droplets. According to NZS 4298 (1998), the stabilized blocks all have index 1 in terms of erosion resistance, while the UCEB has index 3, out of 5.

The only difference between blocks was the penetration of water. In this case, CRP blocks showed higher penetration, following the trend observed in absorption tests. The increase in water% in the mixture caused and increase of 33% in water penetration.

Table 4: Drip test results

Composition	Duration of test (min)	Erosion depth (mm)	Water penetration (mm)
CEM8	33	0	23.7
CEM8TH	32	0	31.5
CRP8	32	0	39.4
UCEB	32	7.4	76.8

3.8 Accelerated erosion (Spray test)

In terms of erosion resistance, NZS 4298 (1998), categorizes blocks between 5 indexes of progressively less resistance. All the stabilized blocks were found to be IE1, while the UCEB was found to have failed the test.

Even with very high erosion (250kPa), there was no significant damage to all blocks, except the UCEB. This was also found by Exelbrit (2011), who applied 4000kPa.

Only the CEB stabilized with CR showed little erosion (CRP8=1mm and CRP4=3mm). This corresponds to 1-2mm/hour. This erosion was due to higher porosity and w/c ratio, as stated in previous sections.

The UCEB were completely eroded after less than half an hour of test (207mm/hour), and at only 50kPa. This makes clear, once again, the importance of stabilizing earth construction.

Therefore, only the water penetration (PH) is viable comparing grounds for this test. In terms of PC stabilization, the values were 3 times smaller than observed by Azevedo (2021). It is expected that blocks with more porosity and absorption present larger penetrations. The relation was evident, but not strong. This may be due to the fact that, at this high pressure, the permeability of the blocks to water comes into effect. In this case, the quality of the binder is crucial to the determination of the PH (Garbozi, 1995; Halamickova et al. 1995). This was verified by the results of CEM4, CRP4 and 32.5CEM, which all showed relatively high PH. CRP4 and CEM8TH showed, by far, the biggest levels. This is due to the high porosity and w/c ratio of these compositions. The partial substitution of PC by RC produced results very close to 100% PC, due to the refinement level of the pore structure.

CDW incorporation led to results equal to CEM8, although the PH evolved in a non-linear fashion (increase at 15% but decrease at 25%), similarly to the compression strength test. It can be concluded that stabilized CBE show high water resistance, regardless of binder type. This shows that earth can be made to resist water, unlike commonly thought, even with low binder content or class.

3.9 Vapour permeability

This property is important, in the sense that a bigger permeability will mean bigger hygroscopicity, allowing the material to act as a humidity controller (Azil et al. 2023; McGregor, 2017). The vapour permeability (W_{vp}) values were found to be between 1,16-2,82x10^{-11} kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}, while the resistance to water vapor diffusion (μ) were between 7.0 and 16.9.

When using CEM32.5, Touré et al. (2017) found W_{vp} to be between 2,5-2,9x10^{-11} kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1} and μ of 7-8. McGregor et al. (2017) found similar results. These values are around two times larger than those found in the present study. This may be due to not considering the effect of water vapor surface resistance, used to correct the parameters presented above (McGregor, 2017). Gomes (2019) did not make this correction, and found results very similar to the ones found in the present study.

The CEB with less binder content showed the highest values of vapor permeability, with UCEB being the highest. Next were the CEM8TH and RCP8, associated with high porosities, which leads to bigger permeability. The use of CEM32.5, led to intermediate results, with the lower binding capacity being compensated by the reduced w/c ratio. The partial substitution of PC by RC, also led to intermediate results. The increase of CDW incorporation caused the decrease in

permeability, associated with a densification of the material matrix, causing the vapor permeability to be hindered.

4. Conclusions

This chapter summarizes the main conclusions drawn from the analysis of the results of laboratory tests.

- The CEB produced showed good compaction and high compressive strength values, superior to other authors, considering same percentage of stabilization. This was due to the use of a hydraulic semi-automatic press and the optimization of the granulometric curve of the mixes. The CEB stabilized with RC presented very good mechanical resistance, even in saturated conditions. Furthermore, the stabilized CEB showed absorption and erosion levels well within the recommended limits set by the norms.
- Absorption by immersion was shown to depend mainly on the accessible porosity of the material. Other absorptions, however, were dependent on binding matrix characteristics. Therefore, these are more adequate to determine the durability of the CEB. The drip test, in turn, was not sensitive enough to assess the durability of the blocks.
- The absorption coefficient between 10min and 6 hours proved representative of CEB behavior. The absorption rate was much slower in the compaction direction, demonstrating the anisotropic nature of CEB.
- CEB built with RC are associated with higher water%, less compactness, reduced density and larger porosity, caused by the higher water demand of it.
- These factors contributed to a reduced mechanical resistance of CEB stabilized with RC. However, a good relation between porosity and strength was found, regardless of binder type, demonstrating that CR can guarantee mechanical behavior similar to CP, if the porosity is made to be identical. The strength reduced by about 50% in saturated conditions, for all binders, showing that both have identical stabilizing capacity.
- The CEB stabilized with RC showed faster rates of capillary and low-pressure absorptions, due not only to porosity and w/c ratio, but also to a more refined cement matrix for a given porosity, associated with a bigger volume of small dimension pores.
- Stabilization hindered the drying of the CEB. However, though more porous, CR didn't cause a drying faster than PC. This is, once again, due to the microstructure of the cement matrix.
- Stabilized CEB showed little to no erosion on the drip and spray tests, showing very good behavior when in contact with water. Especially considering that the UCEB showed up to 200 times more erosion, to 5 times less pressure. The PH was shown to be associated with porosity but also with pore geometry and binder quality, confirming, once again, the matrix refinement of the CR structure.
- In terms of vapor permeability, the CR showed a bigger capacity to regulate humidity. Pore size and connectivity, associated with binder percentage and w/c ratio, were shown to be determinant of this characteristic.
- The partial substitution of PC with RC led to intermediate results, considering the binders involved. The mechanical strength was affected by this replacement, but not the absorption and vapor permeability.

- The CRC has a purity of 67%. Due to this, the binder content was adjusted to ensure full cement percentage. CRC and CRP showed similar results throughout the tests, showing that the contamination correction was efficient, and the separation process from aggregates was effective.
- The use of CEM 32.5 had little impact in compactness, though it reduced the mechanical strength and durability. Its binding effect was comparable to CEM8TH.
- The substitution of soil by CDW led to better compactness, had little effect on strength and durability of the blocks. It is, therefore, viable to incorporate this material, improving even more the sustainable nature of the CEB.

In conclusion, the results presented in this paper prove the effectiveness of CRP in stabilizing earth. This stabilization produced strengths 3 times greater than UCEB. In terms of durability, seeing as the UCEB completely disintegrate in contact with water, we can conclude that stabilization is fundamental, with RC being a viable alternative to PC.

References

Aubert, J.E.: (2019, June). Earth construction material: from past to modern buildings. *3rd International Conference on Bio-Based Building Materials* by AJCE in Belfast.

Azevedo, B (2021). Blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado. *Dissertação em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Azil, A., Touati, K., Sebaibi, n.n Guern, M., Streiff, F., Goodhew, S., Gomina, M., & Boutouil, M. (2023). Monitoring of drying kinetics evolution and hygrothermal properties of new earth-based materials using climatic chamber simulation. In *Case Studies in Construction Materials* 1*8(0), e01798-e01798.*

Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and concrete composites*, *26*(7), 811-820. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.

Baldusco, R., Nobre, T. R. S., Angulo, S. C., Quarcioni, V. A., & Cincotto, M. A. (2019). Dehydration and rehydration of blast furnace slag cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *31*(8). doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002725.

Bogas, J.A., Carriço, A., & Real, S. (2022a). Thermoactivated Recycled Cement. *Sustainability of Concrete with Synthetic and Recycled Aggregates.* doi: 10.5772/intechopen.98488.

Bogas, J. A., Carriço, A., & Real, S. (2022b*).* Durability of concrete produced with recycled cement from waste concrete*. Materials Today: Proceedings, 58,* 1149–1154*.* doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.280.

Carriço, A., Real, S., Bogas, J. A., & Pereira, M. F. C. (2020). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*, *256*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119502.

Cid-Falceto, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2012). Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests. *Construction and Building Materials*, *37*, 738-745. doi. 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.019.

Exelbirt, J. (2011). Characterizing Compressed Earth Bricks Based on Hygrothermal Aging and Wind Driven Rain Erosion. Thesis presented for the degree of Master of Science in building construction. University of Florida, Florida.

Garboczi, E. (1995). Microstructure and transport properties of concrete. In *Rilem report 12-performance criteria for concrete durability 327-327.* doi: 10.1201/9781482271522.

Gomes, M. I., Faria, P., & Gonçalves, T. D. (2019). Rammed earth walls repair by earth-based mortars: The adequacy to assess effectiveness. *Construction and Building Materials*, 205, 213-231. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.222.

Gonçalves, D. (2023). Estabilização de blocos de terra com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão – Caraterização mecânica e retração. *Dissertação em engenharia civil*. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, Lisboa.

Halamickova, P., Detwiller, R., bentz, D., & Garboczi, E. (1995). Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. In *Cem. Concr. Res. 25*. 790-802.

Hall, M. R., & Swaney, W. (2012). European modern earth construction. In *Modern Earth Buildings* (pp. 650-687). Woodhead Publishing. doi: 10.1533/9780857096166.5.650.

Houben, H., & Guillaud, H. (2008). Earth construction: a comprehensive guide. Practical Action Publishing, Warwickshire.

Hu, S. (2019). Separação de constituintes do betão visando a obtenção de cimentos reciclados. *Dissertação em engenharia civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Heathcote, K. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and building materials.* 185-189. doi: 10.1016/0950-0618(95)00035-E.

Kamali, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings*, 204. doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109479.

Kerali, A. G. (2001*).* Durability of compressed and cement-stabilised building blocks.

McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., & Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. In *Building environment 75*. 11-18. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.01.009.

Leal, D. (2021). Durabilidade de betões produzidos com cimento reciclado. *Dissertação de mestrado em engenharia civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Malkanthi, S., Wickramasinghe, W., & Perera, A. (2021). Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00717.

McGregor, F., & Fabbri, A. (2017). Impact of the determination of the sorption-desorption curves on the prediction of the hemp concrete hygrothermal behaviour. In *Constr. build. mat.157.* 108-116. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.077.

Namango, S. S. (2006). Development of cost-effective earthen building material for housing wall construction: investigations into the properties of compressed earth blocks stabilized with sisal vegetable fibres, cassava powder and cement compositions. Faculty of environmental science and process engineering of the Brandenburg technical University Cottbus, Bungoma.

Ngowi, A. (1997). Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. Construction and building materials. 1-7. doi: 10.1016/S0950-0618(97)00006-8.

Ngoulou, M., Elenga, R., Ahouet, L., Bouyila, S., & Kinda, S. (2019). Modeling the drying kinetics of eath bricks stabilized with cassava flour gel and amylopectin. In *Geomaterials.* 40-53. doi: 10.4236/gm.2019.91004.

Real, S., Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement. *Materials*, *13*(18), 3937. doi: 10.3390/ma13183937.

Real, S., Sousa, V., Meireles, I., Bogas, J. A., & Carriço, A. (2022). Life cycle assessment of thermoactivated recycled cement production. materials, 15(19), 6766. doi: 10.3390/ma15196766.

Riza, F. V., & Rahman, I. A. (2015). The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. In *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks* (pp. 379-392). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-1-78242-305-8.00017-6.

Rigassi, V. (1985). Compressed earth blocks: Manual of production. *CRAterre-EAG, GATE, 1.*

Schroeder, H. (2012). Modern earth building codes, standards and normative development. In *Modern Earth Buildings* (pp. 72-109). Woodhead Publishing. doi: 10.1533/9780857096166.1.72.

Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and building materials*, *23*(1), 531-537. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016.

Silva, M. (2015). Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios. *Dissertação em engenharia civil*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Sousa, V., Bogas, J.A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. In *Journal of Cleaner Production 306*. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127277.

Torgal, F. Pacheco, Eires, R., & Jalali, S. (2009). Construção em terra.*TecMinho*. ISBN 978-972-8692-40-7.

Touré, M., Sambou, V., Faye, M, Thiam, A., Adj, M., & Azilinon, D. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). In *Journal of building engineering, 13.* 266-271. doi. 10.1016/j.jobe.2017.08.012.

Uzoegbo, H. C. (2019). Dry-stack and compressed stabilized earth-block construction. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications,* 305–350. doi: 10.1016/B978-0-08-102704-2.00012-3.

Voigt, E., & Tomlinson, R. (1955). The determination of pore size distribution and surface area from adsorption isotherms. In *Can. J.Chem. 33.* 215-231. doi: 10.1139/v55-025.

ASTM D698 (2000) - Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using standard effort. Pennsylvania.

ASTM E96 (2000) - Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. Pennsylvania.

EN 196-3 (2016) - Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 772-1 (2000) - Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength. ECS, Brussels.

EN 933-1 (2012) - Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. ECS, Brussels.

EN 1015-19 (1998) - Methods of test for mortar for masonry - Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. ECS, Brussels.

EN 1097-7 (2008) - Tests for mechanical and physical properties of aggregates. ECS, Brussels.

EN 16302 (2013) - Conservation of cultural heritage - Test methods - Measurement of water absorption by pipe method. ECS, Brussels.

EN 16322 (2013) - Conservation of Cultural Heritage - Test methods - Determination of drying properties. ECS, Brussels.

EN ISO 14688-2 (2017) - Geotechnical investigation and testing Identification and classification of soil Part 2: Principles for a classification.

LNEC E-239 (1970) - Análise granulométrica do solo por peneiração húmida, Lisboa.

LNEC E 394 (1993) - Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica, Lisboa.

NBR 8492 (1984) - Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água de tijolos maciços de solo-cimento para alvenaria, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 10833 (1989) - Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica. ABNT, Rio de Janeiro.

NP-83 (1965) - Solos: densidade de partículas, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa.

NP-143 (1969) - Solos: determinação dos limites de consistência, IPQ, Lisboa.

NP EN 196-3 (1990) – Métodos de ensaio de cimentos. Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. IPQ, Lisboa.

NP EN 772-11 (2002) - Unidades de alvenaria - Métodos experimentais - Parte 1: Agregado e natural - Determinação de absorção. IPQ, Lisboa.

NP 932-3 (2010) - ensaios das propriedades gerais dos agregados: parte 3: método e terminologia para a descrição petrográfica simplificada. IPQ, Lisboa.

NP EN 933-11 (2011) - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados: parte 11: ensaio para classificação dos constituintes de agregados grossos reciclados. IPQ, Lisboa.

NP EN 1097 (2012) - Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. IPQ, Lisboa.

NP EN 12390-6 (2011) - Ensaios do betão endurecido: resistência à tração por compressão de provetes, IPQ, Lisboa.

NTC 5324 (2004) - Bloques de suelo cemento para muros y divisones. Definiciones. Especficaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega, ICONTEC, Bogotá.

NZS 4298 (1998) - Materials and workmanship for earth buildings, SNZ, Wellington.

HB 195 (2002) - The Australian earth building handbook. Standards Australia.

RILEM Nº11.4 (1980) – Surface Water Permeability

XP P13-901 (2022) - Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions - Specifications - Test methods - Delivery acceptance conditions. Association Française de Normalisation, Paris.

WD-ARS 1333 (2018) - Compressed stabilized earth blocks - Requirements, production and construction. African organization for Standardization, Africa.

Implementation of 5G Private Networks at Portuguese Air Force

Source: Business.IT (2020)

Author: TEN/ENGEL Ana Rita Fonseca Ramalho
Master of Science Degree in Military and Aeronautical Sciences – Electrotechnical Engineering
Air Force Academy, Sintra

Supervisor: Luís M. Correia
Instituto Superior Técnico / INESC-ID Lisbon

Co-Supervisor: TCOR/ENGEL Adalberto Santos
Portuguese Air Force, Lisbon

.

Abstract: This paper studies the implementation of 5G private networks at the Portuguese Air Force, focusing specifically on their potential applications. Private networks have been the centre of attention since 5G technology was introduced due to its capacity to provide increased connection, data security and reduced latency. The study of the 5G mobile network characteristics is developed to verify if Operators can ensure real-world use systems in restricted scenarios, such as an Airbase, the WAM System, and a Remote-Controlled UAV Squadron, to demonstrate the practical implications of this technology. The developed model considers the MEC node deployment options, Splitting Option 7.2 functionalities, and network architectures as variables to analyse the deployment performance of a 5G private network. The main purpose is to install an integrated private network whenever possible. The results show that it is impossible to ensure all services' requirements even when using the required capacity and adequate latency reduction strategies.

Keywords: 5G; Private Network; Military Communications; Critical Services; Latency; Capacity.

1. Introduction

The 5th Generation of Mobile Communication Systems (5G) represents a significant advancement in mobile network capabilities. The connectivity for consumers' smartphones, tablets, and laptops is forced to its limits concerning latency, capacity, and availability. In addition, new services, such as critical communications and industrial Internet of Things (IoT) connectivity, are being developed. This improvement is accomplished through flexible platforms that enable device connectivity, ultra-low latency, and high reliability, in which 5G targets are set with data rates up to 20 Gbps and capacity increases up to 1 000 times. Because of the new requirements and increased use cases, 5G system design and deployment differ from previous mobile network generations, driving the rise of private networks. This type of network provides a way to share data privately and independently (Holma et al., 2020).

Compared to standard 5G networks, private networks provide higher flexibility, including improved coverage options for remote applications, fewer technical challenges for large indoor spaces, and access to more shared spectrum (Eswaran & Honnavalli, 2022). Thus, companies can communicate information conveniently and securely by connecting to their members-only network, providing more access points. The number of private network deployments is increasing rapidly as a result.

Armed Forces are one of the areas interested in these new features, aspiring to achieve a sustained mode of operation by using a 5G private mobile network. The military scenarios extensively use communication technologies and highly critical services that require security, privacy, and availability. Others require on-demand and *ad hoc* connectivity, resistance to jamming, and End-to-End (E2E) encryption (Nakamura, 2020; Prados-Garzon et al., 2021).

The Portuguese Air Force, as an integral part of the national forces system, has the mission of cooperating in the military defence of the country and is responsible for carrying out air operations in defence of national space as well as missions in the public interest to meet the needs of the population (FAP, 2023). Therefore, adopting a 5G private network is an enormous potential development. Several benefits provided by this cutting-edge technology revolutionise mission-critical operations, data transmission, and communication. In this way, the implementation of private networks is based on the need to improve the existing network structure that can not respond to services with very demanding requirements.

A 5G private network can be deployed as an independent or integrated public network, depending on the spectrum, infrastructure availability, network management, and access control

level (Prakash, 2022). The Multi-Access Edge Computing (MEC) technology has been standardised to supplement cloud computing facilities by bringing computing resources closer to mobile users to fulfil critical and non-critical service requirements. It delivers 5G network coverage and connectivity, like a scaled-down version of a public mobile network, reducing latency problems.

The 5G network architecture is divided into three primary nodes: Radio Unit (RU), Distributed Unit (DU) and Centralised Unit (CU), providing scalability and flexibility that optimises the MEC node location. The node's latency and capacity result from the network contributions depending on the type of architecture chosen. These two parameters are crucial in determining the type of private network.

The paper is structured as follows: Section I presents the research topic, Section II describes the modelling approach, Section III presents the analysis of the results, and Section IV concludes by presenting the results.

2. Modelling Approach

2.1. Model Implementation

The main objective of the model is to determine the type of private network recommended for a given scenario based on a set of qualitative and quantitative parameters. The model implementation is divided into two parts. The first part estimates the maximum E2E latency and the maximum E2E distance. The program starts by calculating the link capacities, the RU node throughputs, and the respective services' required throughputs. The calculation of the maximum E2E latency considers all the contributions from both the links (air and optical) and the nodes. The maximum E2E latency is decisive when choosing the type of network and the MEC node deployment option and is influenced by the number of nodes in the study architecture. The model uses an independent RU, DU and CU node architecture. The higher the number of nodes used, the higher the propagation latency associated with the links. The maximum E2E distance allows for determining the maximum distance at which the MEC node can be installed to guarantee the requirements of the service analysed. This parameter influences the maximum E2E latency since it is only after calculating the length of the optical links that the respective propagation latency can be determined because the optical fibres are not installed in a straight line.

Regarding the second part of the model, the required E2E latency and the Uplink (UL) and Downlink (DL) RU node throughputs are used to calculate the margin values applied to each scenario, depending on the type of service (critical or non- critical). The main objective is to deploy an integrated private network whenever possible. Thus, the conditions applied to determine the type of private network differ based on this first service classification. In the case of critical services, for safety and insurance purposes, one considers a margin of 10% regarding the maximum E2E latency and a margin of 50% regarding the throughputs of the RU node. Therefore, the condition to adopt an integrated private network considers the service throughputs to be less than 50% of the UL and DL RU node throughputs and the maximum E2E latency to be less than 90% of the latency required by the service. Regarding the non-critical services, to adopt an integrated private network, the service throughputs have to be less than 70% of the UL and DL RU node throughputs and the maximum E2E latency less than 95% of the latency required by the service. The conditions implemented result from references to military operation services under daily conditions.

2.2. Latency Contributions

To analyse the characteristics required to install a private network, it is necessary to estimate the 5G network structure.

The transmission, propagation, queuing, and processing are the primary E2E latency contributions, and the respective results are obtained using the expressions from (Carvalho et al., 2021).

In this model, the propagation latency of the optical links is assumed to be 0 ms in the expressions to compute the maximum E2E latency (Carvalho et al., 2021). Therefore, the margin between the required E2E latency and the remaining latency contributions (total node latency plus the Air Link (AL) propagation latencies) is calculated to determine the network's maximum optical link length.

The total node latency is computed using the following expression:

$$\begin{aligned}\delta_{Total_node_{[ms]}} = {} & \delta_{UE_Tx_{[ms]}} + \delta_{RU_Tx_{[ms]}} + \delta_{DU_Tx_{[ms]}} \\ & + \delta_{CU_Tx_{[ms]}} + \delta_{Core_Tx_{[ms]}} + \delta_{EDC_{[ms]}} \\ & + \delta_{Core_Rx_{[ms]}} + \delta_{CU_Rx_{[ms]}} + \delta_{DU_Rx_{[ms]}} \\ & + \delta_{RU_Rx_{[ms]}} + \delta_{UE_Rx_{[ms]}}\end{aligned} \quad (1)$$

where:

- $\delta_{UE/RU/DU/CU/Core_Tx}$ – Latency on the transmission side.
- $\delta_{UE/RU/DU/CU/Core_Rx}$ – Latency on the receiver side.
- $\delta_{UE/RU/DU/CU/Core/EDC/MEC_Proc}$ – Processing latency.
- $\delta_{UE/RU/DU/CU/Core/EDC/MEC_Trans}$ – Transmission latency.
- $\delta_{RU/DU/CU_Queu}$ – Queuing latency.
- δ_{EDC} – Latency of the EDC node.
- δ_{MEC} – Latency of the MEC node

According to the architectures that consider the installation of an MEC node, the contributions of the number of nodes in the network structure vary. As an example, the total node latency when the MEC node is deployed between the RU and DU nodes is obtained by the following expression:

$$\begin{aligned}\delta_{Total_node_{[ms]}} = {} & \delta_{UE_Tx_{[ms]}} + \delta_{RU_Tx_{[ms]}} + \delta_{MEC_{[ms]}} \\ & + \delta_{RU_Rx_{[ms]}} + \delta_{UE_Rx_{[ms]}}\end{aligned} \quad (2)$$

Regarding the total propagation latency, the model considers the optical links and ALs as a contribution. The general expression is given by:

$$\begin{aligned}\delta_{Total_prop_{[ms]}} = {} & \delta_{AL_Tx_{[ms]}} + \delta_{FH_Tx_{[ms]}} + \delta_{MH_Tx_{[ms]}} \\ & + \delta_{BH_Tx_{[ms]}} + \delta_{TL_Tx_{[ms]}} + \delta_{TL_Rx_{[ms]}} \\ & + \delta_{BH_Rx_{[ms]}} + \delta_{MH_Rx_{[ms]}} + \delta_{FH_Rx_{[ms]}} + \delta_{AL_Rx_{[ms]}}\end{aligned} \quad (3)$$

where:

- δ_{Total_prop} – Total propagation latency.
- $\delta_{AL/FH/MH/BH/TL_Tx}$ – Propagation latency on the transmitter side.
- $\delta_{AL/FH/MH/BH/TL_Rx}$ – Propagation latency on the receiver side.

The maximum E2E latency computation is divided into two terms, one corresponding to the latency at the nodes and the other to the maximum propagation latency resulting from the link lengths. However, only the lengths of the Fronthaul (FH), Middlehaul (MH) and Backhaul (BH) optical links are estimated. The AL lengths were previously calculated as individual latency contributions since they depend on the distance between the User Equipment (UE) and the RU node. This distance depends on the scenario analysed.

Once the two terms are determined, the maximum E2E latency is calculated using the following expression:

$$\delta_{Max_E2E_{[ms]}} = \delta_{Total_node_{[ms]}} + \delta_{Total_prop_{[ms]}} \tag{4}$$

where:

- δ_{Max_E2E} – Maximum E2E latency.

The maximum optical link length is determined considering the latency margin without accounting for the propagation latency corresponding to the optical links. It is obtained using the required E2E latency of the service, excluding the computed total node latency and the AL propagation latency contributions. The maximum optical link length is computed using the following expression:

$$d_{Max_optical_{[km]}} = (\delta_{service_{[ms]}} - \delta_{Total_{node_{[ms]}}} - \delta_{AL_Tx_{[ms]}} - \delta_{AL_{Rx_{[ms]}}}) \frac{v_{[\frac{km}{s}]}}{1.67} \times \pi 10^{-3} \tag{5}$$

where:

- $\delta_{Max_optical}$ – Maximum optical link propagation length.
- $\delta_{service}$ – Required latency associated with the chosen service.

The 1.67 factor is used because the optical links are not installed in a straight line. The result of (5) is used to determine the maximum propagation latency computed using (6), associated with the optical links, to ensure the service's E2E latency requirement

$$\delta_{Total_prop_{[ms]}} = \delta_{Max_optical_{[ms]}} + \delta_{AL_Tx_{[ms]}} + \delta_{AL_Rx_{[ms]}} \tag{6}$$

2.3. RU Node Throughputs

The capacity offered by a 5G Frequency Division Duplexing (FDD) network depends on several factors, such as channel bandwidth, modulation scheme, Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) technology, and network load. According to 3rd Generation Partnership Project (3GPP)

TS 38.306, the capacity of the 5G FDD radio link correspondent to a single carrier is calculated using the following expression:

$$R_{FDD[Mbits/s]} = 10^{-6} v_{Layers} Q_{m[bits/symbol]} f_s R_{code_max} \left(\frac{12 \times N_{PRB[symbols]}^{B,\mu}}{T_{s\ [s]}^{\mu}} \right) (1 - O) \quad (7)$$

where:

- v_{Layers} – Number of layers
- Q_m – Average modulation order
- f_s – Scaling factor.
- R_{code_max} – Maximum coding rate.
- $N_{PRB}^{B,\mu}$ – The maximum number of physical Resource Blocks (RB) allocations in bandwidth B with numerology μ.
- T_s^{μ} – The average symbol duration in a subframe for a numerology μ.
- O – The Overhead for control channels correlated to the bandwidth required to transmit the packet.

The 5G Time Division Duplexing (FDD) mode considers the time division. It also considers the losses applied to the link due to signal attenuation, interference, and noise, which leads to an actual throughput lower than the theoretical capacity. Usually, the 5G system considers 57% of framing for DL and 43% for UL. Thus, the average throughput of the radio in 5G UL in TDD can be calculated by the following expression:

$$R_{TDD/UL[bits/s]} = R_{FDD[bits/s]} F_{UL} A_f \quad (8)$$

where:

- $R_{TDD/UL}$ – Average throughput of the radio in 5G UL in TDD.
- F_{UL} – Percentage of the slot reserved for the UL.
- A_f – Average factor that accounts for 5G system throughput losses.

By applying the same approach, the average throughput of the radio in 5G DL in TDD can be calculated using the following expression:

$$R_{TDD/UL[bits/s]} = R_{FDD[bits/s]} F_{DL} A_f \quad (9)$$

where:

- $R_{TDD/UL}$ – Average throughput of the radio in 5G UL in TDD.
- F_{DL} – Percentage of the slot reserved for the DL.

The required service throughputs in the RU node results from the sum of all the data rates of the services ensured by the respective node. The following expression is used to calculate the RU's required throughputs on both the UL and DL sides:

$$R_{u[Mbits/s]} = \sum_{1}^{Nu} R_{s[Mbits/s]} \quad (10)$$

where:

- R_u – RU node required throughput.
- N_u – Number of users connected to the RU node
- R_s – Data rate of the services offered by the RU node

2.4. Link Capacity

The interfaces between nodes are designed to specify their throughputs, and the process is developed with the functional split of network functionalities along nodes. In this paper, Splitting Option 7.2 is used for the FH link and Splitting Option 2 for the MH link. The BH link is required to transport data between network segments. It does not involve splitting options related to baseband processing because it serves different purposes in the overall network architecture.

In Splitting Option 7.2, the DU node includes the precoding (increases the data rate and reduces the error rate in the communication system) and the resource element mapper (assigns each data symbol to a specific resource element based on its modulation scheme, coding rate, and channel conditions). This results in a slightly lower FH link bitrate, a more complex DU node, and less shared processing in the CU node. It is the first considered option where the link throughput becomes variable (Larsen et al., 2018). The FH link capacity for Splitting Option 7.2 in the UL and DL is specified by:

$$R_{Op.7.2\,[Mbps]} = (2000_{[s^{-1}]}\, N_{SC} N_{SY[symbols]} N_{Q[Mbits/symbol]} N_A)\mu_S + D_{MAC_{info}[Mbits]} \quad (11)$$

where:

- $R_{Op.7.2}$ – FH link capacity for Splitting Option 7.2.
- N_{SC} – Number of subcarriers used in the system.
- N_{SY} – Number of symbols in the system.
- N_Q – Bit width.
- N_A – Number of antenna ports.
- μ_s – Subcarrier utilisation (load).
- $D_{MAC_{info}}$ – The maximum amount of data transmitted over the wireless network.

Splitting Option 2 is provided by the 3GPP as a feasible split to define the MH link capacity in the NR system. The Packet Data Convergence Protocol (PDCP) and Radio Resource Control (RRC) are centralised in the CU node, while the remaining functions are done locally in the DU node. As a result, the traffic is separated into numerous flows that may be routed to different access nodes, enabling multi-connectivity. This division has limited potential for coordinated scheduling. However, this is likely to be compensated by beamforming. An advantage of this option is the benefit of centralisation and a more extensive capability for coordination of mobility and handover operations. The MH link capacity for Splitting Option 2 in the UL and DL is specified by:

$$R_{Op.2\,[Mbps]} = R_{p\,[Mpbs]}\left(\frac{B_{[MHz]}}{B_{c[MHz]}}\right)\left(\frac{N_L}{N_{L,c}}\right)\left(\frac{log_2 M}{log_2 M_c}\right) + R_{c\,[Mbps]} \quad (12)$$

where:

- $R_{Op.2}$ – MH link capacity for Splitting Option 2
- R_p – Peak rate
- B – System bandwidth.
- B_c – Bandwidth for control signals.
- N_L – Number of layers in the system.
- $N_{L,c}$ – Number of layers for control signalling.
- M – Modulation order.
- M_c – Modulation order for control signals.
- R_c – Signalling rate.

The BH link (which connects the CU node and the Core) and the Transport link (TL) (which connects the Core and the External Data Centre (EDC)) have typical interface capacities, which means there is no specific splitting option associated with it (ITU-T, 2019). The respective capacity values are presented in Table 1.

Table 1 – Typical BH Link and TL Network capacities (Adapted from Carvalho et al. (2021) and (ITU-T (2019)).

Link Type	Link Capacity [Gbps]
BH	25
Transport	>100

2.5. Radio Link Length

In the context of the analysed scenarios, the antenna range is the maximum distance at which it can reliably receive signals from the UEs. The model considers the target-sensor pair communication in Line of Sight (LoS) and takes the approach from Costa (2017) to determine the maximum AL length for airborne UEs. The propagation model adopted is the Effective Earth's Radius Model, which considers the first Fresnel ellipsoid clearance of 100% and is applied to standard flight-level altitudes.

The radius of a circular coverage region determines the maximum connection length. The effective Earth radius does not consider the atmospheric refraction, leading to the factor $k = 1$. Thus, the maximum propagation distance of the radio link in LoS, also known as radio horizon distance, is given by (15). The variables r_A and r_{GS} in (13) and (14) depend on the height of the aircraft and the GS above the Mean Sea Level (MSL), respectively. The following expressions define these variables:

$$r_{A[km]} \triangleq R_{e[km]} + h_{A,MSL\,[km]} \quad (13)$$

$$r_{GS[km]} \triangleq R_{e[km]} + h_{GS,MSL\,[km]} \quad (14)$$

where:

- r_A – Effective distance of the aircraft's antenna to the Earth's centre.
- r_{GS} – Effective distance of the ground station's (GS) antenna to the Earth's centre.
- R_e – Effective Earth radius (6 371 km).
- $h_{A,MSL}$ – Aircraft height above the MSL.
- $h_{GS,MSL}$ – GS height above the MSL.

The calculation of the radio horizon distance is given by:

$$d_{RH[km]} = \sqrt{r_{A\,[km]}{}^2 - R_{e\,[km]}{}^2} + \sqrt{r_{GS\,[km]}{}^2 - R_{e\,[km]}{}^2} \quad (15)$$

where:

- d_{RH} – Radio horizon distance.

3. Results Analysis

3.1. Scenarios Description

It is considered three main scenarios. These scenarios include services with different radio characteristics classified as critical and non-critical. The services are applied to emergency, contingency, security, control, surveillance, and reconnaissance operations.

The Airbase scenario is selected to analyse the viability of implementing Security and Control Systems and testing the performance of Flight Simulators. The Security and Control Systems are installed inside the infrastructures and in the peripherical area. Thus, Remote Control Commands, Video Streaming in Closed-Circuit Television (CCTV) and Sensor Motion Detection are performed. Regarding the Flight Simulators, Remote Control Commands and Virtual Reality are used. The Airbase scenario studies the possibility of implementing these services, considering an average of 400 people working daily in the facilities. The Security and Control services have a latency requirement of 4 ms. These services are provided by 50 CCTV cameras and 52 network-based sensors. The Training and Mission Planning Department has 2 Flight Simulators, and the services provided are non-critical with a latency requirement of 4 ms.

The Wide Area Multilateration (WAM) System studies the possibility of using a 5G private network to determine the position of an aircraft by measuring the Time Difference of Arrival (TDOA) of signals transmitted from multiple known locations and collecting data from the environment used for weather monitoring. Three reference GSs are required to determine a precise location in two-dimensional space. The WAM System consists of 23 GSs, and the management of the services is performed using Video Streaming and Network-Based Sensor Sharing.

The Squadron scenario studies the implementation of a 5G private network in Remote-Controlled Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Systems performed using External Control Manipulations, High-Quality Video Streaming and Telemetry Link services. The scenario specification consists of 3 operational UAVs, with a latency requirement of 0.5 ms, thus, considered an extremely critical scenario. Each UAV has two remotely controlled Pan-Tilt-Zoom cameras, providing flexibility in capturing shots from different angles. It is also equipped with 3 sensors. Due to the flight velocity and possible network congestion, it is necessary to ensure that

these requirements are achieved to perform the attributed mission correctly. It is also considered that 400 people are working daily on the Airbase where the 911 Squadron is inserted.

3.2. Radio Characteristics Analysis

According to (Holma et al., 2020), no specific coverage distances are associated with a frequency band because the values depend on real-world factors, such as the RU node density, repeater cells, and terrain obstacles.

In this paper, the scenario analysis considers the maximum distance the MEC node can be deployed and the adequate cell type as a function of the frequency bands allocated to 5G in Portugal and the millimetre wave bands (future deployment). The communication between the RU node and the UEs is considered wireless for all scenarios.

Therefore, the RU node coverage distance can vary between 0.1 km to 30 km, depending on the cell type: macrocell, microcell, picocell and femtocell (Tikhomirov et al., 2018), and the frequency band used. The cell coverage required is estimated based on the scenario to be analysed and the environmental conditions (outdoor or indoor).

Table 2 presents the selection of the cell type associated with the above scenario's requirements. The choice is based on (Tikhomirov et al., 2018) considering the characteristics of each cell's type. It should be noted that the cell's maximum coverage distance depends also on the type of frequency used, which means that it may be lower than the value presented for each scenario. The coverage distance decreases as the frequency band increases. Therefore, the coverage distance used in the analysis is an estimation. It should be noted that each type of cell represents a specific geographic area covered by an RU node.

Table 2 – Cell type associated with the scenario requirements.

	Simulated Systems	**Cell Type**	**Maximum Cell Coverage [km]**	**Location**
Airbase	Security and Control	Macrocell	30	Outdoor
		Picocell Microcell	0.2 2	Indoor
	Flight Simulators	Femtocell	0.1	Indoor
WAM System	Weather Monitoring	Microcell	2	Outdoor
	Air Traffic Control	Macrocell	30	Outdoor
UAV Squadron	Remote-Controlled UAV	Picocell	0.2 2	Indoor Outdoor
		Macrocell	30	Outdoor

Using the example of the Airbase, it is considered that the RU node is estimated to be located about 2 km from the Control Centre, where the operators view real-time data, make decisions and take actions based on information received from sensors and cameras. Regarding the radio characteristics, a Channel Quality Indicator (CQI) of 8 is used for the Security and Control services since it ensures enough radio channel quality between the UEs and the Control Centre. Despite being a critical scenario, it is necessary to balance the benefits of higher

modulation orders with the need for reliability and robustness of the services, even at the expense of data rate.

The Airbase scenario is mainly characterised as an indoor hotspot with a high stationary UE density. In this case, it is necessary to have RU nodes placed to ensure the service's data rate and latency requirements inside the infrastructures. The outdoor UEs account for a small percentage of the total users, leading to deploying RU nodes with different characteristics requiring a more extensive coverage radius.

According to Fig.1, 5G provides enough throughput in both UL and DL without using the radio characteristics that maximise them. The total DL and UL throughputs are 433.10 Mbps and 326.72 Mbps, higher than the DL and UL required throughputs of 275.22 Mbps and 209.56 Mbps, respectively. The results obtained are referent to the installation of a single RU node. In the case of limited deployment BSs, one RU node can fulfil the requirements of the UEs

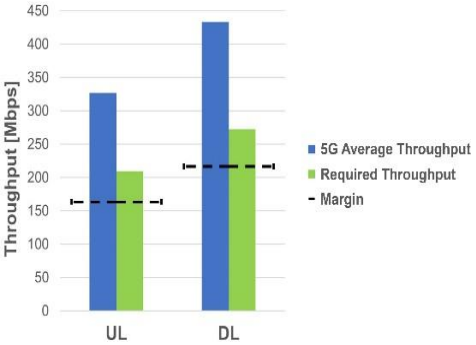


Figure 1 - Security and Control Systems – RU throughputs for the Airbase.

Concerning the network latency contributions, it should be considered that the UEs located outside, in the peripherical zone, are not at the same distance from the RU node as those installed in the Control Centre, which is in the central area of the Airbase. As such, the contributions associated with the ALs propagation latencies are different. The outdoor UEs are estimated to be around 4 km, at maximum, from the RU node, corresponding to an AL propagation latency of 0.0133 ms on the transmitter and receiver sides, while the indoor UEs are around 2 km away, corresponding to an AL propagation latency of 0.0067 ms also on the transmitter and receiver sides.

In addition to these latency contributions, it is necessary to analyse the influence of the MEC node deployment to keep the delays in the packet transmission, queuing and processing as low as possible. The MEC node deployment option influences the total node latency, which results are presented in Table 3. The total node latency without installing the MEC node is also presented. By analysing the results, it is possible to verify that the total node latency exceeds the latency required by the service when the MEC node is not installed. As such, this option is excluded since estimating the optical link's length is impossible.

Table 3 - Total node latencies for each MEC node deployment option.

MEC Node Deployment Option	Total Node Latency [ms]
None	4.858
RU-DU	1.044
DU-CU	2.125
CU-Core	2.734

In these systems, the maximum optical link's length is considered the lowest contribution from the AL propagation latency between the two UE environments. Since the same RU node transfers the data packets from the indoor and outdoor UEs, distant UEs can establish communication if the service is ensured for the highest optical link length. This assumption can be made because the services' specifications are equal regardless of the UE locations. The maximum optical link's length is used to calculate the maximum optical link's propagation latency. The results are shown in Table 4.

Table 4 - Maximum optical link's length and propagation latency for each MEC node deployment option.

MEC Node Deployment Option	Maximum Optical Link Length [km]	Maximum Optical Link's Propagation Latency [ms]
None	-	-
RU-DU	176	0.822
DU-CU	112	0.523
CU-Core	75	0.351

Table 5 shows the results obtained for the maximum E2E latency and the maximum E2E distance, which allows determining the distance the MEC node can be deployed from the UEs to ensure the service requirements. It is referent to the indoor UEs.

Table 5 - Maximum E2E latency and maximum E2E distance to indoor UEs for each MEC node deployment option.

MEC Node Deployment Option	Maximum E2E latency [ms]	Maximum E2E distance [km]
None	-	-
RU-DU	1.939	180
DU-CU	2.661	116
CU-Core	3.098	79

After analysing all the results, it is possible to verify that only the margin applied to the throughputs of the RU node, illustrated in Fig.1, is exceeded in the UL and DL sites. Regarding the latency margin, the RU-DU, DU-CU, and CU-Core MEC node options can be considered, as the maximum E2E latency obtained is below the margin of 3.6 ms.

The frequency band used in the AL connections influences the distance at which the RU node can be installed from the UEs. The highest percentage of UEs is concentrated inside the infrastructures. Therefore, the radius coverage is not prioritised because the building's area is restricted and smaller than the entire Airbase. However, a high UE density requires reliable connectivity while demanding low latency for real-time control and monitoring, leading to the necessity of a balance between coverage and capacity. The simulated system traffic is considered an intense network usage but with variations.

Based on these characteristics, the medium frequencies and millimetre wave frequency bands (3.6 GHz, 6 GHz and above 24.25 GHz) can be used for these specific localised applications. The frequencies of 3.6 GHz and 6 GHz can be deployed where coverage, reliability, and penetration through obstacles are required, supporting simultaneously numerous connected devices. However, it is necessary to consider the spectrum congestion, and the limited bandwidth compared with the one provided by the millimetre wave bands. These latter are primarily used for short-coverage distance applications. They offer high bandwidth, enabling higher data rates, and due to the associated short range, they experience less interference, which is essential for critical services. However, a LoS connection is required, making indoor deployment challenging, traduced in the necessity of having a higher number of RU nodes.

As a result, if the coverage of both types of cells (microcell and picocell) is maximised by using the three previous frequency bands, a hybrid network can be the best choice to guarantee the requirements of the services. Thus, the 3.6 GHz and 6 GHz frequencies can provide reliable and broader indoor coverage, making the microcells the best option. The picocells are adequate when using the millimetre wave bands, enhancing capacity and delivering low latency in specific areas, such as command centres or control rooms. In this way, the network structure is estimated to require more than one RU node if the number of indoor users increases. This requirement aims to provide better system redundancy, withstanding various vulnerabilities while maintaining continuous operations and protecting vital assets and information.

The maximum E2E latency calculated with the RU-DU option reaches the lowest value compared to the other deployment options (DU-CU and CU-Core). The main objective is to reduce the latency's probability of exceeding the maximum allowed value, which means that the best option associated with the independent private network is the RU-DU inside the facilities, even though the maximum E2E latency results are close because the queuing latency added to the maximum E2E latency is only due to the Motion Detection Sensor packets (high packet size) since this is a high-priority service. The processing latency is also significantly low because only the RU and MEC nodes are required to process data.

Regarding the previously obtained results and the respective analysis, it is concluded that deploying an integrated private network is impossible. The UEs are installed inside the Airbase's premises, being a decision factor in selecting the type of independent private network. Protection is paramount for the infrastructure, leading to the necessity of having the highest degree of control and customisation. Thus, limited and exclusive access to the private network's resources must be provided, ensuring high-performance levels for its use cases. The fact that military facilities are versatile and have different levels of responsiveness makes it mandatory to have significant flexibility to customise the network architecture, structure, and services to meet its specific needs. These critical services also require redundancy and resilience, which must be managed by the entity responsible for the network structure. Therefore, the Portuguese Air Force has to ensure that the network has these specific performance needs by having direct control over the QoS parameters and taking responsibility for network maintenance, upgrades and support. Thus, the best choice is an independent private 5G LAN by the Portuguese Air Force.

3.3. System Redundancy

The service's systems redundancy is intended to enhance reliability, fault tolerance, and resilience by providing backup options in case of component failure, errors, or disruptions. The following analysis focuses on two perspectives. One refers to the redundancy ensured by the throughputs provided by the RU node, and the other refers to the redundancy ensured by the network structure. The RU node redundancy is more localised over a smaller coverage radius. In contrast, the redundancy provided by the network structure covers a larger geographical area. The analysis covers the systems common to all the Portuguese Air Force facilities, i.e., the Security and Control Systems.

Concerning the Airbase scenario, the Airbase N.º6 is used as the object of study. Fig.2 shows four Portuguese Air Force facilities within a radius of 30 km centred at the Airbase N.º6, corresponding to the maximum coverage distance the RU node reaches in this scenario. However, the fact that the required throughput exceeds the defined throughput margin means that it is impossible to consider the same RU node to ensure the redundancy of the same services within a coverage radius of up to 30 km, i.e., the same RU node can not provide to more than one facility unit the same services using the 5G network.

Figure 2 - Portuguese Air Force facilities covered by the 30 km radius of the RU node centred at Airbase Nº 6.

As a result, the remaining facilities must install more than one backup RU node ready to switch on control if the primary RU node fails. The backup nodes have the same throughput and functionalities, ensuring a seamless transition. Therefore, the RU node should have the exact specifications as the RU node from the Airbase scenario to provide the exact service requirements.

The redundancy ensured by the network structure is related to the maximum E2E distance. Once the RU-DU option has been selected, the maximum distance the MEC node can be deployed from the UEs is influenced by the respective maximum E2E distance. As shown in Fig.3, if the RU nodes are characterised with the exact specifications as the RU node deployed at the Airbase scenario, the facilities within the computed radius, corresponding to the possible locations to deploy the MEC node, have their services ensured because the distance from each facility to the circumference is always less than 91 km. In this case, if all RU nodes could be allocated to

the same MEC node, each RU node should be part of an architecture with a specific optical link length, depending on the distance from the MEC node, to fulfil the exact Security and Control Systems requirements. Considering the simulation's parameters, the respective services are also ensured if an MEC node is at a maximum of 91 km from each facility.

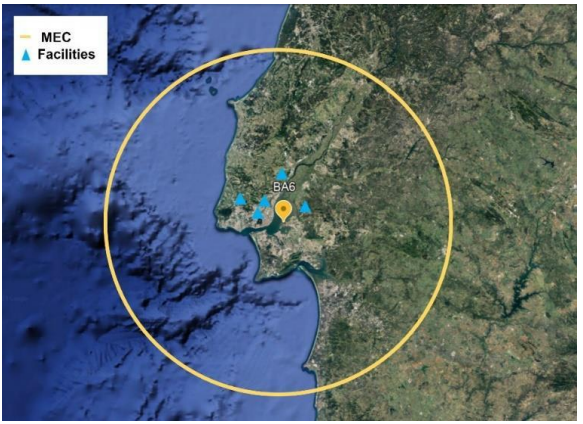


Figure 3 - Possible MEC node deployment locations that ensure the services requirements of Airbase N.º6.

4. Conclusion

The main objective of this paper is to analyse the feasibility and potential of installing 5G private networks at Portuguese Air Force facilities. The approach is designed to understand the advantages and disadvantages of the different operating scenarios and the considerations about the respective types of private networks. Therefore, a model is proposed and implemented in a simulator to compute the system's throughputs, latency, and coverage and estimate the accuracy associated with different MEC node deployment options and radio characteristics. The results allowed the development of a qualitative and quantitative analysis of each scenario.

After analysing all the scenario results, it can be seen that the 5G network can ensure the throughputs required by almost all systems. However, it should be noted that the 5G RU node throughputs depend on factors that can vary according to the desired purpose, the installation location and the frequency band used. Therefore, in each scenario's simulation parameters, the CQI values were chosen based on the respective services' characteristics, functionalities and environment properties. The fact that there are critical and non-critical services in the same scenario means that the margins applied to the capacity of the RU node are different. As this is a decisive factor in choosing the type of private network, it was found that for the same scenario, there could be two recommendations for the type of private network to be installed. As such, it was realised that the network type decision should also consider the monetary factor, the area occupied by the network components and the respective maintenance in addition to the conditions presented in each service analysis. These aspects significantly impact long-term use, and since the services are always inserted in a military environment, security and restriction of data sharing must be prioritised. Thus, choosing a single type of private network is the best deployment strategy in this case.

In future work, the implemented model should be optimised to consider the attenuation applied to the ALs in the transmission and reception of data packets to obtain a more accurate latency value for radio links. The model should also be studied and tested in more remote areas since the priority and user traffic would differ. The distance between nodes should also be a factor to analyse since the network Cores are usually localised closer to higher user density zones. The collocated node architectures should also be a study case regarding latency contributions and capacities since this paper did not analyse them. It is also proposed to study hybrid private networks to optimise the use of services according to their degree of criticality since this model considered that the type of private network chosen for each scenario was unique.

References

Carvalho, A., Correia, L., & Grilo, A. (2021). Analysis of Strategies for Minimising End-to-End Latency in 4G and 5G Networks. Instituto Superior Técnico.

Costa, T. (2017). Analysis of Aircraft Accuracy Location in Aeronautical Multilateration Systems [M.Sc. Thesis, Instituto Superior Técnico]. https://grow.tecnico.ulisboa.pt/wp-content/uploads/2017/07/mscthesis-tiago-costa.final_.pdf

Eswaran, S., & Honnavalli, P. (2022). Private 5G networks: A survey on enabling technologies, deployment models, use cases and research directions. Telecommunication Systems. https://doi.org/10.1007/s11235-022-00978-z

FAP. (2023, October). Força Aérea Portuguesa—Missão [Online post]. https://www.emfa.pt/p-181-missao_visao

Holma, H., Toskala, A., & Nakamura, T. (2020). 5G Technology: 3GPP New Radio. John Wiley & Sons. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=hkHADwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=frequency+spectrum+bands+5G&ots=AGz4VK2EyN&sig=3ddStkRE8Qr07Sd0wNS1MBZO1UY&redir_esc=y#v=onepage&q=frequency%20spectrum%20bands%205G&f=false

ITU-T. (2019). 5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context. Telecommunication Standardization Sector of ITU.

Larsen, P., Maria, L., Checko, A., & Christiansen, H. (2018). A Survey of the Functional Splits Proposed for 5G Mobile Crosshaul Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(1), 146–172.

Nakamura, T. (2020). 5G Evolution and 6G. 2020 IEEE Symposium on VLSI Technology, Honolulu, USA. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9265094

Prados-Garzon, J., Ameigeiras, P., Ordonez-Lucena, J., Munoz, P., Adamuz-Hinojosa, O., & Camps-Mur, D. (2021). 5G Non-Public Networks: Standardization, Architectures and Challenges. IEEE Access, 9, 153893–153908. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3127482

Prakash, R. (2022, October). Transforming enterprise and industry with 5G private networks [Online post]. https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/10/transforming-enterprise-and-industry-5g-private-networks

Tikhomirov, A., Omelyanchuk, E., & Semenova, A. (2018). Recommended 5G frequency bands evaluation. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8350639

Aplicação de *machine learning* na previsão de desvios e controlo orçamental na Força Aérea

Fonte: Kietsirikul (2022)

Autor: TEN/ADMAER Pedro de Oliveira Palmas
Mestrado Integrado em Aeronáutica Militar, Academia da Força Aérea, Sintra

Orientador: Professor Doutor António Carlos de Oliveira Samagaio
Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade de Lisboa

Coorientadora: MAJ/ADMAER Elsa Pereira Evangelista

Resumo: O mundo tem vindo a sofrer alterações de paradigmas, sendo as tecnologias emergentes uma realidade cada vez mais desafiante. Atualmente, as organizações em todo o mundo devem manter-se atualizadas e alinhadas com essa evolução, a nível dos seus processos e utilizando técnicas de inteligência artificial (IA) como recurso, pois só assim poderão continuar a ambicionar ter vantagem competitiva. A função da auditoria passa por perceber e analisar os processos das entidades, por forma a detetar se existem inconformidades ou irregularidades nas suas contas. Nesse sentido, a conjugação entre auditoria e IA tem vindo a ganhar significância, sobretudo, nas principais firmas de auditoria. A Força Aérea (FA), sentindo a repercussão das tendências emergentes, deverá perceber em que pontos se poderá potenciar na IA, sendo o controlo interno uma delas. Inserida nos órgãos da Administração Central, tem o dever de prestar contas, e por isso, deverá ter um controlo interno rigoroso, coerente e transparente. Nessa senda, a implementação de IA, especificamente, no controlo orçamental, torna-se um terreno convidativo ao estudo da aplicação das novas tecnologias, na tentativa de resolver ou melhorar algumas lacunas existentes. Os resultados do estudo evidenciam a utilidade dos algoritmos **de *machine learning* na previsão da ocorrência de desvios e no seu contributo ao controlo orçamental.**

Palavras-chave: Inteligência Artificial; *Machine Learning*; Aprendizagem Supervisionada; Auditoria Interna; Forças Armadas Portuguesas; e Orçamento.

1. Introdução

A IA é, atualmente, uma das áreas de crescimento global mais acelerado. De acordo com o estudo CIO Survey de 2019, o número de empresas a adotar IA cresceu cerca de 270% entre 2015 e 2019 (Gartner, 2019). Segundo o inquérito Deep Shift: Technology tipping points and societal impact, até 2025, aproximadamente 30% das auditorias empresariais utilizarão IA (Shift, 2015). O aumento da adoção da IA pode ser atribuído à crescente procura por melhorias na produtividade em economias avançadas, pois as empresas veem nas tecnologias cognitivas uma forma de impulsionar esse crescimento. Além disso, a tomada de decisões com base em grandes volumes de dados, em tempo limitado, torna-se desafiadora para os humanos. No que toca à oferta, há disponibilidade de software e hardware com capacidades cognitivas para realizar tarefas anteriormente feitas manualmente. Os dados e a capacidade de processamento são elementos cruciais neste domínio (Kokina & Davenport, 2017), sendo que este fenómeno se reflete nas firmas de auditoria, especialmente nas Big4.

O machine learning (ML) é um subcampo da IA com capacidade de automatizar a análise de dados, identificando padrões, e elaborando previsões para novos casos. Esta ferramenta poderá ser altamente benéfica ao nível de uma auditoria devido à mitigação de erros e aceleração das mesmas (Dickey et. al, 2019).

A Força Aérea (FA), como ramo das Forças Armadas inserido nos órgãos da Administração Central, tem à sua disposição créditos inscritos no Orçamento de Estado (OE) e, portanto, deve prestar contas a entidades específicas. O seu controlo envolve duas perspetivas: interna e externa. Internamente, a FA possui militares com funções de auditoria que aplicam a legislação vigente e normas internacionais. Alinhado com a Diretiva Estratégica da FA 2022-2025, as tendências emergentes da tecnologia têm crescido com elevado ritmo, o que se faz sentir a nível da Governança e Tomada de Decisão. Assim, a transição digital sentida na instituição sustenta a ideia de que aplicar tecnologias de IA, poderá contribuir na prossecução da eficiência e produtividade dos recursos existentes. As auditorias e o controlo interno são

fundamentais na gestão organizacional, com auditores, internos ou externos à mesma, seguindo normas estabelecidas para analisar dados e detetar alguma possível irregularidade ou inconformidade. Nesse sentido, a análise digital ganha relevância no que ao campo da auditoria diz respeito (Taborda, 2017), ajudando os auditores na análise de dados de múltiplos ficheiros, auxiliando na tomada de decisão, e libertando-os para outras tarefas de maior valor acrescentado.

Do cruzamento entre as possibilidades de aplicação desta temática, e aquilo que os dados disponíveis permitiam analisar, surgiu a hipótese de aplicar a aprendizagem supervisionada na previsão de desvios no âmbito da gestão e controlo orçamental, especificamente ao nível dos elementos de ação. Ter um orçamento flexível é essencial, mas o objetivo será o de melhorar a capacidade de a instituição prever, com cada vez mais precisão, as despesas e a forma de alocação (pelos elementos de ação) dos seus recursos.

2. Revisão da literatura

2.1. Conceito de inteligência artificial

A IA pode então ser definida como "a habilidade de um sistema interpretar dados externos, aprendendo com esses dados, e utilizando essas aprendizagens para atingir objetivos e tarefas específicas através de uma adaptação flexível" (Kaplan & Haenlein, 2019). Sendo a IA um instrumento de ajuda à tomada de decisão nas organizações (Abdolmohammadi, 1991), Carlson (1983) refere que esse processo de decisão deverá conter, tipicamente, três fases iterativas básicas: i) inteligência - recolha de dados, identificação de objetivos, diagnóstico de problemas, dados de validação e estruturação de problemas; ii) conceção - manipulação dos dados, quantificação dos objetivos, geração de alternativas e atribuição de riscos ou valores às alternativas; e iii) escolha - envolve gerar estatísticas sobre alternativas, explicar as alternativas, escolher entre elas, explicando e justificando a escolha.

A IA pode ser distinguida e separada em dois conceitos diferentes: IA fraca e IA forte. A IA fraca é respeitante à capacidade que sistemas de computação têm de utilizar algoritmos destinados exclusivamente para uma tarefa, desenhados para casos muito específicos, oferecendo a possibilidade de executar a maioria das tarefas operacionais das empresas (Iansiti & Lakhani, 2020). As máquinas são programadas para realização de tarefas específicas, não tendo, por isso, a capacidade de desenvolver inteligência própria (Violante & Andrade, 2022). Por sua vez, a IA forte corresponde a sistemas com capacidade de realizar qualquer atividade lógica, desde a simulação do processo de tomada decisão, aprendendo e resolvendo problemas de qualquer domínio, até ao desenvolvimento de inteligência própria, como se tentou mostrar no Teste de *Turing* (IBM, 2010; Sabouret, 2020).

Ainda não existem tecnologias com capacidade de simular inteligência auto consciente, porém existem previsões de que serão os próximos passos da IA (Bostrom, 2014). Prevê-se que no futuro, através da IA forte, poderá existir um vasto manancial de máquinas e sistemas capazes de funcionar totalmente como seres humanos e com o seu nível de inteligência (Borana, 2016). A IA forte, até hoje, não conseguiu alcançar o seu potencial, muito em parte, devido à falta de dados disponíveis. Este obstáculo será contornado quando se alargarem as investigações nos campos de IA, ML e *Deep Learning* (DL), outra camada mais “refinada” e atual da IA. Nesse ponto, a IA forte conseguirá alcançar o seu elevado potencial (Butz, 2021). Através deste tipo de inteligência, poderiam ser emitidas e recomendadas linhas de ação flexíveis e adaptáveis na prossecução de alguns objetivos (Butz, 2021). A relação mais próxima com IA forte, poderá ser o tipo de inteligência capaz de desenvolver linhas e pensamentos de senso comum (Davis &

Marcus, 2015; Lake et. Al, 2017; Levesque, 2017; Minsky, 2007; Zhu et. Al, 2020). A IA forte terá a capacidade de raciocinar acerca do ambiente em volta, podendo identificar, pensar e explicar relações causais (Butz, 2021). A este nível de inteligência, com um elevado grau de sentimento e razão, chama-se "singularidade" (Kurzweil, 2014), que implica a inclusão de atributos como definir metas, usar a imaginação, ter uma vasta cultura geral, e principalmente, conseguir ser crítico em relação ao seu próprio desempenho (Goertzel, 2007). No futuro, para que este nível de singularidade seja obtido, as diferentes técnicas e algoritmos de IA tenderão a convergir (Davenport & Kirby, 2016).

2.2. Inteligência artificial em auditoria

A auditoria é um terreno fértil para a aplicação de análise de dados e IA, uma vez que se tornou cada vez mais desafiante combinar grandes quantidades de dados estruturados e não estruturados com o fim de extrair informações acerca do desempenho financeiro e não financeiro das empresas. Além disso, muitas das tarefas de auditoria são estruturadas e repetitivas, podendo ser automatizadas (Kokina & Davenport, 2017). A natureza da auditoria, por si só, já é, então, um campo convidativo ao uso da IA, sendo que esta envolve a avaliação de risco de decisões estruturadas, de decisões não estruturadas e semiestruturadas, mas regularmente repetitivas (Baldwin et. Al, 2006). De entre os tipos de decisões (estruturadas, semiestruturadas ou não estruturadas), a auditoria foca-se bastante nas decisões e análises menos estruturadas, que apresentam muita incerteza devido aos riscos e falta de informação (Baldwin et. Al, 2006). Porém, a aplicação de IA tem sido mais bem-sucedida em tarefas de auditoria mais estruturadas, programáveis e repetitivas, para as quais a recolha de dados vindos do ser humano não é uma dificuldade (Baldwin et. Al, 2006).

O processo de auditoria financeira pode beneficiar da utilização de IA, essencialmente, em três dimensões (Elliot et. Al, 2020; Law & Shen, 2020): i) melhorar a compreensão das operações dos clientes e dos seus riscos associados; ii) melhorar a deteção de distorções materiais; e iii) evoluir as técnicas de comunicação com os cargos de chefia. A tomada de boas decisões em auditoria podem ter um impacto no que toca à responsabilidade legal dos auditores, visto que uma boa ajuda à decisão poderá levar a que sejam tomadas melhores decisões, evitando assim a responsabilidade resultante de eventuais falhas decorrentes da auditoria (Baldwin et. Al, 2006). Assim, através da utilização de IA, pode permitir-se que sejam reduzidas as três componentes do risco: o risco inerente, o risco de controlo e o risco de deteção (Zemánková, 2019). Na prática, conseguem-se ultrapassar os problemas adjacentes aos métodos de auditoria tradicionais (Zhou, 2021), melhorando a sua capacidade, a qualidade e eficiência da mesma (Chen & Ni, 2020), solucionando problemas de forma mais célere e precisa, reduzindo a carga de trabalho dos auditores, melhorando o sistema de controlo interno e reduzindo o risco de auditoria, alcançando uma gestão efetiva e sustentável. Por exemplo, o ML, uma camada da IA, permite estabelecer um modelo de controlo de riscos inteligente com resposta ativa e em tempo real, substituindo o processamento e análise de manuais por parte dos auditores (Zhou, 2021).

A aplicação da IA no contexto da auditoria implica igualmente ameaças à qualidade dos trabalhos produzidos. A IA é construída baseada em códigos elaborados por seres humanos e fica sujeita a ser um reflexo das crenças do programador (Janvrin et. Al, 2008; Solaimani et. Al, 2020). Segundo Ucoglu (Ucoglu, 2020a), a utilização de IA em auditoria pode acarretar novos riscos na qualidade da mesma. Segundo o CIO *Survey* (1), cerca de 85% dos projetos poderão transmitir erros devido a enviesamentos dos dados ou de erros de cálculo. Com a introdução da IA na auditoria, existe o risco de serem introduzidos dados considerados irrelevantes, o que poderia levar a um efeito de diluição (Greenman; 2017; Raphael, 2017; Schmidt et. Al, 2020). A

inclusão deste tipo de informação, isto é, de dados irrelevantes, por consequência, influenciaria o processo de auditoria, e por isso, a qualidade da mesma (Abdelraheem et. Al, 2021).

2.3. Tipologias de inteligência artificial

Abdolmohammadi (1991) estudou 332 tarefas desempenhadas por auditores, observando que apesar do seu elevado número, nem todas seriam indicadas para a aplicação de técnicas de IA. Embora, algumas tarefas fossem estruturadas e rotineiras, existiam outras pouco estruturadas e dependentes de informações incertas e incompletas (por exemplo, decisões de continuidade de um cliente).

Por norma, em campos de contabilidade e auditoria, a IA é implementada através de algum dos diferentes tipos de tecnologia, seguidamente apresentadas (Zemánková, 2019) algoritmos/programação genética, utilizados maioritariamente para prever falências, conseguindo minimizar o risco de falência associado a outros modelos tradicionais (Lensberg et. Al, 2006), sendo também úteis para construir modelos de comportamento de um auditor em casos de decisões de fraude (Welch et. Al, 1998), e até mesmo em situações de decisão de continuidade (Baldwin et. Al, 2006); sistemas difusos, que oferecem a possibilidade de contabilizar os fatores qualitativos, e são úteis para efeitos de avaliação da materialidade pois permitem aos seus utilizadores avaliar a materialidade numa escala contínua entre 0 e 1, em vez de o fazerem numa decisão binária (Rosner et. Al, 2006); NN, uma técnica de IA que tenta simular um cérebro humano (Omoteso, 2012), fundamental ao nível do DL, estando associada, sobretudo, à avaliação de risco, uma vez que o permite fazer de forma mais sistemática e consistente, graças à sua capacidade de aprender, generalizar e categorizar os dados (Chiu & Scott, 1994); sistemas híbridos, resultantes da combinação das tecnologias anteriores, e são, por norma, utilizados quando tanto a análise qualitativa como quantitativa são relevantes e necessárias (Davis et. Al, 1997). Lenard et al. (1998) desenvolveram um sistema híbrido que combinava um modelo estatístico com um ES para prever decisões de continuidade. Os Sistemas Híbridos poderão ser apropriados neste tipo de casos, uma vez que algumas tarefas de auditoria envolvem a utilização de análise quantitativa a par de um julgamento qualitativo (Baldwin et. Al, 2006).

Ao longo de toda a evolução dos níveis de inteligência e das respetivas técnicas, o conhecimento foi sendo aprimorado, podendo ser decomposto em três grandes camadas (Figura 1). A IA como um todo, sendo o *Machine Learning* (ML), um subcampo desta, e mais recentemente, o *Deep Learning* (DL) como uma parte do ML.

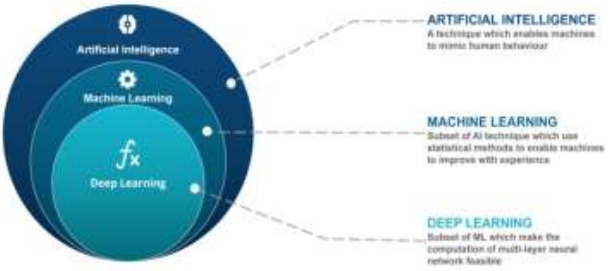


Figura 1: Relação entre os três níveis de IA
Fonte: Aggarwal et. Al (2022)

2.4. *Machine learning*

ML é um subcampo fundamental da IA que surge da ideia de que máquinas poderiam ser programadas para aprender da mesma forma que os humanos o fazem, sendo um método computacional com capacidade para identificar padrões escondidos, baseado em dados, conseguindo, posteriormente, fazer previsões (Alpaydin, 2014), fazendo deste uma ferramenta utilizada na modelação preditiva (Shmueli, 2010). É uma técnica de IA que é bastante eficiente a trabalhar com conjuntos de dados de grande dimensão, requerendo um menor número de pressupostos subjacentes (Alpaydin, 2014; Bertomeu, 2020; Cecchini et. Al, 2010). Desta forma, assente num largo número de *inputs*, o computador consegue prever o *output* (Brown, 2021), e por esse motivo, o modelo será tanto melhor quanto mais *inputs* lhe forem fornecidos (Violante, & Andrade, 2022). Os algoritmos de ML ao lerem os dados, detetam padrões complexos e identificam quais as melhores variáveis que conseguem explicar um dado resultado. Além disso, através destes algoritmos, são encontradas combinações adequadas para elaborar previsões precisas fora da amostra em estudo, daí que se considerem fundamentais para desbloquear fontes de dados financeiros, permitindo tomar melhores decisões (Bertomeu et. Al, 2021).

É de alta importância frisar que a inteligência do sistema depende fortemente da qualidade dos dados e dos exemplos a que é submetida previamente, uma vez que é sobre eles que vai produzir conhecimento, sendo necessário assegurar que os dados utilizados não contêm enviesamentos ou preconceitos, para que o sistema não só não aprenda com eles, como não os perpetua durante o processo de aprendizagem e na aplicação a novos casos (Garcia, 2020). O ML pode apresentar algumas questões a ter em atenção. Um delas é o *overfitting*, ou seja, quando o computador capta idiossincrasias, isto é, padrões comportamentais nos dados, considerados peculiares, que não são representativas da realidade. Situações deste tipo podem resultar do facto do modelo ser testado com os mesmos dados utilizados para o treinar e contruir, uma vez que a sua sobreposição faz com que o sistema esqueça que as correlações estatisticamente significativas entre variáveis, não implicam, obrigatoriamente, uma relação causal. Opostamente, o fenómeno de *underfitting* ocorre quando o modelo criado não é suficientemente complexo para encontrar padrões nos dados. Por ambos os casos, continua a ser necessária a compreensão e julgamento humano, como complemento ao ML (Dickey et. Al, 2019).

Os *inputs* fornecidos aos sistemas de informação podem ser lidos segundo três linhas distintas de aprendizagem: Aprendizagem Supervisionada, Aprendizagem Não Supervisionada e Aprendizagem Reforçada. A Aprendizagem Supervisionada (Modelos Preditivos) consiste em, partindo de dados de treino (*inputs*), chegar a uma função que possa ser útil para prever um rótulo/valor, que caracterize um novo exemplo, baseado nos valores dos seus atributos de entrada (Gama et. Al, 2017). Pode ser classificado em dois tipos: Classificação (rótulo discreto) ou Regressão (rótulo contínuo) (Gama et. Al, 2017). Na Aprendizagem Não Supervisionada (Modelos Descritivos) não existem rótulos associados aos *inputs* fornecidos, sendo o objetivo principal encontrar um padrão nos dados recolhidos. Para tarefas deste género, os algoritmos utilizados não consideram os atributos de saída e podem ter três possíveis classificações (Gama et. Al, 2017): i) agrupamento, onde os dados se associam e agrupam pelo nível de equivalência; ii) sumarização, onde se tenta sintetizar e interpretar de forma simplista um determinado conjunto de dados; e iii) associação, onde se verificam padrões de ligações entre atributos de um conjunto de dados. Por fim, na Aprendizagem Reforçada existem interações de tentativa e erro num ambiente dinâmico, onde um sistema deve aprender e otimizar um comportamento (Kaelbling et. Al, 1996). O DL está bastante presente neste tipo de aprendizagem (Li, 2017).

Crê-se que, nos próximos anos, o ML terá a capacidade de revolucionar quase todas as indústrias, não sendo a profissão de auditoria uma exceção (Kokina & Davenport, 2017), podendo ser utilizado para prever fraudes (Bao et. Al, 2020; Perols, 2021; Perols et. Al, 2017) falências (Gentry et. Al, 2002) reestruturações/dissoluções (Bertomeu et. al, 2020; Dutta et. Al, 2017; Hunt & Richardson, 2019) e estimativas contabilísticas (Ding et. Al, 2020).

2.5. Aprendizagem supervisionada

Este tipo de aprendizagem preditiva traduz-se numa função onde, tendo um conjunto de exemplos rotulados, é construído um estimador. Os rótulos podem tomar valores dentro de um domínio conhecido, porém, segundo duas perspetivas distintas: se o domínio for um conjunto de valores nominais, está-se perante uma situação de classificação (gerando um estimador classificador), por outro lado, trabalhando num domínio de valores ordenados e infinito, existe um problema de regressão (originando um estimador de regressão). Em ambas as situações, os estimadores gerados são uma função, que pegando em exemplos não rotulados, têm capacidade de alocar esses exemplos a uma das classes ou valor já conhecidos (Dietterich, 1998).

A aprendizagem supervisionada apresenta-se como a técnica mais comum em problemas de classificação, uma vez que, na maioria dos casos, o objetivo é programar a máquina para aprender um determinado sistema de classificação previamente criado. A principal tarefa será prever o rótulo de um objeto através do conjunto das suas características. Desta forma, o algoritmo de aprendizagem tem em consideração os *inputs* que traduzem as características desse objeto, e compara o *output* previsto com a realidade (Nasteski, 2017). Num modelo simples de ML, o processo de aprendizagem é dividido em duas etapas: treino, onde os dados de treino são lidos pelo algoritmo construindo um modelo de aprendizagem, e teste (Dhage & Raina, 2016).

Segundo Oladipupo (2010), os algoritmos de aprendizagem supervisionada que mais frequentemente lidam com problemas de classificação são: Regressão Linear, Regressão Logística, *Support Vector Machine*, *Decision Tree*, *Random Forest*, *K-Nearest Neighboir*, *Neural Networks*, *Stochastic Gradient Descendent*, *XGBoost, Naive Bayes, K-Means Clustering*, entre outros. Seguidamente, apresentar-se-á uma breve descrição dos algoritmos relevantes para este trabalho.

2.5.1. Algoritmos de aprendizagem supervisionada

Para resolver um problema de decisão, uma *decision tree* usa a estratégia de "dividir para conquistar". Assim, um problema considerado complexo, é repartido em problemas mais simples, aos quais se aplicam estratégias adequadas. Para estes problemas mais simples, são encontradas soluções, que quando combinadas, poderão fornecer a solução para o problema complexo (Faceli et. Al, 2021) Deste modo, *decision trees* são classificadores que expressam ocorrências (instâncias) ordenadas, baseando-se em valores das suas características. Cada nó de uma árvore de decisão representa uma característica de uma ocorrência que será classificada e cada ramo representa o valor que um nó pode assumir (Osisanwo et. Al, 2017). As instâncias são classificadas partindo do nó de raiz (Kotsiantis et. Al, 2007), que por ser o inicial, não tem arestas de entrada (Maimon & Rokach, 2014), porém, todos os outros têm uma aresta de entrada. Se um nó tiver arestas de entrada e saída é chamado nó interno (ou de teste), e se apenas tiver nós de entrada, é chamado de folha. Numa *decision tree*, os nós de teste, dividem o espaço da ocorrência em dois ou mais subespaços. A cada folha (nó final) é atribuída uma

classe que representa um valor-objetivo adequado. Com um classificador deste tipo, um analista poderá prever a resposta para uma determinada situação, tendo em consideração as características comportamentais de toda a amostra (Tan et. Al, 2013). O processo de aprendizagem neste tipo de algoritmo é utilizado como mecanismo de previsão, e partindo de observações sobre um determinado objeto, são tiradas conclusões acerca do seu valor-alvo (Osisanwo et. Al, 2017) Por norma, um decisor prefere *decision trees* menos complexas, uma vez que permitem uma abrangência maior (Nasteski, 2017).

No seguimento deste modelo, surgem os algoritmos de *random forest*, uma vez que se consideram como conjuntos de *decision trees*, calculando a média das suas previsões individuais. Analisar árvores individualmente apresenta maior facilidade de interpretação, porém, essa característica perde-se quando se fala na análise de *random forests*, devido ao facto de serem várias árvores agregadas. No entanto, este modelo, oferece um desempenho muito superior em tarefas de previsão (Schonlau & Zou, 2020), uma vez que a taxa de erro diminui à medida que a quantidade de árvores aumenta (Breiman, 2001b).

O *extreme gradient boosting* (*Xgboost*) é um sistema que tem vindo a receber reconhecimento numa série de problemas de ML e *data mining*, mais concretamente, por exemplo, ao nível de previsão de comportamentos de clientes, categorização de produtos, previsão de vendas, classificação de eventos, entre outras atividades de previsão. O fator que mais força dá ao uso de *Xgboost*, é a sua característica de escalabilidade em vários cenários, permitindo executar mais de dez vezes mais rápido que as outras soluções disponíveis, devido às suas otimizações, e pode ser direcionado para um enorme número de exemplos (Chen & Guestrin, 2016).

3. Contexto de investigação

3.1. Quadro normativo geral

A FA, segundo a Diretiva Estratégica da Força Aérea (2022, p. 8), tem por missão "participar de forma integrada, na defesa militar da República, nos termos da Constituição e da lei, sendo fundamentalmente vocacionada para a geração, preparação, aprontamento e sustentação de forças e meios da componente operacional do sistema de forças". De acordo com o artigo 1.º do Decreto-Lei 187/2014, de 29 de dezembro, que estabelece a Lei Orgânica da FA (LOFA), é um ramo das Forças Armadas, dotado de autonomia administrativa que, através do Ministério da Defesa Nacional (MDN), se integra na administração direta do Estado. Adicionalmente, segundo o disposto na Lei de Bases da Contabilidade Pública (LBCP), Lei n.º 8/90, de 20 de fevereiro, mais concretamente no n.º 1 do artigo 2.º, a autonomia administrativa nos serviços e organismos da Administração Central, no qual se inclui a FA, manifesta-se, em regra, na competência de autorizar a realização de despesa e respetivos pagamentos por parte dos dirigentes, em atos de gestão corrente. Confrontando o artigo 3.º da LBCP com o artigo 5.º da LOFA, os serviços e organismos deste regime contam com créditos do Orçamento de Estado (OE). Assim, a FA tem ao seu dispor receitas atribuídas no OE, e por isso, tem a obrigação de prestação de contas a determinadas entidades.

A função de monitorização é assegurada sob duas dimensões: a interna e a externa. Na perspetiva interna, o Serviço de Inspeção e Auditoria Financeira e Patrimonial (SIAFP) tem como missão executar ações de inspeção, auditoria e controlo, nomeadamente, auditar as contas das Unidades/Órgãos/Serviços (UOS) da FA, bem como as contas consolidadas, com o fim de garantir a sua situação financeira e patrimonial com a correta conformidade legal e regularidade financeira, e posterior prestação de contas ao Tribunal de Contas (TC) (RFA 303-10 (A) - Organização e normas de funcionamento da DFFA). Paralelamente, a nível interno, a função de

controlo na FA é também assegurada pela Inspeção Geral da Força Aérea. A nível externo, o controlo é exercido pela Inspeção Geral da Defesa Nacional, Inspeção Geral da Administração Interna, Inspeção Geral das Finanças e Tribunal de Contas.

O Regulamento das Auditorias de Administração Financeira e Patrimonial da DFFA, é ditado pelo RFA 425-3, que tem como objetivo estabelecer a doutrina e os procedimentos gerais que devem ser adotados e tidos em consideração aquando da realização de uma auditoria na alçada da DFFA. Este documento pretende dar ferramentas e linhas orientadoras ao auditor para que possa expressar o seu parecer sobre se as demonstrações financeiras da FA estão a ser realizadas em conformidade legal, tributária e com regularidade financeira.

Além do estabelecido nos regulamentos internos da FA, os auditores devem seguir também, as Normas e Boas Práticas reconhecidas e utilizadas por entidades de Controlo Nacionais e Internacionais, como é o caso de diretrizes da *International Organization of Supreme Audit Institutions*, as Normas Internacionais de Auditoria do *International Auditing and Assurance Standards Board*, as Normas Técnicas de auditoria da Ordem dos Revisores Oficiais de Contas e as diretrizes do *Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission* (RFA 425-3 - Regulamento das Auditorias de Administração Financeira e Patrimonial, parágrafo 204).

As tendências emergentes da tecnologia irão repercutir-se nas Forças Armadas nacionais, influenciando a forma de combater e o processo de organização e gestão das forças. Na Diretiva Estratégica da Força Aérea 2022-2025 é referido que a Ciência e Tecnologia apresentam um ritmo de evolução rápido e disruptivo, obrigando as organizações a inovar, procurando formas de introduzir sistemas suportados por IA e ML, assentes em sistemas com elevado grau de processamento e armazenamento. A nível interno, no que à Governança e Tomada de Decisão diz respeito, identificam-se alguns fatores que afetam a colaboração entre Ministério da Defesa Nacional (MDN) e Estado-Maior-General das Forças Armadas (EMGFA), prendendo-se fundamentalmente com a complexidade do processo de tomada de decisão e com ferramentas de gestão desadequadas (CEMFA, 2022). Pelo descrito no Objetivo Estratégico 4 – Otimizar a gestão da organização com processos simples e eficazes suportados em sistemas de informação atuais e resilientes – pretende-se atingir uma tomada de decisão mais simples e assente em tecnologias ágeis (Linha de Ação 4.1), baseado num processo de transição digital, com o intuito de alcançar a transformação digital da organização, aumentando a sua produtividade e eficiência dos recursos existentes (CEMFA, 2022).

Seguindo esta linha de ideias, o facto de a documentação de auditoria poder ser registada em papel ou em meios eletrónicos (RFA 425-3 - Regulamento das Auditorias de Administração Financeira e Patrimonial, parágrafo 206), aliado a que auditorias externas solicitem, cada vez mais, todos os elementos dos processos de despesa em formato digital num curto espaço de tempo, levou o Serviço Administrativo e Financeiro a emitir a Instrução nº01/2022, no sentido de seguir a tendência da Administração Pública (AP) da desmaterialização documental com recurso a meios eletrónicos, que se poderá tornar bastante relevante na melhoria da capacidade de resposta da FA a entidades externas, no âmbito de inspeções, auditorias ou investigações e na aplicação de tecnologias de IA.

3.2. Envolvente da gestão orçamental

De acordo com o Despacho n.º 52/2008 de 30 de setembro, que determina o Ciclo Anual de Planeamento e Orçamento (CAPO), o planeamento de atividades da FA está sujeito a um enquadramento legal específico que regula a estrutura organizacional, o sistema de gestão e os recursos financeiros disponíveis. Assim, o enquadramento das atividades assenta em duas

poderosas ferramentas de administração: o Plano Anual de Atividades (PAA) e o Relatório Anual de Atividades (RAA).

Considerando o constante no Anexo B ao Despacho n.º 52/2008, de 30 de setembro, todo o processo orçamental começa no ano N-2, aquando da revisão por parte da Divisão de Planeamento (DIVPLAN) dos Objetivos Estratégicos e da Diretiva de Planeamento. Mediante coordenação da DIVPLAN, a DFFA solicita às diversas UOS a inclusão e quantificação das despesas previstas para N+1. Recolhidas todas as Propostas de Orçamento, estas são consolidadas e submetidas à Secretaria-Geral do MDN, sendo posteriormente comunicados os *plafonds* atribuídos. Em função das necessidades estabelecidas pela macroestrutura e das limitações impostas pela tutela, o PAA é submetido para análise, eventuais ajustamentos e submetido a despacho de S. Exa. o General CEMFA. Em setembro de N-1 a sua versão final é gravada em sistema, constituindo-se como documento orientador na execução das Atividades. Até dezembro de N-1, caso o Orçamento sofra alterações, são efetuados acertos às prioridades do PAA e do Projeto de Orçamento. Por sua vez, em N+1, é elaborado o RAA, que descreve o desempenho efetuado, apontando os desvios, avaliando resultados e também, fornecendo informação relevante para que a melhoria e busca de qualidade sejam constantes.

No que ao PAA diz respeito, este é o documento onde a FA define os objetivos a alcançar, programas a realizar e quais os recursos necessários. O cumprimento deste PAA poderá tornar-se ambicioso se os recursos financeiros necessários para a sua persecução se revelarem superiores aos orçamentados (Plano Anual de Atividades 2023). O PAA deve coordenar os esforços das diferentes entidades integrantes do planeamento para traduzir um cumprimento coerente relativamente ao planeado (Pimentel, 2006). De acordo com Malico (2023), "(...) o PAA é alimentado pelas diversas UOS que espelham todas as necessidades existentes. É primordial para obter a devida fundamentação dos valores a incluir na proposta do orçamento".

Partindo de uma visão genérica e de nível estratégico para um âmbito mais específico, o PAA pode-se decompor por quatro níveis hierárquicos organizados de forma descendente, isto é: os Objetivos, as Atividades, ambas da responsabilidade do CEMFA, as Ações e os Elementos de Ação (EA), da responsabilidade dos Órgãos e Serviços da Macroestrutura (Pimentel, 2006).

A hierarquia anteriormente descrita revela-se importante na identificação de onde se encontra a ser executado o orçamento da FA, permitindo quantificar a expressão orçamental de cada um dos Objetivos e Atividades.

3.3. Objeto de estudo

De acordo com Pimentel (2006), o SIG é um sistema visto como elemento importante a nível estratégico devido ao poder de integração das diferentes componentes da organização, que tem como fim máximo a otimização e equilíbrio de forma dinâmica dos recursos da FA. Uma das grandes inovações deste sistema foi a integração e envolvimento das diferentes áreas, tais como a área do planeamento e orçamentação (Pereira, 2010). O entrevistado acrescenta que "o SIG é a principal ferramenta no planeamento orçamental (...) através dos dados carregados em SIG, é possível analisar, quantificar e mensurar as necessidades previstas da FA".

O SIG, enquanto sistema de toda organização, tem a capacidade de efetuar validações/bloqueios de forma automática nas diversas funções que nele se podem realizar. No entanto, sempre que é elaborado um processo de contratação com o respetivo Número de Processo de Despesa (NPD) associado, pertencente a um EA, mesmo que este vá exceder o valor máximo previsto para esse EA, o SIG deixa prosseguir, o que põe em causa o planeamento previamente elaborado, uma vez que "(...) deveria ser dado um aviso ao utilizador. Desta forma

o utilizador ficaria ciente de que o planeamento não está ajustado à previsão de execução (...) O montante dos EA deve acompanhar a previsão da despesa" (Malico, 2023).

Executar o planeamento conforme o que é planeado é a situação ideal. Porém, quer por razões inopinadas, ou até pela própria natureza da organização, a gestão do orçamento deverá ser sempre adaptada ao contexto real, sendo necessária flexibilidade para que se obtenham os melhores resultados possíveis.

> O PAA é dinâmico e vai sendo ajustado conforme as necessidades reais. Por exemplo, durante a execução do orçamento surgem despesas inopinadas que não se encontravam contempladas no PAA. Esta despesa inopinada vai ter impacto em pelo menos um outro EA, ou seja, o valor anteriormente previsto vai ter de ser reduzido ou anulado. Caso um EA ultrapasse o montante inicialmente previsto é porque um ou mais EA vão deixar de ser financiados ou pelo menos sofrer reduções. Quando situações destas acontecem, na minha opinião, a decisão deve ser casuística, ou seja, deve ser feita uma avaliação das prioridades existentes e no momento tomar a decisão que se julgue mais vantajosa. Um PAA atualizado e fidedigno é uma ferramenta bastante útil no apoio à tomada de decisão"
>
> In Malico (2023).

A adoção de técnicas de IA, como ferramentas de complemento/ajuda no trabalho dos militares nesta área, isto é, na melhor gestão do estado dos EA, bem como na otimização da capacidade de previsão das necessidades de cada EA, poderá ser tida como uma vantagem a nível da gestão e do controlo da mesma.

Em suma, nunca retirando importância ao facto de possuir um planeamento flexível, mas numa busca constante por aperfeiçoamento e planeamento cada vez mais próximo, refletindo a realidade da organização, o propósito deste trabalho será a aplicação de um método de ML para prever que EA terão maior propensão para entrar em desvio, isto é, apresentar maior execução do que o que estava previamente planeado, mostrando que as tecnologias de IA emergentes poderão ser uma ferramenta útil, quer para gestão orçamental da FA, quer para o seu próprio controlo.

4. Metodologia e amostra

A metodologia utilizada foi a *action research* (Williamson, 2002), que tem o propósito de gerar mudanças práticas, criando simultaneamente conhecimento, tornando-se útil para pesquisas exploratórias com o objetivo de implementar melhorias na prática ou propor novas soluções para eventuais falhas existentes.

4.1. Método de recolha de dados

Para recolha de dados do presente trabalho utilizou-se uma abordagem mista (quantitativa e qualitativa), através da realização de duas entrevistas, e de uma aplicação prática de técnicas de ML aos dados recolhidos na organização. O objetivo das entrevistas foi o de reforçar quer a viabilidade de aplicação de sistemas de IA no controlo do planeamento orçamental da FA (identificando possíveis oportunidades para a sua utilização), quer os resultados obtidos da análise quantitativa, dando-lhes assim robustez. O guião das entrevistas pode ser solicitado via e-mail.

Numa fase inicial, foi realizada uma entrevista não estruturada, num âmbito exploratório, para melhor entender de que forma se poderia inserir esta temática na organização, e de que maneira poderia ser uma mais-valia a nível da eficiência dos seus processos, colmatando uma eventual necessidade ou melhorando processos existentes, tendo em vista a otimização do

controlo interno da organização. A entrevista foi realizada ao chefe da Sub-Repartição de Planeamento e Controlo Orçamental, e por restrições temporais e de agenda, foi realizada via e-mail. Tendo em vista a consolidação e robustez de resultados e conclusões, foi ainda realizada outra entrevista numa fase final do trabalho à mesma entidade, também esta não estruturada, realizada presencialmente, com a duração de, aproximadamente, uma hora, tendo sido gravada e, posteriormente, transcrita.

4.2. Descrição da amostra

Os dados destinados à análise prática focaram-se no período compreendido entre 2020 e 2022, inclusive, tendo sido extraídos do SIG, mais concretamente, através dos mapas de Execução por NPD, que permitem obter informação acerca dos parâmetros de cada processo de contratação (de bens e serviços) da FA e Execução por EA, que fornece uma imagem da informação geral dos EA e da sua execução. Posteriormente, este conjunto de dados foi aprimorado e tratado no sentido de se construir um único mapa que relacionasse e combinasse a informação de forma completa e organizada para o fim pretendido e para a análise através do software *Anaconda*, uma plataforma de análise de dados e computação na linguagem *Python,* mais propriamente com recurso ao ambiente de desenvolvimento integrado *Spyder*.

De todos os parâmetros possíveis de serem extraídos do sistema, filtraram-se aqueles considerados relevantes para este tipo de análise. Assim, após organizado, o mapa resultante permitia observar todos os processos realizados nos anos em questão, onde para cada um deles, havia informação do respetivo NPD, da sua data de criação, da forma de adjudicação do procedimento, a económica de despesa, o valor dos seus cabimentos, compromissos e pagamentos e do EA a que correspondiam com a respetiva descrição. Paralelamente, para cada EA associado, foi adicionada informação acerca do valor "teto" suposto, da soma dos cabimentos, compromissos e despesa processada dos processos nele inserido, bem como do valor não processado (dado pela diferença do que seria suposto ser o teto, com o que efetivamente foi executado).

Após o processo de tratamento e limpeza de dados provenientes do sistema da FA, foi adicionada uma coluna correspondente a uma variável *target* binária, isto é, que para cada linha de dados, apenas poderia assumir o rótulo "Sim/Não", consoante o sinal da despesa não processada correspondente. Se para um dado EA existia um valor de desvio negativo (entre o limite previsto do EA e o real), a variável assumia o rótulo "Sim". Caso contrário, se o desvio apresentado fosse positivo, a variável assumia o rótulo "Não".

Depois de limpos e tratados os dados, foram contabilizados um total de 56.056 processos, de entre os quais: 11 formas de adjudicação distintas, onde o Ajuste Direto foi a mais observada; 505 económicas de despesa, onde a económica "02.01.21.17" referente a outros bens de vida corrente e funcionamento normal (Decreto-Lei nº26/2002 de 14 de fevereiro) foi a com maior representatividade; 3265 EA, nos quais o mais utilizado foi o correspondente a "FCC - Aquisição de material diverso"; 7 anos de criação de NPD diferentes, na qual o ano mais frequente foi 2021; 12 meses, com preponderância para o mês de novembro; 7 dias, apresentando uma maior frequência na quarta-feira; 2 variáveis *target*, com maior frequência no rótulo "Não", ou seja, os dados apresentaram mais desvios positivos.

Além das varáveis categóricas, as variáveis numéricas utilizadas foram referentes aos cabimentos realizados e aos desvios, explicados anteriormente. A diferença observada entre as observações dos cabimentos (56.048) e as observações das restantes variáveis deveu-se ao facto de que em toda a amostra, em 8 processos, verificou-se a inexistência desse campo.

4.3. Método de análise

Após a preparação dos dados para aplicações de ML, na aprendizagem supervisionada, é necessário dividi-los em conjuntos de treino e teste (Joseph, 2022; Liu & Cocea, 2017). Baseado numa análise estatística que avalia diferentes divisões de dados e o seu impacto no desempenho dos modelos de ML, concluiu-se que a proporção de 70/30 é a mais adequada para o treino e validação dos modelos (Nguyen et. Al, 2021). Por essa razão, adotou-se essa divisão, aleatoriamente, onde 70% corresponde ao conjunto de treino para ensinar o algoritmo e 30% ao conjunto de teste, para fazer as previsões. Partindo dos resultados das previsões, estes são comparados com as ocorrências reais para que se percebam e avaliem os modelos testados (Joseph, 2022).

A avaliação de performance de classificadores que foi tida em consideração, tendo em conta a literatura, baseou-se na *Confusion Matrix* (Figura 2). Através desta matriz pode entender-se a relação entre as observações reais e esperadas, percebendo quais foram ou não classificadas corretamente: TP são o número de casos positivos classificados corretamente como positivos; TN são o número de casos negativos classificados corretamente como negativos; FP são o número de casos negativos classificados erradamente como positivos (erro tipo I); FN são o número de casos positivos classificados de forma errada como negativos (erro tipo II).

Partindo dos fatores subjacentes à matriz, apresentam-se, seguidamente, as três principais métricas que poderão ser calculadas (Wei & Dunbrack, 2013; Strauss et. Al, 2022).

N = % teste da Amostra (N = 16.815)		Valores Reais	
		Positivo	Negativo
Valores Previstos	Positivo	Positivo Verdadeiro **(TP)**	Positivo Falso **(FP)**
	Negativo	Negativo Falso **(FN)**	Negativo Verdadeiro **(TN)**

Figura 2: Representação *Confusion Matrix*
Fonte: Adaptado de Visa et. Al (2011)

(1) $$Accuracy = \frac{Número\ de\ previsões\ corretas}{Número\ total\ de\ previsões} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$$

A accuracy, que mede a frequência com que um modelo de ML consegue prever corretamente os valores verdadeiros, refletindo a sua capacidade de classificar corretamente os dados, e naturalmente, quanto maior for o valor, melhor a performance do modelo.

(2) $$Precision = \frac{True\ Positives}{Total\ de\ positivos\ previstos} = \frac{TP}{TP+FP}$$

Relativamente à *precision*, é uma métrica que avalia a frequência de acertos do modelo na classe positiva verdadeira (81), isto é, quanto mais frequentemente o modelo prevê de forma correta a variável *target,* mais perto de 1 se encontrará este fator.

(3) $$Recall = \frac{True\ Positives}{Total\ de\ positivos\ reais} = \frac{TP}{TP+FN}$$

Por último, através da medida dada pela *recall,* é medida, efetivamente, a frequência de previsões positivas corretas, de entre todas as ocorrências positivas reais (Strauss et. Al, 2022). É medido numa escala entre 0 e 1, e quanto maior for o seu valor, melhor será o modelo.

Baseado nas 3 equações de medição, o objetivo foi avaliar estas métricas sobre 3 modelos distintos (*decision tree, random forest e Xgboost*), comparando-os posteriormente para entender qual teria o melhor rendimento. Além disso, foram criados dois cenários distintos, diferindo na variável explicativa "EA", por forma a entender o peso da inclusão ou não da mesma.

5. Análise de resultados

5.1. Cenário 1 da previsão

No primeiro cenário, o objetivo consiste em perceber o comportamento da variável *target* (desvio: sim / não) em função do dia semana, mês, ano, forma de adjudicação e cabimentos.

Tabela 1: Resultados de *performance* dos três modelos (cenário 1)

	Previsão *Decision Tree*		Previsão *Random Forest*		Previsão X*gboost*	
	Não desvio	Desvio	Não desvio	Desvio	Não desvio	Desvio
Não desvio real	8085	2361	7911	2535	9360	1086
Desvio real	3864	2505	3618	2751	4599	1770
Accuracy	0,63		0,63		0,66	
Precision	0,51		0,52		0,62	
Recall	0,39		0,43		0,28	

Fonte: *outputs* do *Spyder*

De acordo com o extraído do sistema (Tabela 1): para o modelo de *decision tree*, o modelo previu de forma correta a existência de 2505 desvios (TP) e de 8085 não desvios (TN), e de forma incorreta a existência de 2361 desvios (FP) e de 3864 não desvios (FN); para o modelo de *random forest*, o modelo previu de forma correta a existência de 2751 desvios (TP) e de 7911 não desvios (TN), e de forma incorreta a existência de 2535 desvios (FP) e de 3618 não desvios (FN); para o modelo de *xgboost*, o modelo previu de forma correta a existência de 1770 desvios (TP) e de 9360 não desvios (TN), e de forma incorreta a existência de 1086 desvios (FP) e de 4599 não desvios (FN).

Partindo da informação fornecida pela Tabela I, e utilizando as equações de medição, obtiveram-se os seguintes parâmetros: (1) *Accuracy* = 63% para o modelo *decision tree* e *random forest*, e 66% para o modelo *xgboost*, valores esses que representam a percentagem de previsões corretas dos valores verdadeiros, não se revelando significativos, apesar da ligeira melhoria no terceiro modelo; (2) *Precision* = 51% para o modelo *decision tree*, 52% para o modelo *random forest* e 62% para o modelo *xgboost*, valores cujo significado reflete a taxa de acertos na classe positiva verdadeira, apresentando um melhor resultado no último modelo, no entanto, ainda insatisfatório; (3) *Recall* = 39% no modelo *decision tree*, 43% no modelo *random forest* e 28% no modelo *xgboost*, medidas estas que fornecem informação acerca da taxa de acerto efetiva na classe positiva, isto é, na previsão da existência de desvios, e que por isso, não se revelam resultados sólidos e convincentes, não se apresentando nenhum deles acima dos 50%.

Em jeito comparativo, neste primeiro cenário, aquele que teve uma *accuracy* e *precision* superiores foi o *xgboost* (66% e 62%, respetivamente), no entanto, no que toca a falar do

parâmetro *recall*, este modelo foi o que apresentou pior resultado (28%). Quanto aos modelos de *decision tree* e *random forest*, de forma geral, apresentaram rendimentos semelhantes entre si, ligeiramente abaixo do *xgboost*, apesar dos valores de *recall* mais favoráveis.

Por fim, para cada um dos cenários foi realizada uma análise acerca dos pesos de cada variável no resultado da previsão da variável *target,* para o modelo considerado mais adequado (que neste caso foi o *xgboost*, pelas razões explicadas anteriormente), que permitiu observar quais variáveis são mais influentes, isto é, quais das características de um processo melhor conseguem explicar o *output* da previsão. Assim, para uma análise onde se procura explicar e prever a deteção de desvios, tendo por base as variáveis dia, mês, ano, forma de adjudicação e cabimentos, concluiu-se que as variáveis explicativas com maior preponderância seriam: o mês de julho, destacando-se das demais, com uma importância relativa de, aproximadamente, 22,1%, seguindo-se os meses de agosto e janeiro, com uma influência de cerca de 8,6% e 7,4%, respetivamente. O ano com maior interferência nos resultados, seria o ano de 2020, com cerca de 4,8%.

5.2. Cenário 2 da Previsão

No segundo cenário, o objetivo consiste em perceber o comportamento da variável *target* (desvio: sim / não), tal como no cenário anterior, mas desta vez, em função do dia, mês, ano, forma de adjudicação, cabimentos e elemento de ação. Analisando os resultados obtidos através do *software* utilizado, é possível extrair as seguintes informações (Tabela 2): no modelo *decision tree*, este previu de forma correta a existência de 6074 desvios (TP) e de 10.370 não desvios (TN), e de forma incorreta a existência de 76 desvios (FP) e de 295 não desvios (FN); para o modelo de *random forest*, o modelo previu de forma correta a existência de 5800 desvios (TP) e de 10.424 não desvios (TN), e de forma incorreta a existência de 22 desvios (FP) e de 569 não desvios (FN); no modelo de *xgboost*, previu-se de forma correta a existência de 4318 desvios (TP) e de 10.438 não desvios (TN), e de forma incorreta a existência de 8 desvios (FP) e de 2051 não desvios (FN).

Tabela 2: Resultados de *performance* dos três modelos (cenário 2)

	Previsão *Decision Tree*		Previsão *Random Forest*		Previsão *Xgboost*	
	Não desvio	Desvio	Não desvio	Desvio	Não desvio	Desvio
Não desvio real	10.370	76	10.424	22	10.438	8
Desvio real	295	6074	569	5800	2051	4318
Accuracy	0,98		0,96		0,88	
Precision	0,99		1,00		1,00	
Recall	0,95		0,91		0,68	

Fonte: *Outputs* do *Spyder*

Partindo da informação fornecida pela Tabela 2, e utilizando as equações de medição, obtiveram-se os seguintes parâmetros: (1) *Accuracy* = 98% para o modelo *decision tree*, 96% para o modelo *random forest* e 88% para o modelo *xgboost*, valores esses que representam a percentagem de previsões corretas dos valores verdadeiros, revelando-se resultados bastante significativos, apesar do decréscimo no terceiro modelo; (2) *Precision* = 99% para o modelo *decision tree*, 100% para o modelo *random forest* e 100% para o modelo *xgboost*, valores cujo significado reflete a taxa de acertos na classe positiva verdadeira, apresentando resultados, aparentemente, perfeitos nos dois últimos modelos, e muito semelhante no primeiro modelo; (3)

Recall = 95% no modelo *decision tree*, 91% no modelo *random forest* e 68% no modelo *xgboost*, medidas estas que fornecem informação acerca da taxa de acerto efetiva na classe positiva, isto é, na previsão da existência de desvios, e que por isso, se revelam resultados significativos nos dois primeiros modelos, e irrelevante no modelo *xgboost*.

Combinando os três modelos, para o segundo cenário, foi possível entender que, neste caso, os modelos de *decison tree* e *random forest* foram aqueles onde a *accuracy* se destacou pela positiva, com 98% e 96%, respetivamente. No que à *precision* diz respeito, os três modelos apresentaram valores muito próximos entre si, sendo que aquele onde o valor foi inferior foi a *decision tree* com 99%, tendo os restantes modelos alcançado valores de 100%. Concluindo, ao nível da *recall*, o modelo *xgboost* foi o que teve pior performance (68%), sendo que, nos restantes, os valores foram significativamente superiores, com o modelo *random forest* a alcançar resultados de 91%, e 95% para o modelo de *decision tree*. Em suma, pelas características descritas anteriormente, considerou-se que o modelo mais adequado e que apresentava melhor performance de classificação no conjunto dos três parâmetros era o modelo de *decision tree*.

Para finalizar, foi realizada, tal como no cenário anterior, uma análise que permitisse perceber o peso de cada variável na previsão da variável *target*, utilizando o modelo que se considerou mais adequado (*decision tree*) neste segundo cenário, que difere do primeiro pela inclusão dos EA. Posto isto, para uma análise desta natureza, com o intuito de prever a existência de desvios, considerando as variáveis dia, mês, ano, forma de adjudicação, cabimentos e EA, foi possível aferir que as variáveis explicativas de maior notoriedade e que maior peso explicativo poderiam ter na classificação da existência ou não de desvios foi o ano de criação dos processos, em que a criação de NPDs nos anos de 2022 e 2021 teriam um peso respetivo de, aproximadamente, 8,1% e 6,2%. Ainda assim, na grande maioria, o que melhor poderá explicar a ocorrência de desvios serão os próprios elementos de ação.

Da observação da Tabela III, pode depreender-se a presença significativa de EA correspondentes a bens e serviços para funcionamento corrente das UOS (FCC), que combinados, apresentam um peso preditivo de, aproximadamente, 9,33%.

> É possível verificar que existem EA que são relevantes e explicativos, mesmo que em diferentes centros financeiros (...) por exemplo, neste caso, observa-se que o EA tido como um dos mais relevantes, com o descritivo FCC, destinado a uso generalizado e material diverso, encontra-se em diferentes centros financeiros.
>
> In Malico (2023).

Assinalável é também a importância que os materiais e equipamentos oficinais e de laboratório, incluindo serviços externos (MTO), poderão ter no cumprimento ou não do orçamento estabelecido, uma vez que, de forma individual, apresentam um peso explicativo na variável *target* de cerca de 3,2%.

É ainda possível destacar, como potenciais EA propensos a entrar em desvio, os relativos à aquisição de mobiliário e equipamentos de bens diversos (MEQ), e os relativos ao plano de cursos e missões no estrangeiro (PCME), quer do Comando Aéreo, quer do Vice-CEMFA. Relativamente aos relativos ao PCME, entende-se a sua presença no TOP10 devido ao facto de que não existe um planeamento para estes espelhado em sistema, pelo que tudo o que seja executado, surge como ultrapassando o seu limite, o que, naturalmente, originará um desvio.

Tabela 3: Top10 dos EA com maior peso explicativo na previsão de ocorrência de desvios

EA	Descrição do EA	Peso Explicativo
4050118014	FCC – Assegurar bens de uso generalizado	3,89%
4060116043	MTO – Aquisição de Material Diverso	3,20%
4060116044	FCC – Aquisição de Material Diverso	2,68%
4110114007	MEQ – Fornecimento de bens inerentes à manutenção e funcionamento das infraestruturas	1,96%
4101516008	PCME – CA - Geral	1,60%
4060119007	FCC – Aquisição de Material Diverso	1,39%
4050118008	EPO – Manutenção preventiva ou inopinada das infraestruturas	1,38%
4030417040	FCC – Aquisição de outros materiais para o regular funcionamento	1,37%
4101516002	PCME – VCEMFA - GERAL	1,26%
4031117001	FND – MINUSMA - Mali	1,16%

> Não se tem dotação prevista no tocante a assuntos do PCME (...) o PCME é um centro financeiro específico, uma vez que é um plano de cursos a ser autorizado pelo General CEMFA, onde se acaba por utilizar dotação do ano anterior, e onde poderá haver alguma oscilação, relativamente a cada centro. Tanto o PCME e o PCN (plano de cursos nacionais) não estão planeados. De todo o *plafond* que é dado à FA, não é distribuído na integra às direções e unidades (...) parte dessa dotação fica numa conta que é a Previsional do CEMFA que é gerida pela DFFA, e essa dotação nasce daí, e acaba por não estar refletida no sistema.
>
> In Malico (2023).

Além dos acima referidos, pelo histórico registado, os fundos destinados a missões no Mali, fazem deste EA um alvo a ter em conta aquando da análise da ocorrência de desvios. Porém, a sua presença neste leque dos mais explicativos, dever-se-á, também, ao facto de que à semelhança dos fundos para o PCME, este também não ser planeado, uma vez que segundo Malico (2023), "(...) a dotação é atribuída pelo EMGFA (Estado-Maior General das Forças Armadas) no decorrer do próprio ano e é atribuída a dotação à FA consoante as missões que nos foram atribuídas. Portanto, não há qualquer tipo de planeamento nessas situações".

6. Conclusões

O estudo utilizou três modelos de aprendizagem supervisionada para avaliar a utilidade da IA na fase específica do planeamento orçamental da FA. O objetivo era identificar os EA com maior probabilidade de desvio com base no seu histórico e características, contribuindo para o controlo interno e otimização da distribuição de recursos, alinhando-os o melhor possível com as necessidades da organização.

Os dois cenários de previsão apresentam performances notoriamente diferentes. Para o cenário 1, o melhor modelo foi o *xgboost*, com uma *accuracy* de 66%, uma *precision* de 62% e um *recall* de 28%. Por oposição, no cenário 2, o melhor modelo foi a *decision tree*, com uma

accuracy de 98%, uma *precision* de 99% e um *recall* de 95%. A diferença entre os dois cenários deve-se à inclusão da variável "EA", que aumentou significativamente a capacidade preditiva da análise. Esse aumento é natural, pois o EA é a variável que está mais diretamente relacionada com os desvios registados. Assim, a inclusão desta variável resultou num aumento de 32% na *accuracy*, indicando a capacidade de previsão correta de desvios e não desvios; um aumento de 37% na *precision*, representando a melhoria na deteção de desvios, de entre os desvios previstos e um aumento de 67% no *recall*, refletindo a melhoria mais significativa, traduzindo-se na capacidade de o modelo prever corretamente os desvios, de entre todos os desvios reais.

Além do objetivo do trabalho, é vital considerar a realidade da organização. Sendo uma instituição militar sujeita a fatores externos imprevisíveis, é utópico prever com perfeição as suas necessidades futuras e elaborar planeamentos exímios. Portanto, ter uma ferramenta como um PAA dinâmico e flexível é fundamental para se adaptar às necessidades decorrentes de fatores incontroláveis, tal como reforçado pelo entrevistado: “deve-se destacar a importância de tentar prever com cada vez mais precisão, no entanto, poder ter a ferramenta de conseguir alterar as previsões conforme as necessidades”. Até hoje, a escassez de dados foi um obstáculo ao desenvolvimento da IA. No entanto, no mundo digital atual, os dados são abundantes nas organizações, não sendo a FA uma exceção, impulsionando a IA a atingir o seu potencial. Conforme mencionado por Butz (2021), sistemas de inteligência deste nível poderão recomendar planos flexíveis e adaptáveis para alcançar as metas das instituições.

Além de EA destinados a campos onde o planeamento não é espelhado, denotou-se uma forte presença de EA referentes a despesas mais gerais e de funcionamento corrente das UOS.

Contudo, para todas as despesas do normal funcionamento corrente da organização, devem-se mitigar ao máximo os desvios registados, procurando ter cada vez mais proximidade e assertividade no estabelecimento daqueles que são os recursos destinados a cada EA, onde o entrevistado acrescenta,

> Esta análise aplicar-se-ia muito bem, ou ajudaria mais ao nível das unidades. (...) conseguir-se-ia ter um planeamento mais ajustado para o ano seguinte, num nível micro, talvez ao nível de uma unidade, onde existe uma estrutura montada e em que a realidade não foge muito à normalidade. A um nível macro, surgem processos inesperados e de grande dimensão (compra de aeronaves, por exemplo), e onde se tem de reservar orçamento para essas situações (...) Numa unidade tem-se um orçamento para manter a unidade e o seu normal funcionamento, o que vai de encontro aos EA mais diversos.
>
> In Malico (2023).

Conforme indicado na literatura, a aplicação de técnicas de IA na auditoria supera os modelos tradicionais (28), melhorando a sua eficácia e a eficiência (29). Isso resulta em resoluções mais rápidas e precisas, reduzindo a carga de trabalho e o tempo necessários, proporcionando uma melhoria notável no controlo interno das organizações (28). O entrevistado aponta que, atualmente,

> Para saber a previsão para anos seguintes, tem de se pegar no histórico, no âmbito daquilo que se quer analisar. (...) Os mapas extraídos do sistema dão muita informação e o próprio sistema também, no entanto, são números que apenas dão uma ideia, sendo um método rudimentar de previsão (...) outro problema é a falta de meios e recursos humanos, pois, ainda que rudimentar, requer tempo e pessoas empenhadas.
>
> In Malico (2023).

Neste caso concreto, no cenário 1, o sistema apenas precisou de, aproximadamente, 10 segundos para fazer as suas previsões, e relativamente ao cenário 2, com a inclusão da variável "EA", que naturalmente tornou as previsões mais complexas, o sistema apenas precisou de cerca de 3 minutos, levando a crer que a sua aplicação poderia ser uma mais-valia, indo ao encontro de alguns problemas apontados. Perante o exposto acerca do funcionamento e apresentação de uma solução desta natureza, a visão do entrevistado, suportando a utilidade de modelos preditivos aplicados na FA, é de que:

> Tendo por base o tipo de tecnologias abordadas, creio que as mesmas são úteis para fazer o acompanhamento da execução orçamental, uma vez que, consoante várias variáveis, tais como, o tipo de procedimento adotado, o estado em que o processo de despesa se encontra, previsão de entrega dos bens ou prestação de serviço, entre outros, seria obtido o grau de probabilidade de ocorrer a execução orçamental pretendida. Na prática, a sua aplicação poderia ser traduzida para os seguintes fins: (...) dar prioridade a ações necessárias a nível interno (despacho da informação de início de procedimentos, despacho da informação de adjudicação, assinatura de contrato, remessa ao TC de um contrato para fiscalização prévia, entre outros); não iniciar um processo de despesa com execução para o próprio ano onde um grau de probabilidade de execução seja manifestamente baixa traduzindo-se em ineficácia; agilizar perante o fornecedor a entrega dos bens ou a prestação de serviços.
>
> In Malico (2023).

Segundo Garcia (2020), a qualidade dos dados é crucial para o desempenho de um sistema, pois é através deles que se identificam padrões e gera conhecimento. Portanto, antes de usar um código de ML, é fundamental realizar uma preparação rigorosa dos dados para evitar enviesamentos ou preconceitos de quem os realiza, a fim de garantir que o código não aprende com esses erros e não os perpetua nos resultados da aplicação em novos casos. No contexto da FA, o principal desafio não seria a aplicação de algoritmos de ML, mas sim a preparação dos dados. Na organização, existem profissionais qualificados para tarefas deste tipo, e até mesmo para tarefas mais complexas no mesmo âmbito, que em colaboração com *players* de auditoria e planeamento orçamental, teriam capacidade suficiente para esta tipologia de análises. Quanto aos custos, contando com um computador funcional e acesso a *softwares* de programação, não haveria despesas adicionais, pois esses *softwares* estão disponíveis *online,* e dependendo das necessidades, podem ser instalados sem custos. O verdadeiro desafio reside na preparação dos dados para serem usados pelos algoritmos. Isso envolve todo o processo, desde a extração até a disponibilização dos dados para serem corridos por algoritmos. É essencial que os critérios de preenchimento dos dados sejam rigorosos e representem fielmente a realidade, sem lacunas, falhas de informação ou erros. Para alcançar isso, é crucial manter as equipas comprometidas (Newmark et. Al, 2018) e motivadas na adoção da IA, ano após ano.

No seguimento da ideia anterior, será importante salientar que este estudo terá sempre de ser aplicado com cautela e analisado à luz da conjuntura em que é realizado, pois devido a alterações estruturais no PAA, poderia originar-se repetição de EA, caso fosse realizada uma análise que incluísse os anos de 2023 e 2024, por exemplo, dado que

> Os EA, vêm da Diretiva Estratégica da FA. Devido às recentes alterações, a nova estrutura do PAA já foi utilizada para fazer o carregamento da Proposta Orçamental para 2024 (...) se fosse realizada uma análise que incluísse os anos pré e pós 2024, iria verificar-se a existência de EA em duplicado, devido à mudança de estrutura.
>
> In Malico (2023).

Referências bibliográficas

Abdelraheem, A., Hussaien, A., Mohammed, M., & Elbokhari, Y. (2021). The effect of information technology on the quality of accounting information. Accounting, 7(1), 191-196.

Abdolmohammadi, M. J. (1991). Factors affecting auditors' perceptions of applicable decision aids for various audit tasks. Contemporary Accounting Research, 7(2), 535-548.

Aggarwal, K., Mijwil, M. M., Al-Mistarehi, A. H., Alomari, S., Gök, M., Alaabdin, A. M. Z., & Abdulrhman, S. H. (2022). Has the future started? The current growth of artificial intelligence, machine learning, and deep learning. Iraqi Journal for Computer Science and Mathematics, 3(1), 115-123.

Alpaydin, E. (2014). Introduction to Machine Learning.

Baldwin, A. A., Brown, C. E., & Trinkle, B. S. (2006). Opportunities for artificial intelligence development in the accounting domain: the case for auditing. Intelligent Systems in Accounting, Finance & Management: International Journal, 14(3), 77-86.

Bao, Y., Ke, B., Li, B., Yu, Y. J., & Zhang, J. (2020). Detecting accounting fraud in publicly traded US firms using a machine learning approach. Journal of Accounting Research, 58(1), 199-235.

Bertomeu, J. (2020). Machine learning improves accounting: Discussion, implementation and research opportunities. Review of Accounting Studies, 25(3), 1135-1155.

Bertomeu, J., Cheynel, E., Floyd, E., & Pan, W. (2021). Using machine learning to detect misstatements. Review of Accounting Studies, 26, 468-519.

Borana, J. (2016). Applications of artificial intelligence & associated technologies. Science [ETEBMS-2016], 5(6).

Bostrom, N. (2014). Get ready for the dawn of superintelligence. New Scientist, 223(2976), 26-27.

Breiman, L. (2001b). Random forests. Machine learning, 45, 5-32.

Brown, S. (2021). Machine learning, explained. MIT Sloan management.

Butz, M. V. (2021). Towards strong AI. KI-Künstliche Intelligenz, 35(1), 91-101.

Carlson, E. D. (1983). An approach for designing decision support systems. In A. Abdolmohammadi, Decision support and expert systems in auditing: A review and research directions, 1987. Accounting and Business Research, 173–185.

Cecchini, M., Aytug, H., Koehler, G. J., & Pathak, P. (2010). Detecting management fraud in public companies. Management Science, 56(7), 1146-1160.

Chen, G. F., & Ni, H. (2020). Application prospect of blockchain technology in water resources management. J. Water conservancy and Hydropower Technology, 6, 11-16.

Chen, T., & Guestrin, C. (2016, August). Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining (pp. 785-794).

Chiu, C. T., & Scott, R. (1994). An intelligent forecasting support system in auditing: expert system and neural network approach. In 1994 Proceedings of the Twenty-Seventh Hawaii International Conference on System Sciences.

Davenport, T. H., & Kirby, J. (2016). Just how smart are smart machines?

Davis, E., & Marcus, G. (2015). Commonsense reasoning and commonsense knowledge in artificial intelligence. Communications of the ACM, 58(9), 92-103.

Davis, J. T., Massey, A. P., & Lovell II, R. E. (1997). Supporting a complex audit judgment task: An expert network approach. European Journal of Operational Research, 103(2), 350-372.

Decreto-lei n.º 187/2014, de 29 de dezembro - Lei Orgânica da Força Aérea, Diário da República: Série I.

Decreto-Lei nº26/2002 de 14 de fevereiro

Despacho nº52/2008 de 30 de setembro, que determina o ciclo anual de planeamento e orçamento (CAPO)

Dhage, S. N., & Raina, C. K. (2016). A Review on Machine Learning Techniques. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 4(3).

Dickey, G., Blanke, S., & Seaton, L. (2019). Machine learning in auditing. The CPA Journal, 89(6), 16-21.

Dietterich, T. G. (1998). Approximate statistical tests for comparing supervised classification learning algorithms. Neural computation, 10(7), 1895-1923.

Ding, K., Lev, B., Peng, X., Sun, T., & Vasarhelyi, M. A. (2020). Machine learning improves accounting estimates: Evidence from insurance payments. Review of accounting studies, 25, 1098-1134

Dutta, I., Dutta, S., & Raahemi, B. (2017). Detecting financial restatements using data mining techniques. Expert Systems with Applications, 90, 374-393.

Elliot, V. H., Paananen, M., & Staron, M. (2020). Artificial intelligence for decision-makers. Journal of Emerging Technologies in Accounting, 17(1), 51-55.

Faceli, K., Lorena, A. C., Gama, J., Almeida, T. A. D., & Carvalho, A. C. P. D. L. F. D. (2021). Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina.

Força Aérea (2016). RFA 425-3. Regulamento das Auditorias de Administração Financeira e Patrimonial da Direção de Finanças da Força Aérea. Alfragide: Força Aérea.

Força Aérea Portuguesa (2013). RFA 303-10 (A). Organização e normas de funcionamento da Direção de Finanças da Força Aérea. Alfragide: Força Aérea.

Força Aérea Portuguesa (2022). Diretiva de Planeamento Estratégico da Força Aérea 2022-2025.

Força Aérea Portuguesa (2022). Instrução n.º 1 do Serviço Administrativo e Financeiro.

Força Aérea Portuguesa (2022). Plano Anual de Atividades 2023.

Gama, J., Carvalho, A. D. L., Faceli, K., Lorena, A. C., & Oliveira, M. (2017). Extração de Conhecimento de Dados.

Garcia, A. C. (2020). Ética e inteligencia artificial. Computação Brasil, (43), 14-22.

Gartner. (2019). Gartner Survey Shows 37 Percent of Organizations Have Implemented AI in Some Form.

Gentry, J. A., Shaw, M. J., Tessmer, A. C., & Whitford, D. T. (2002). Using inductive learning to predict bankruptcy. Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce, 12(1), 39-57.

Goertzel, B. (2007). Human-level artificial general intelligence and the possibility of a technological singularity: A reaction to Ray Kurzweil's The Singularity Is Near, and McDermott's critique of Kurzweil. Artificial Intelligence, 171(18), 1161-1173.

Greenman, C. (2017). Exploring the impact of artificial intelligence on the accounting profession. Journal of Research in Business, Economics and Management, 8(3), 1451.

Hunt, E., J. & Richardson, V. (2019). Predicting Accounting Misstatements Using Machine Learning. Mississippi State University. Working paper.

Iansiti, M., & Lakhani, K. R. (2020). Competing in the age of AI: Strategy and leadership when algorithms and networks run the world. Harvard Business Press.

IBM Cloud Education. (2020). Strong AI.

Janvrin, D., Bierstaker, J., & Lowe, D. J. (2008). An examination of audit information technology use and perceived importance. Accounting horizons, 22(1), 1-21.

Joseph, V. R. (2022). Optimal ratio for data splitting. Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal, 15(4), 531-538.

Kaelbling, L. P., Littman, M. L., & Moore, A. W. (1996). Reinforcement learning: A survey. Journal of artificial intelligence research, 4, 237-285.

Kaplan, A., & Haenlein, M. (2019). Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. Business horizons, 62(1), 15-25.

Kokina, J., & Davenport, T. H. (2017). The emergence of artificial intelligence: How automation is changing auditing. Journal of emerging technologies in accounting, 14(1), 115-122.

Kotsiantis, S. B., Zaharakis, I., & Pintelas, P. (2007). Supervised machine learning: A review of classification techniques. Emerging artificial intelligence applications in computer engineering, 160(1), 3-24

Kurzweil, R. (2014). The singularity is near (pp. 393-406). Palgrave Macmillan UK.

Lake, B. M., Ullman, T. D., Tenenbaum, J. B., & Gershman, S. J. (2017). Building machines that learn and think like people. Behavioral and brain sciences, 40, e253.

Law, K., & Shen, M. (2020). How does artificial intelligence shape the audit industry. Available at SSRN.

Lei n.º 8/90, de 20 de fevereiro - Lei de Bases da Contabilidade Pública, Diário da República: Série I.

Lenard, M. J., Madey, G. R., & Alam, P. (1998). The design and validation of a hybrid information system for the auditor's going concern decision. Journal of Management Information Systems, 14(4), 219-237.

Lensberg, T., Eilifsen, A., & McKee, T. E. (2006). Bankruptcy theory development and classification via genetic programming. European Journal of operational research, 169(2), 677-697.

Levesque, H. J. (2017). Common sense, the Turing test, and the quest for real AI. mit press.

Li, Y. (2017). Deep reinforcement learning: An overview. arXiv preprint arXiv:1701.07274.

Liu, H., & Cocea, M. (2017). Semi-random partitioning of data into training and test sets in granular computing context. Granular Computing, 2, 357-386.

Maimon, O. Z., & Rokach, L. (2014). Data mining with decision trees: theory and applications (Vol. 81). World scientific.

Minsky, M. (2007). The emotion machine: Commonsense thinking, artificial intelligence, and the future of the human mind. Simon and Schuster.

Nasteski, V. (2017). An overview of the supervised machine learning methods. Horizons. b, 4, 51-62.

Newmark, R. I., Dickey, G., & Wilcox, W. E. (2018). Agility in audit: Could scrum improve the audit process?. Current Issues in Auditing, 12(1), A18-A28.

Nguyen, Q. H., Ly, H. B., Ho, L. S., Al-Ansari, N., Le, H. V., Tran, V. Q., ... & Pham, B. T. (2021). Influence of data splitting on performance of machine learning models in prediction of shear strength of soil. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 1-15.

Oladipupo, T. (2010). Types of machine learning algorithms. New Advances in Machine Learning.

Omoteso, K. (2012). The application of artificial intelligence in auditing: Looking back to the future. Expert Systems with Applications, 39(9), 8490-8495.

Osisanwo, F. Y., Akinsola, J. E. T., Awodele, O., Hinmikaiye, J. O., Olakanmi, O., & Akinjobi, J. (2017). Supervised machine learning algorithms: classification and comparison. International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT), 48(3), 128-138.

Pereira, E. D. B. A. (2010). O papel da Orçamentação na Força Aérea Portuguesa: Diferenças e semelhanças com o sector privado (Doctoral dissertation, Instituto Superior de Economia e Gestão)

Perols, J. (2011). Financial statement fraud detection: An analysis of statistical and machine learning algorithms. Auditing: A Journal of Practice & Theory, 30(2), 19-50.

Perols, J. L., Bowen, R. M., Zimmermann, C., & Samba, B. (2017). Finding needles in a haystack: Using data analytics to improve fraud prediction. The Accounting Review, 92(2), 221-245.

Pimentel, J. M. S. (2006). O novo modelo orçamental da Força Aérea.

Raphael, J. (2017). Rethinking the audit. Journal of Accountancy, 223(4), 29-32.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 131/2021, de 10 de setembro (2021). Aprova a Estratégia para a transformação Digital da Administração Pública 2021-2026 e o respetivo Plano de Ação Transversal para a legislatura. Diário da República, 1.ª série, 177.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 55/2020, de 31 de julho (2020). Aprova a Estratégia para a Inovação e Modernização do Estado e da Administração Pública 2020-2023. Diário da República, 1.ª série, 148.

Rosner, R. L., Comunale, C. L., & Sexton, T. R. (2006). Assessing materiality. The CPA Journal, 76(6), 26.

Sabouret, N. (2020). Understanding artificial intelligence. CRC Press.

Schmidt, P. J., Church, K. S., & Riley, J. (2020). Clinging to Excel as a security blanket: Investigating accountants' resistance to emerging data analytics technology. Journal of Emerging Technologies in Accounting, 17(1), 33-39.

Schonlau, M., & Zou, R. Y. (2020). The random forest algorithm for statistical learning. The Stata Journal, 20(1), 3-29.

Shift, D. (2015, September). Technology tipping points and societal impact. In World Economic Forum Survey Report.

Shmueli, G. (2010). To explain or to predict?.

Solaimani, R., Mohammed, S., Rashed, F., & Elkelish, W. (2020). The impact of artificial intelligence on corporate control. Corporate Ownership & Control, 17(3), 171-178.

Strauss, E., Júnior, M. V. B., & Ferreira, W. L. L. (2022). A importância de utilizar as métricas adequadas de avaliação de performance em modelos preditivos de machine learning. Projectus, 7(2), 52-62.

Taborda, P. (2017). Lei de Benford–Aplicação à Força Aérea Portuguesa. Academia da Força Aérea, 167.

Tan, P. N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2013). Data mining cluster analysis: basic concepts and algorithms. Introduction to data mining, 487, 533.

Ucoglu, D. (2020a). Effects of artificial intelligence technology on accounting profession and education. Pressacademia, 11(1), 16-21.

Violante, A., & Andrade, A. (2022). O potencial da inteligência artificial na gestão. Gestão e Desenvolvimento, (30), 439-479.

Visa, S., Ramsay, B., Ralescu, A. L., & Van Der Knaap, E. (2011). Confusion matrix-based feature selection. Maics, 710(1), 120-127.

Wei, Q., & Dunbrack Jr, R. L. (2013). The role of balanced training and testing data sets for binary classifiers in bioinformatics. PloS one, 8(7), e67863.

Welch, O. J., Reeves, T. E., & Welch, S. T. (1998). Using a genetic algorithm-based classifier system for modeling auditor decision behavior in a fraud setting. Intelligent Systems in Accounting, Finance & Management, 7(3), 173-186

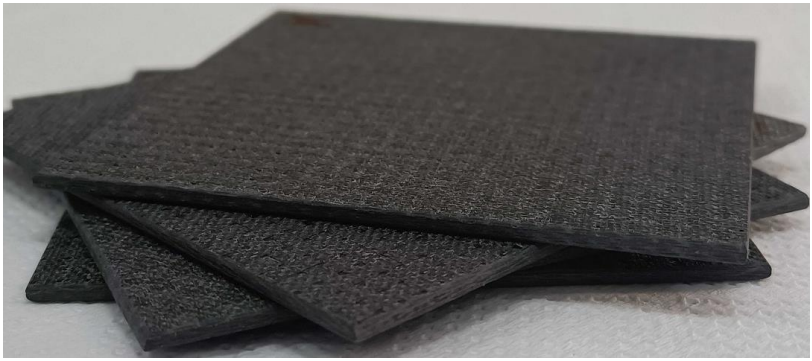
Williamson, K. (2002). Research methods for students, academics, and professionals: Information management and systems. Elsevier.

Zemánková, A. (2019). Artificial intelligence and blockchain in audit and accounting: Literature review. wseas Transactions on Business and Economics, 16(1), 568-581.

Zhou, G. (2021, March). Research on the problems of enterprise internal audit under the background of artificial intelligence. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1861, No. 1, p. 012051). IOP Publishing.

Zhu, Y., Gao, T., Fan, L., Huang, S., Edmonds, M., Liu, H., ... & Zhu, S. C. (2020). Dark, beyond deep: A paradigm shift to cognitive ai with humanlike common sense. Engineering, 6(3), 310-345.

Efeito combinado da Radiação Gama e dopagem com Grafeno em compósitos Carbono-Epóxi



Autor: ALF/PILAV Guilherme Coelho Marques
Mestrado Integrado em Aeronáutica Militar
Academia da Força Aérea, Sintra

Orientador: TCOR/ENGAED Luís Pereira
Força Aérea Portuguesa

Coorientador: Professor Doutor Luís Miguel Mota Ferreira
Campus Instituto Superior Técnico, Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares, CTN, Bobadela

Resumo: Neste estudo pretende-se analisar o efeito combinado da radiação e da dopagem de grafeno em compósitos carbono-epóxi. O objetivo é interpretar se a combinação destas técnicas referenciadas é benéfica face ao seu uso separado. Para tal foram criadas amostras de compósito carbono-epóxi com e sem grafeno, irradiadas e não irradiadas. Placas de carbono-epóxi foram produzidas através do método *wet-layup*, com dez camadas de fibra carbono bidirecionais 3K de 160g/m^2 impregnadas em resina epóxi (*Hexamatrix*) sem grafeno e dopada com 2% (wt) de nanoplaquetas de grafeno. Destas placas foram extraídos provetes, preparados de acordo com o padronizado para os ensaios, sendo expostos a diferentes doses de radiação gama. Os resultados dos ensaios de análise térmica, mecânica e elétrica demonstraram que a combinação da irradiação gama com a adição de grafeno promove o aumento de 8,24% de temperatura de degradação do compósito, sem provocar alterações na temperatura de transição vítrea do material. A combinação das técnicas teve igualmente um impacto positivo nas propriedades mecânicas do material. Foi observado um aumento de 11,53% da tensão máxima da flexão maioritariamente influenciado pela introdução de grafeno. Por fim, as propriedades elétricas, mantêm-se praticamente inalteradas, mantendo uma elevada blindagem eletromagnética, com uma eficiência de 99,999% em todas as amostras.

Palavras-chave: Compósito carbono-epóxi; Grafeno; Radiação gama; Propriedades mecânicas; Análise térmica; Blindagem eletromagnética.

1 Introdução

Ao longo dos anos, os materiais compósitos têm vindo a ser cada vez mais utilizados como substitutos de metais na indústria aeronáutica. Há evidências de que a aplicação de compósitos permite reduções de peso até 50% e reduções de custo até 20%, comparativamente ao fabrico de peças iguais com materiais metálicos. Para além disso, a redução de peso na estrutura da aeronave permite reduzir o consumo de combustível e aumentar a capacidade de carga da aeronave que, consequentemente, traduz-se num aumento da performance (Gay et al., 2003; Kukreja & Löfström, 2009).

Dos vários materiais compósitos disponíveis no mercado, destacam-se os laminados carbono-epóxi que têm uma grande aplicabilidade na indústria aeronáutica, devido à sua elevada relação resistência/peso e facilidade em assumir formas complexas (Adams, 2001). O aumento das implicações ambientais e do custo dos combustíveis tornou necessário aumentar a eficiência das aeronaves de modo a consumir menos combustível. A redução do peso da aeronave é um passo para o incremento da eficiência, pelo que a investigação e desenvolvimento de materiais compósitos com elevadas prestações funcionais é fundamental (Kesarwani, 2017).

O grafeno apresenta uma resistência mecânica consideravelmente superior à dos metais, associada a uma elevada condutividade elétrica e térmica. A investigação deste material tem tido um impacto substancial em diversas áreas. Este nanomaterial tem sido bastante usado como aditivo em compósitos carbono-epóxi promovendo o aumento da resistência mecânica (*Applications - Graphene - The University of Manchester*, 2022; Graphenest S.A., 2018). Enquanto o grafeno e a sua aplicação em materiais compósitos é relativamente recente, o processamento de polímeros com radiação gama é realizado há mais de 50 anos sendo atualmente uma técnica economicamente viável, pouco poluente e com baixo consumo de energia. A radiação ionizante, como promotor de *crosslinking*[1] na estrutura molecular de

[1] Criação de ligações covalentes cruzadas entre as cadeias longas de um polímero.

polímeros melhora as suas propriedades mecânicas, a estabilidade térmica e resistência química (Makuuchi & Cheng, 2011).

No Centro de Investigação da Academia da Força Aérea (CIAFA), os compósitos carbono-epóxi são um dos principais materiais na produção de Veículos Aéreos Não-tripulados (UAVs), levando a que a pesquisa e o desenvolvimento destes materiais seja uma prioridade para a instituição (Soares, 2021). Com este trabalho pretende-se complementar este ciclo de investigação do CIAFA avaliando em que medida a combinação de radiação gama com a introdução de grafeno em compósitos carbono-epóxi altera o comportamento mecânico, térmico e eletromagnético dos compósitos carbono-epóxi.

1.1 Objetivos

O objeto de estudo deste trabalho corresponde aos materiais compósitos carbono-epóxi dopados com nanoplaquetas de grafeno (GNPs). Este estudo visa analisar as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas de um compósito carbono-epóxi com adição de 2% (wt) GNPs na matriz, quando exposto a radiação gama de forma controlada. Desta forma, serão realizados ensaios padronizados a amostras com e sem grafeno após exposição a diferentes doses de irradiação. Esta metodologia serve para criar um ponto de comparação que permita avaliar o efeito isolado e combinado do grafeno e da irradiação gama.

2 Revisão da literatura

2.1 Materiais compósitos

No presente trabalho, serão abordados compósitos laminados de fibras contínuas com matriz polimérica, aditivados com grafeno. Nestes compósitos, as fibras são o constituinte responsável por garantir a resistência mecânica do compósito, enquanto a matriz garante a forma do material e promove transmissão de esforços entre as fibras (Adams, 2001).

O volume do compósito pode ser maioritariamente ocupado pelas fibras, as quais suportam também grande parte das cargas (Mallick, 2007). No caso das fibras de carbono, estas apresentam elevadas razões de resistência/peso, elevada rigidez e condutividade térmica. Por outro lado, têm baixa resistência ao impacto. Compósitos com fibras de carbono têm resistência à fadiga superior a praticamente todos os metais e são dos materiais mais resistentes à corrosão quando combinados com resinas adequadas (Adams, 2001).

A matriz tem a função de manter as fibras unidas, transferir a energia entre as fibras e proteger as fibras contra degradação química e mecânica. Quando o compósito é sujeito a forças de tensão a matriz garante a redistribuição de esforços, no entanto em situações de compressão é a matriz que garante suporte lateral de modo a impedir a ocorrência de fenómenos de *buckling*[2] das fibras. Para além disto, a matriz também tem a função de evitar o cisalhamento interlaminar quando o compósito é sujeito a cargas de flexão. Tendo em conta a importância da adesão entre a matriz e a fibra, é importante definir qual o tipo de matriz a escolher, consoante a finalidade do compósito (Mallick, 2007).

As resinas epóxi apresentam características únicas quando comparadas a outras resinas. Elevada resistência, adesão eficaz a imensos materiais, boa resistência química, bom isolamento elétrico e baixa toxicidade são algumas das características associadas a estas resinas, devido à sua alta densidade de *crosslinking* (Adams, 2001; Chen et al., 2004). Estas resinas epóxi são

[2] Deformação súbita de componente estrutural sobre carga.

resultado da reação da resina com um agente de cura. Após a cura, o elevado *crosslinking* na resina epóxi confere bastante rigidez ao material (Takeichi & Furukawa, 2012).

2.1.1 Interface entre fibra e resina

Na interface, o garante de uma boa adesão da matriz à fibra é obtido por uma boa dispersão da resina sobre as fibras através de uma baixa viscosidade que leva a um aumento da proximidade atómica. Além disso, o aumento da área da interface leva a que ocorram mais ligações, ou seja uma superfície rugosa que consequentemente apresenta mais área, leva a um aumento de adesão (Park & Seo, 2011).

Após a fase de cura, a matriz endurece e passa-se de uma interface de líquido com sólido para uma interface entre dois sólidos. Uma das teorias que descreve esta relação é a teoria do *mechanical interlocking*. Nesta teoria as forças de adesão são garantidas pelo *interlock* nas irregularidades da superfície e poros da superfície das fibras. A qualidade de adesão acaba por ser afetada pela capacidade da resina, entrar nos poros e cavidades da superfície pelo que, a forma dos poros e cavidades é fator para determinar a força de adesão (Mittal & Pizzi, 2002). De modo a aumentar o desempenho do compósito são utilizados aditivos na matriz para melhorar as propriedades da interface. Os aditivos em forma de nanopartículas, como por exemplo o grafeno, permitem melhorias das propriedades da interface através do incremento do *mechanical interlocking* (Gangineni et al., 2019).

2.1.2 Grafeno

O grafeno é um nanomaterial que consiste essencialmente numa camada 2D com ligações covalentes entre átomos de carbono formando uma estrutura hexagonal. Este material tem excelentes propriedades mecânicas, elevada condutividade térmica e elétrica. Todas estas propriedades levam este material a ter um potencial campo de aplicação (Zhu et al., 2010).

O grafeno e variantes deste material podem ser utilizados como aditivos nas resinas epóxi de modo a otimizar a propriedades de compósitos laminares de fibra de carbono. Por exemplo, a utilização de óxido de grafeno tem grande impacto nas interações da resina com as fibras, promovendo um elevado incremento na resistência ao cisalhamento interlaminar (~25%) (Pathak et al., 2016). Outro exemplo que mostra vantagens da utilização de grafeno em resinas epóxi é o sistema de resina epóxi carregado com GNPs da *Graphenest S.A.* a qual, em comparação com a mesma resina sem grafeno, quando utilizada em compósitos de fibra de carbono apresenta incrementos de 24% na resistência máxima à flexão (Graphenest S.A., 2018).

A melhoria das propriedades mecânicas com uso deste aditivo, resulta do aumento das ligações por ponte de hidrogénio na interface fibras/resina, e do aumento do *mechanical interlocking*. No entanto, a eficácia do aditivo está muito dependente da dispersão do mesmo na resina, uma vez que há uma tendência para aglomeração devido às Forças de *Van der Waals* interlaminares. Consequentemente, a dispersão e alinhamento do aditivo na resina pode tornar-se um fator limitante, restringindo-se assim a sua adição a um limite máximo de 10% do peso da resina (Mohan et al., 2018; Pathak et al., 2016).

2.2 Radiação ionizante

A radiação eletromagnética, consoante a energia pode caracterizar-se como radiação não ionizante e radiação ionizante. A radiação ionizante é capaz de penetrar a matéria e ionizar[3]

[3] Processo de formação de iões pelo ganho ou perda de eletrões num átomo ou molécula.

átomos, enquanto a radiação não ionizante não tem energia suficiente para tal (CDC, 2022; Ferreira, 2008). Uma das fontes de radiação ionizante são os raios gama. A radiação gama é proveniente de núcleos atómicos instáveis que transitam para níveis de energia mais estáveis por decaimento radioativo. Os raios gama são muito utilizados na esterilização de materiais, tratamentos médicos e processamento de polímeros. O processamento de polímeros tem tido um crescimento contínuo e, de acordo com um estudo realizado pela Agência internacional de Energia Atómica (International Atomic Energy Agency - IAEA), 30% dos irradiadores gama irradia polímeros para melhoria de propriedades (por exemplo resistência mecânica e térmica) (Drobny, 2012; Makuuchi & Cheng, 2011).

O cobalto-60 é um radioisótopo utilizado em diversas aplicações na medicina e indústria, sendo caracterizado por um tempo de semi-vida (ou período de semi-desintegração) de aproximadamente 5 anos e pela emissão de radiação gama com energias de 1,17 MeV e 1,33 MeV (Ferreira, 2008). Embora a sua utilização seja benéfica, quando não controlada, a radiação ionizante pode provocar danos, tanto em organismos como em materiais. Para tal, é essencial dispor de conhecimentos e meios adequados que nos permitam quantificar, ainda que de forma indireta as doses de radiação absorvidas pelos materiais e, desta forma assegurar um controlo eficiente das irradiações. A dosimetria desempenha aqui um papel essencial para garante da qualidade dos processos de irradiação (Ahmed, 2015).

Em materiais poliméricos, a radiação gama leva à ocorrência de *crosslinking* e *chain scissioning*. O processo de *crosslinking* é a criação de uma rede 3D entre as cadeias poliméricas, com o consequente aumento do peso molecular do polímero, enquanto o processo de *scissioning* leva à quebra das cadeias poliméricas, que se traduz numa redução do peso molecular do polímero (Makuuchi & Cheng, 2011; Sun & Chmielewski, 2017).

Quando o *crosslinking* prevalece, há uma redução na mobilidade das cadeias poliméricas o que se traduz mecanicamente num aumento da tensão de rotura do material, do módulo de *Young* e uma redução de extensão à rotura. Por outro lado, relativamente às propriedades elétricas, a irradiação pode resultar num incremento da condutividade elétrica (Drobny, 2012; Sun & Chmielewski, 2017).

2.3 Propriedades dos materiais

Na indústria aeronáutica, os compósitos carbono-epóxi têm uma grande aplicação em componentes estruturais, e acabam por estar sujeitos a diversos esforços mecânicos com regimes de intensidade muito variáveis. É assim fundamental avaliar o desempenho mecânico destes materiais em regimes de esforço padronizados de forma a garantir a segurança na sua utilização (Callister & Rethwisch, 2010; Mallick, 2007).

A representação dum ensaio de tração é feita através dum gráfico que relaciona a tensão a que um material está sujeito a deformação daí resultante. Numa primeira fase a maioria dos materiais apresentam um comportamento elástico. Com o aumento da deformação, há uma transição em que deixa de haver uma relação linear entre a tensão e a deformação. Nessa fase o material entra na deformação plástica. Existem algumas limitações na realização dos testes de tração, nomeadamente em materiais frágeis, para os quais os mordentes dos braços tensores da máquina de ensaios, podem facilmente danificar as amostras tornando mais difícil a realização dos ensaios de tensão. Os ensaios de flexão podem e sempre que disponíveis, devem então ser utilizados para complementar a caracterização mecânica do material (Askeland & Wright, 2016; Callister & Rethwisch, 2010).

Relativamente às propriedades elétricas, uma das propriedades mais importantes do material é a condutividade elétrica. Esta propriedade está dependente principalmente do número de eletrões disponíveis para condução de carga. Na maioria dos polímeros os eletrões de

valência estão todos presentes em ligações covalentes, tornando estes materiais maus condutores elétricos. O *crosslinking* entre as cadeias poliméricas pode facilitar a mobilidade de eletrões entre as cadeias. A condução elétrica de polímeros também pode ser melhorada através de dopantes, que geram novas bandas de energia, criando um aumento na concentração de buracos ou eletrões livres (Askeland & Wright, 2016; Blythe & Bloor, 2005; Callister & Rethwisch, 2010).

No que concerne às propriedades térmicas, neste estudo foi analisada a temperatura de degradação (T_{deg}) e a temperatura de transição vítrea (T_g). A T_{deg} permite inferir sobre a robustez estrutural do polímero, uma vez que acima desta temperatura começa a ocorrer a fragmentação da estrutura molecular do polímero. A T_g é a temperatura a que o material passa de um estado rígido, estado vítreo, para um estado de maior flexibilidade e elasticidade, como a borracha. A um nível molecular, a T_g representa a temperatura a partir da qual as longas cadeias poliméricas deixam de estar "congeladas" e se torna possível a mobilidade das cadeias poliméricas (Crompton, 2013; Menczel & Prime, 2008).

3 Produção e preparação dos provetes

3.1 Produção dos compósitos

A produção dos compósitos foi feita através do método *wet-layup*. No caso dos compósitos carbono-epóxi foi utilizado um rolo de fibras 3K bidirecionais, com uma gramagem de 160 g/m^2 e como matriz usou-se o composto bicomponente Hexamatrix da *Graphenest, S.A*. As placas dopadas tinham uma concentração de 2% (wt) de grafeno na matriz. A cura das placas foi feita em vácuo Figura 1, com uma pressão negativa de 70000 Pa e à temperatura ambiente durante 24 horas, enquanto a pós-cura foi realizada a 40ºC durante 24h.

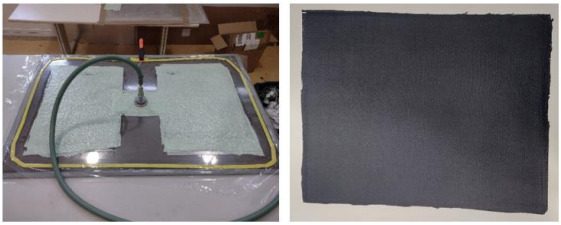


Figura 1 – Cura de compósito em saco de vácuo e placa de carbono-epóxi, respetivamente.

Para além dos laminados de carbono-epóxi, foram produzidos laminados de fibra de vidro, dos quais se extraíram reforços para os provetes usados nos ensaios de tração mecânica, respeitando a norma ISO 524-4 (2020). Adicionalmente, foram produzidas duas placas de *Hexamatrix*, sendo uma delas dopada com grafeno. Após a produção das diferentes placas foi realizado o corte, para obtenção dos provetes numa máquina *computer numerical control* (CNC) (Figura 2).

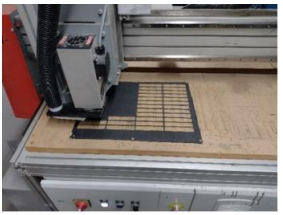


Figura 2 – Máquina de corte CNC e corte de provetes para ensaios de flexão, respetivamente.

No total, foram produzidas 13 placas de carbono-epóxi, iguais à da Figura 1. Destas placas, foram extraídos 30 provetes para ensaios térmicos, 89 provetes para ensaios de tração, 92 provetes para ensaios de flexão e 27 provetes para ensaios elétricos.

3.2 Irradiação gama dos compósitos

A irradiação gama dos provetes foi realizada, com um baixo débito de dose (~0,5 kGy/h) em atmosfera inerte (nitrogénio), após o processo de pós-cura do material. Para tal, foi utilizada a câmara de irradiação de cobalto-60, *Precisa 22*, no Laboratório de Radiações Ionizantes do Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares (C2TN).

Os lotes para ensaios de tração e flexão, constituídos por 10 provetes, foram irradiados de acordo com as geometrias de irradiação estudadas por Soares, (2021). Para os ensaios mecânicos foram realizadas cinco doses de irradiação nas amostras com grafeno (6, 8, 10, 12 e 14 kGy) e apenas uma dose de 10 kGy nas amostras sem grafeno. Nas amostras para análise térmica as doses foram de 2 a 14 kGy, nas amostras com grafeno e apenas 10 kGy nas amostras sem grafeno, sendo que houve lotes que não foram irradiados para servirem de referência. A Tabela 1 representa de forma sucinta a organização dos lotes para ensaios mecânicos e elétricos. A organização dos lotes foi realizada de modo a comparar o efeito do grafeno, o efeito da radiação e o efeito combinado do grafeno e radiação nas amostras.

Tabela 1 – Lotes com grafeno e respetivas doses de irradiação

Matriz	Ensaios	Lotes	Dose de Irradiação (kGy)
c/Grafeno	Tração	6	0, 6, 8, 10, 12 e 14
	Flexão	6	0, 6, 8, 10, 12 e 14
	Elétricos	2	0 e 10
s/Grafeno	Tração	2	0 e 10
	Flexão	3	0, 8 e 10
	Elétricos	2	0 e 10

A dosimetria de cada irradiação foi conduzida de acordo com a norma ISO 51276/2019, com a utilização de 2 dosímetros PMMA *Harwell Amber Perspex* do lote *Batch* 3042 AB, sendo um para o controlo da dose máxima e outro para o controlo da dose mínima.

3.2.1 Desenho e mapeamento do suporte dos provetes para ensaios elétricos

Os provetes para os ensaios de propriedades elétricas tinham as dimensões de 70x70mm, pelo que foi necessário redimensionar os suportes desenvolvidos e estudados por Soares,

(2021). As bases de encaixe (Figura 3) que fixam os provetes foram desenhados na plataforma *Tinkercad* e posteriormente fabricadas através de impressão 3D.

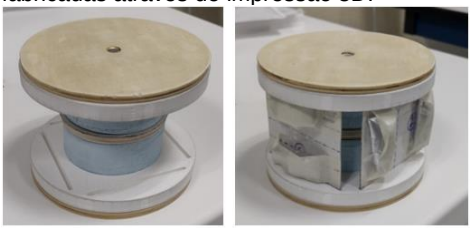


Figura 3 - Suporte das amostras para ensaios de condutividade elétrica, sem e com amostras de simulação, respetivamente

O mapeamento de doses foi realizado com 8 dosímetros por irradiação, como representado na Figura 4, tendo sido avaliados 3 tempos, a 2kGy, 5kGy e 8kGy. Em cada irradiação foram realizados dois tempos parciais (metades do tempo total de irradiação), com a rotação do porta amostras entre tempos para garantir uma boa distribuição de dose. Dos resultados obtidos das 3 irradiações verificou-se que a posição de dose máxima é entre a posição 1 e 2, na horizontal e a posição de dose mínima é na posição 7ou 8.

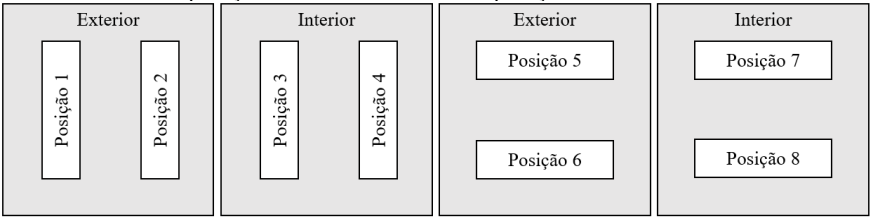


Figura 4 - Representação esquemática da colocação dos dosímetros sobre os provetes para o mapeamento de doses.

4 Campanha experimental dos Provetes

4.1 Análise térmica

4.1.1 Termogravimetria (TGA)

A técnica de termogravimetria, permite avaliar a variação da massa de uma amostra quando sujeita a um programa de aquecimento. Através desta técnica é possível caracterizar a degradação e a estabilidade térmica do material (Hatakeyama & Quinn, 1999).

Os ensaios de termogravimetria foram realizados com recurso ao equipamento *TA instruments* modelo *TGA 951*, em atmosfera inerte (fluxo de nitrogénio de 60ml/min) e com uma temperatura média da sala de 24ºC. O programa de aquecimento consistiu no: (i) Equilíbrio a 30ºC; (ii) Registo de dados de 2,6 seg/ponto; (iii) Rampa de aquecimento de 10ºC/min até 800ºC.

De seguida foram extraídas amostras por raspagem de material de diferentes provetes. Os ensaios foram realizados, no mínimo; em triplicado, usando uma massa entre 8 mg e 15 mg de material/amostra.

4.1.2 Calorimetria diferencial de varrimento (DSC)

Para identificar a T_g de polímeros utiliza-se calorimetria diferencial de varrimento (DSC), observando o incremento na capacidade calorífica da amostra durante o aquecimento, que se traduz num aumento da mobilidade molecular do polímero (Hatakeyama & Quinn, 1999).

Figura 5 - Equipamento de análise térmica DSC *TA instruments* modelo *DSC Q2000*.

Nesta análise DSC foram utilizadas as mesmas amostras que na análise TGA, sendo que foram realizados no mínimo 3 ensaios por amostra. O equipamento utilizado para os ensaios foi *TA instruments* modelo *DSC Q2000* (Figura 5), sendo o gás de purga nitrogénio e o gás de arrefecimento, ar reconstituído. O programa de aquecimento nos ensaios DSC consistiu no: (i) Equilíbrio a 30ºC; (ii) Rampa de aquecimento a 10ºC/min até 150ºC; (iii) Isotérmico por 10 min; (iv) Rampa de arrefecimento a 10ºC/min até -30ºC; (v) Rampa de aquecimento a 10ºC/min até 150ºC.

4.2 Ensaios mecânicos

4.2.1 Ensaios de tração

A realização dos ensaios de tração foi com recurso a uma máquina de testagem universal, *Instron* modelo 3369 equipada com uma célula de carga de 50kN e garras manuais. A velocidade usada foi 2 mm/min e com frequência de aquisição de dados de 20Hz. Em cada ensaio, o equipamento registou a carga e a movimentação das garras. Deste registo foi calculado a extensão nominal, a tensão e o módulo de *Young*, com base na norma ISO 527-1/2019 (ThermoFisher Scientific, 2023).

No cálculo do módulo de *Young* realizou-se uma regressão linear dos mínimos quadrados do gráfico tensão *vs* extensão nominal (ε_t), com um intervalo de confiança mínimo de 95%, no intervalo $0{,}020 \leq \varepsilon_t \leq 0{,}025$ por ser a região mais aproximada dum comportamento linear da fase elástica do material. De acordo com a norma ISO 527-1/2019, o intervalo para calcular o módulo de *Young* deve ser entre $0.0005 \leq \varepsilon_t \leq 0.0025$. No entanto verificou-se que o momento inicial de cada ensaio havia uma acomodação dos provetes às pinças.

4.2.2 Ensaios de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados com o equipamento *Instron* modelo 5566 com uma célula de carga de 500 N. A realização deste ensaio foi baseada na norma ISO 141125/2011 utilizando o método A (ensaio a 3 pontos) (Figura 6), como descrito na norma, com uma distância entre suportes de 80 mm, uma velocidade de 5,0 mm/min e uma frequência de registo de 50Hz.

Ao longo de cada ensaio, o equipamento registava a força exercida e a deflexão. Através destes dois parâmetros foi calculada, seguindo a norma ISO 141125/2011 a tensão à flexão e o módulo de flexão.

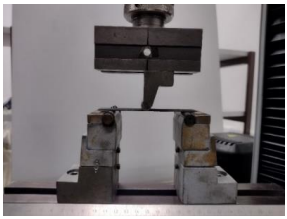


Figura 6 - Ensaio de flexão a três pontos.

4.3 Ensaios das propriedades elétricas

4.3.1 Resistência elétrica de folha (*four point probe*)

A realização dos ensaios de resistência de folha foi através da técnica *four point probe* (Figura 7). Esta técnica consiste na utilização de quatro sondas alinhadas e igualmente espaçadas entre si. Através das sondas exteriores é criada uma corrente contínua (DC) e nas sondas interiores é medida a tensão.

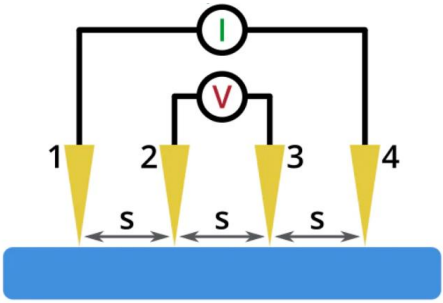


Figura 7 - Representação esquemática da técnica four point probe. (I) representa a corrente, (V) representa a tensão e (s) representa o espaçamento entre sondas (Ossila, 2023).

O equipamento utilizado para medição foi o *SourceMeter SMU* modelo 2460, configurado no modo *current bias* com quatro sondas, com um espaçamento de 2,4mm entre si. As condições de cada ensaio foram: Uma corrente de 0,005A, uma tensão 2,1V e uma força aplicada pelas sondas de 0,66N. Por cada ensaio foram realizadas 5 medições de tensão em diferentes pontos da amostra. Através dos valores de tensão obtidos foi calculada a resistência de folha, resistividade e condutividade elétrica, de acordo com o descrito em Ossila, (2023).

4.3.2 Blindagem eletromagnética

Entende-se por blindagem eletromagnética, a atenuação da transmissão e minimização da interferência eletromagnética. A blindagem é alcançada através da reflexão e absorção da radiação incidente no material, assim como através de múltiplas reflexões internas ao longo da espessura do material (Kondawar & Modak, 2020).

O método utilizado para medir a eficiência da blindagem eletromagnética foi o da transmissão coaxial. A testagem da blindagem eletromagnética foi realizada com o equipamento *NanoVNA-F V2*, com um guia de onda e dois atenuadores de 50Ω cada. O intervalo de frequência usado foi dos 0,5 MHz aos 3000 MHz. Dos ensaios realizados foi obtida a eficiência de blindagem total (SE_{Total}), expressa em decibel (dB).

5 Análise e discussão de resultados

5.1 Análise térmica

5.1.1 Temperatura de degradação

A T_{deg} dos lotes de carbono-epóxi não irradiado e sem grafeno foi de 303,09ºC, com um desvio-padrão (STD) de 2,46%. A T_{deg} do lote não irradiado e com grafeno foi de 309,78ºC (STD 1,94%). Ou seja, o grafeno levou a um incremento de 2,21% na T_{deg}, sendo pouco significativo dado os desvios-padrão das amostras.

Nas amostras com grafeno a radiação influenciou de forma geral ±5% a T_{deg} do compósito. O lote de amostras irradiado com 2,21 kGy teve a menor T_{deg}, no valor de 297,21ºC (STD 0,61%) que revela uma redução da T_{deg} face à amostra não irradiada de 4,06%. O lote irradiado com 10,49 kGy teve uma T_{deg} de 328,06ºC (STD 1,95%) revelando o incremento máximo de 5,90% face ao lote não irradiado. Para as restantes doses de irradiação maioria das amostras tiveram um incremento da T_{deg} face à amostra não irradiada, o que sugere a ocorrência de *crosslinking*.

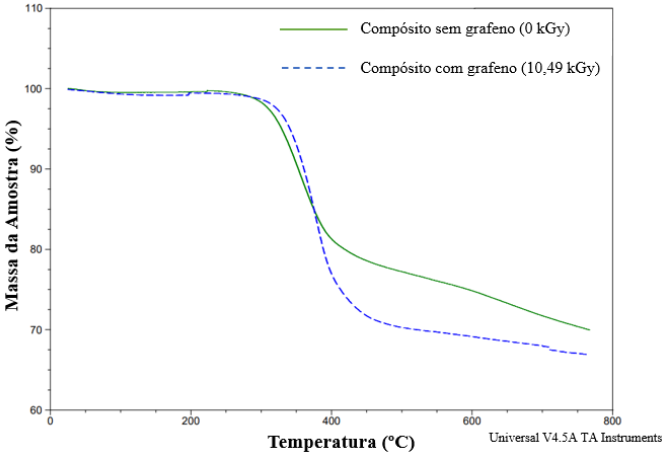


Figura 8 - Termograma representativo da amostra com grafeno e irradiada e da amostra sem grafeno e não irradiada.

Relativamente ao efeito conjunto da dopagem de grafeno e irradiação gama, o lote com grafeno e irradiado com 10,49 kGy face ao lote sem grafeno e não irradiado revelou o incremento mais acentuado da T_{deg}, sendo de 8,24%. Isto demonstra que a combinação da dopagem de grafeno com radiação gama é benéfica no incremento da T_{deg}. No entanto, a Figura 8 mostra que a cinética de degradação é bastante mais acentuada na amostra com grafeno e irradiada. Este

comportamento sugere que a estrutura molecular é termicamente mais resistente, mas que, uma vez atingido o seu limite de resistência térmica, ele degrada mais rapidamente.

5.1.2 Temperatura de transição vítrea

Nas amostras não irradiadas, a T_g do lote sem grafeno foi de 74,85ºC (STD 0,94%) e do lote com grafeno foi de 78,67ºC (STD 2,3%). Isto revela que a presença de grafeno levou a um incremento de 5,10% da T_g, o que sugere uma estrutura termicamente mais resistente.

Por outro lado, a radiação gama levou maioritariamente a uma redução da T_g. A redução mais acentuada foi do lote com grafeno e irradiado com 2,21 kGy, tendo uma T_g de 71,50ºC (STD 2,26%). Face ao lote não irradiado e com grafeno traduz-se numa redução de 9,12%, da T_g. O único incremento foi do lote com grafeno e irradiado com 5,42 kGy. Face ao lote não irradiado com grafeno é um incremento de 1,79%. De um modo geral a radiação, apesar de pouco significativa, levou à redução da T_g, sugerindo a ocorrência de *chain scissioning* ou um aumento da desordem molecular do material devido a *crosslinking*.

A Figura 9 representa uma comparação entre o lote com grafeno e irradiado e o lote sem grafeno e não irradiado. A T_g média do lote com grafeno e irradiado com 10,49 kGy foi de 73,65ºC (STD 1,66%), enquanto a T_g média do lote sem grafeno e não irradiado foi de 74,85ºC (STD 0,94%). Assim sendo, a dopagem com grafeno combinada com a radiação levou a uma redução da T_g de 1,60%. Tendo em conta os desvios padrões das amostras, esta redução é pouco significativa. É possível concluir que a radiação tem o efeito oposto ao do grafeno na T_g. Enquanto o grafeno incrementou a T_g, a radiação gama fez o oposto. Os resultados sugerem que a radiação potenciou a ocorrência de algum *chain scissioning*. Relativamente à adição de grafeno, o incremento da T_g sugere um aumento da coesão estrutural.

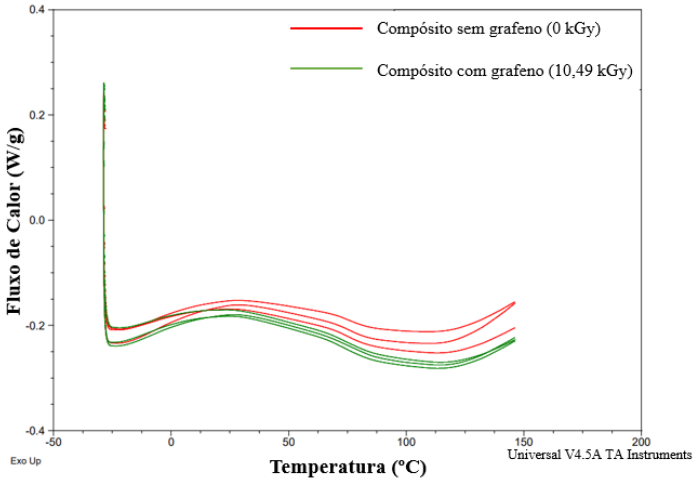


Figura 9 - Termogramas da amostra com 0 kGy e sem grafeno e da amostra com 10,49 kGy e com grafeno.

5.2 Análise mecânica

5.2.1 Ensaio de tração

Nos lotes não irradiados, o que não continha grafeno teve um módulo de *Young* de 16508,21 MPa (STD 1,40%) enquanto o lote que continha grafeno foi de 17589,5 MPa (STD 1,83%). Relativamente à tensão máxima, a do lote sem grafeno foi de 574,329 MPa (STD 2,55%) e do lote com grafeno foi de 551,566 MPa (STD 4,83%). Isto demonstra que a presença de grafeno, no compósito, levou a um incremento de 6,55% no módulo de *Young* e a uma redução de 3,96% na tensão máxima.

Estes resultados demonstram que o grafeno aumenta a rigidez do material, apesar da ligeira redução da tensão máxima. Na Figura 10 é possível verificar o incremento do módulo de *Young* e a diminuição da tensão máxima das amostras com grafeno. Esta redução da tensão máxima é pouco significativa dado o desvio padrão dos lotes. Apesar de pouco significativa, a redução da tensão máxima pode estar associada a uma dispersão deficiente do grafeno na matriz, uma vez que a dispersão do grafeno no compósito foi manual.

Relativamente às irradiações, nas amostras sem grafeno verificou-se um incremento de 7,72% do módulo de *Young* do lote irradiado com 10,60 kGy face ao lote não irradiado. Na tensão máxima também se verificou um aumento, mas de apenas 1,92% sendo pouco significativo dado o desvio padrão das amostras. Estes resultados sugerem a prevalência de *crosslinking* devido ao uso de radiação gama.

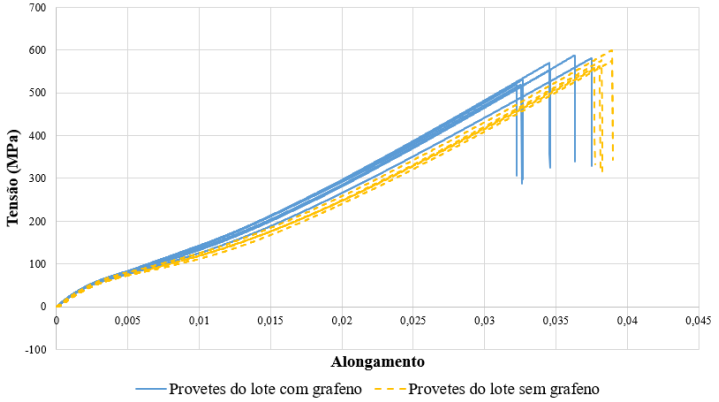


Figura 10 - Gráfico Tensão-Deformação comparativo de provetes não irradiados, com e sem grafeno.

Nos lotes com grafeno, o efeito da radiação gama foi pouco significativo na variação do módulo de *Young* e da tansão máxima. O lote irradiado com 6,18 kGy teve um módulo de *Young* de 18159,95 MPa (STD 2,01%), sendo o incremento máximo de 2,12%, face ao lote não irradiado. Relativamente à tensão máxima, o maior incremento face ao lote não irradiado foi de 3,50%, do lote irradiado com 9,96 kGy. No entanto os desvios-padrão dos lotes foi superior aos incrementos da tensão máxima, pelo que se consideraram as alterações pouco significativos.

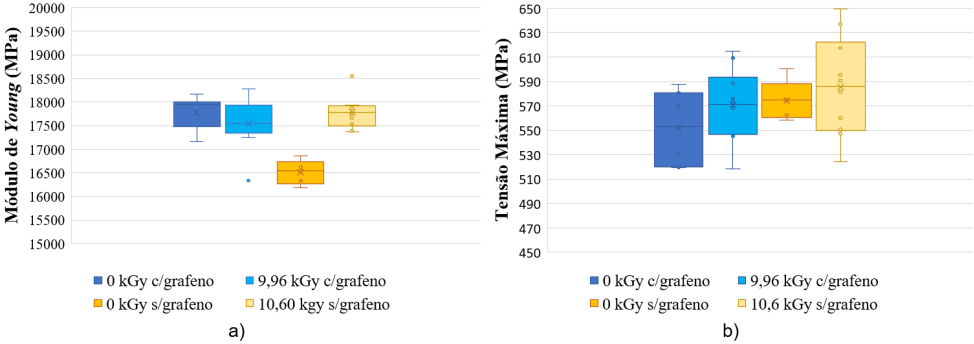


Figura 11 - Diagramas de caixa: a) Módulo de Young; b) Tensão máxima; comparativo das amostras com e sem grafeno, irradiadas e não irradiadas.

Na Figura 11a é possível verificar que no módulo de *Young*, a combinação da adição de grafeno com a radiação gama não foi mais benéfica do que o uso separado das técnicas, sendo o incremento face ao lote sem grafeno e não irradiado de 6,30%. Destaca-se, no entanto, que um incremento superior foi obtido com o uso separado das técnicas. Relativamente à tensão máxima (Figura 11b) é possível verificar que as amostras com grafeno tiveram tensões máximas inferiores às dos lotes sem grafeno. Para além disso, podemos verificar que para uma dose aproximada de 10 kGy, a radiação foi mais benéfica na amostra com grafeno do que na amostra sem grafeno. Ou seja, nas amostras com grafeno a radiação aproximada de 10 kGy levou a um incremento de 3,50%, enquanto nas amostras sem grafeno apenas levou a um incremento de 1,92%. Isto sugere que a combinação da dopagem de grafeno com radiação gama é uma técnica benéfica para incrementar a tensão máxima de compósitos carbono-epóxi.

5.2.2 Ensaios de flexão

Nas amostras não irradiadas o lote sem grafeno obteve um módulo de flexão de 47107,48 MPa (STD 2,86%) e uma tensão máxima à flexão de 519,9 MPa (STD 9,13%). Enquanto o lote com grafeno obteve um módulo de flexão de 46020,02 MPa (STD 3,22%) e uma tensão máxima de 574,47 MPa (STD 12,45%). Isto traduz-se num incremento do módulo de flexão de 2,31% pelo uso de grafeno, sendo pouco significativo dado os desvios-padrão dos lotes. Por outro lado, o uso de grafeno levou a um incremento da tensão máxima em 10,50%.

Relativamente à radiação gama, o lote sem grafeno e irradiado com 9,92 kGy apresentou um módulo de flexão de 43991,07 MPa (STD 2,46%) e uma tensão máxima de 489,78 MPa (STD 9,81%). Estes valores evidenciam uma redução do módulo de flexão em 6,62% e na tensão máxima em 5,79% face ao lote não irradiado e sem grafeno. Ou seja, estes resultados sugerem que a radiação levou à ocorrência de *chain scissioning*.

Nas amostras com grafeno, as irradiações demonstraram alterações pouco significativas no módulo de flexão. A única alteração significativa foi do lote com 7,13 kGy, com uma redução do módulo de flexão de 4,51% face ao lote não irradiado. Relativamente à tensão máxima das amostras com grafeno irradiadas, não se verificaram alterações significativas.

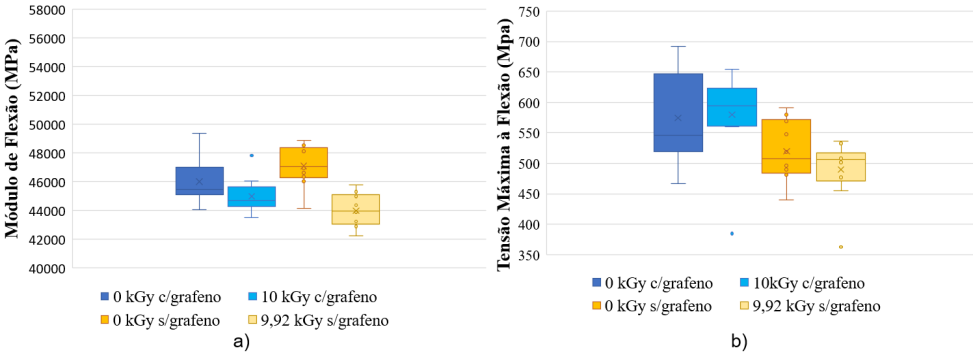


Figura 12 - Diagramas de caixa: a) Módulo de Flexão; b) Tensão máxima à Flexão; comparativo das amostras com e sem grafeno, irradiadas e não irradiadas.

A Figura 12a mostra que o lote com grafeno e irradiado com 10 kGy obteve um módulo de flexão médio de 44987,81 (STD 2,62%), que traduz uma redução de 4,50% em relação ao lote sem grafeno e não irradiado. Esta redução fica entre o valor apresentado pela amostra apenas dopada com grafeno e o valor da amostra apenas irradiada. Isto sugere que a presença de grafeno oferece alguma estabilidade impedindo que os fenómenos de *chain scissioning* fossem tão prenunciados, como na amostra apenas irradiada. A combinação da dopagem de grafeno com a radiação gama traduz-se num aumento de 11,53% da tensão máxima à flexão. A Figura 12b sugere que a dopagem com grafeno tem um impacto mais significativo na tensão máxima do que a radiação gama, mas quando combinadas as técnicas o incremento é máximo.

5.3 Análise das propriedades elétricas

Na Figura 13a é possível verificar a condutividade elétrica dos diferentes lotes de amostras carbono-epóxi. A maior alteração da condutividade elétrica foi do lote com grafeno não irradiado face ao lote sem grafeno não irradiado, revelando uma redução de 1,08% que não é significativa tendo em conta os desvios-padrão dos lotes.

De um modo geral não se verificou alterações significativas da condutividade elétrica das amostras, tanto pela dopagem com grafeno e/ou pela radiação. Para além disso, os resultados de condutividade elétrica das amostras tiveram uma ordem de grandeza 10^{-6} S/m (material isolante). Uma vez que é esperado estas amostras serem condutoras, é possível que tenha ocorrido um mau contacto das sondas de medição com as amostras.

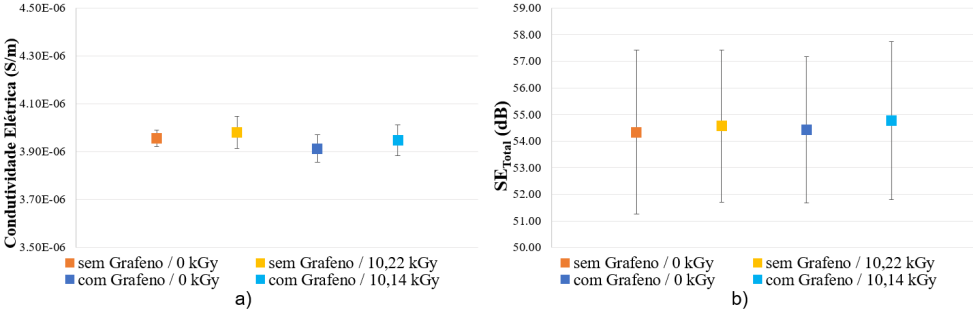


Figura 13 - a) Condutividade elétrica; b) SETotal e respetivos desvios-padrão das amostras.

As amostras de carbono-epóxi revelaram-se bastante eficientes para blindagem eletromagnética. Na Figura 13b está representada a SE_{Total} das diferentes amostras. As amostras têm valores de SE_{Total} compreendidos entre 54 dB e 55 dB, o que corresponde a uma potência transmitida entre 3,98E-04% e 3,16E-04%. Ou seja, 99,999% da potência incidente é refletida e/ou absorvida pela amostra. De um modo geral, as amostras de compósito carbono-epóxi apresentam uma blindagem eletromagnética bastante eficiente, sendo que não se verificam alterações significativas por parte das amostras sujeitas a radiação gama ou através de dopagem com grafeno.

6 Conclusões

Esta dissertação visa estudar o efeito da radiação gama em compósitos carbono-epóxi dopados com grafeno, relativamente às suas propriedades térmicas, mecânicas e elétricas. Assim sendo foram fabricadas através do método *wet-layup* nas instalações do CIAFA placas de carbono-epóxi e de resina epóxi, sendo que algumas continham 2% (wt) de nanoplaquetas de grafeno na matriz.

As placas de compósito carbono-epóxi tinham fibras de carbono 3K, produzidas pela *Rebelco*. A matriz utilizada foi o bicomponente *Hexamatrix* da *Graphenest, S.A*. As amostras foram cortadas com recurso a equipamento CNC, e posteriormente à pós-cura foram irradiadas no Laboratório de Radiações Ionizantes do C2TN. Nas irradiações, as amostras foram submetidas a diferentes doses. Posteriormente, caracterizaram-se as amostras quanto às suas propriedades térmicas, mecânicas e elétricas.

Na análise térmica, a combinação do grafeno com a radiação, ou seja, a comparação do lote com grafeno e irradiado com 10,49kGy face ao lote sem grafeno e não irradiado teve um incremento de 8,24% da T_{deg}, sendo este o incremento máximo da T_{deg}. Contudo, na análise DSC não foi possível observar alterações significativas da T_g pelo uso combinado das técnicas. De um modo geral, a análise térmica (TGA e DSC) sugere que a combinação da radiação gama com grafeno é benéfica pelo facto de incrementar a T_{deg} e não prejudicar a T_g, o que sugere um aumento da coesão estrutural do compósito.

Na análise mecânica, os ensaios de tração permitiram verificar que a conjugação das técnicas, permitiu incrementar o módulo de *Young* sem prejudicar de forma significativa a tensão máxima, apesar dos resultados terem sido pouco conclusivos, devido a desvios-padrão elevados. No entanto, dos ensaios de flexão a conjugação da adição de grafeno com a radiação gama verificou-se benéfica face ao uso das técnicas em separado. Apesar dos resultados serem

pouco confiáveis, dado os elevados desvios-padrão, verificou-se que a conjugação de grafeno com radiação (10 kGy) levou ao maior incremento (11,53%) da tensão máxima à flexão.

Os resultados obtidos da condutividade elétrica e da blindagem eletromagnética demonstraram que tanto a radiação gama como a dopagem de grafeno não levou a alterações significativas. Para além disso verificou-se que as amostras são isolantes e a SE_{Total} foi de 99,999% em todas as amostras.

Por último é possível afirmar que a presença de grafeno teve um elevado impacto na análise térmica e mecânica, enquanto a radiação não demonstrou alterações significativas. Na análise térmica verificou-se que a combinação das técnicas é benéfica (incremento da T_{deg} sem prejudicar a T_g). Na análise mecânica, apesar dos elevados desvios-padrão, os resultados sugerem que a combinação das técnicas é benéfica. Apesar dos resultados sugerirem que a combinação das técnicas é benéfica, não o foi possível comprovar na totalidade pelo que se sugere como trabalho futuro, a realização de um estudo idêntico, mas com o uso de óxido de grafeno em vez de nanoplaquetas de grafeno, pelo facto do óxido de grafeno apresentar grupos oxigênio, que em conjunto com os grupos funcionais da resina epóxi, podem facilitar uma dispersão mais homogénea do óxido grafeno na matriz, e também aumentar a adesão entre componentes na região de interface do compósito.

Referências bibliográficas

Adams, R. C. (2001). ASM Handbook Vol.21 Composites. In Technology (Vol. 2). http://books.google.com.hk/books?id=eC-Zt1J4oCgC.

Ahmed, S. N. (2015). Physics and Engineering of Radiation Detection (2nd Editio). Elsevier.

Applications - Graphene - The University of Manchester. (2022). https://www.graphene.manchester.ac.uk/learn/applications/.

Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2016). The Science and Engineering of Materials (7th Editio). Cengage Learning.

Blythe, T., & Bloor, D. (2005). Electrical Properties of Polymers (2nd ed.). Cambridge University Press.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). Ciência e Engenharia dos Materiais (Wiley (Ed.); 8a Edição). http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2729587.

CDC. (2022, May 17). Radiation Studies: CDC - What is Radiation? https://www.cdc.gov/nceh/radiation/what_is.html.

Chen, J. S., Ober, C. K., Poliks, M. D., Zhang, Y., Wiesner, U., & Cohen, C. (2004). Controlled degradation of epoxy networks: Analysis of crosslink density and glass transition temperature changes in thermally reworkable thermosets. Polymer, 45(6), 1939–1950. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.01.011.

Crompton, T. R. (2013). Thermal Methods of Polymer Analysis. In Sealing Technology (Vol. 2013, Issue 3). Smithers Rapra. https://doi.org/10.1016/s1350-4789(13)70095-3.

Drobny, J. G. (2012). Ionizing Radiation and Polymers: Principles, Technology, and Applications. In Ionizing Radiation and Polymers: Principles, Technology, and Applications. https://doi.org/10.1016/C2011-0-05010-X.

Ferreira, L. M. (2008). Modificação de Polietileno por Copolimerização de Enxerto Induzido por Radiação Gama - Sua Aplicação na Área dos Biomateriais [Universidade de Lisboa]. http://hdl.handle.net/10451/1602.

Gangineni, P. K., Yandrapu, S., Ghosh, S. K., Anand, A., Prusty, R. K., & Ray, B. C. (2019). Mechanical behavior of Graphene decorated carbon fiber reinforced polymer composites: An assessment of the influence of functional groups. Composites Part A: Applied Science

and Manufacturing, 122(December 2018), 36–44. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.017.

Gay, D., Hoa, S., & Tsai, S. (2003). Composite Materials Design and Applications (C. PRESS (Ed.)).

Graphenest S.A. (2018). HexaMatrix TM. http://www.graphenest.com/.

Hatakeyama, T., & Quinn, F. . (1999). Thermal Analysis — Fundamentals and Applications to Polymer Science (2nd ed., Vol. 51, Issue 2). John Wiley & Sons, Inc. https://doi.org/10.1016/s0039-9140(99)00304-5.

ISO. (2011). ISO 14125 - Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties.

ISO. (2019). ISO 527-1 - Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principle (p. 13).

Kesarwani, S. (2017). Polymer Composites in Aviation Sector. International Journal of Engineering Research And, V6(06), 518–525. https://doi.org/10.17577/ijertv6is060291.

Kondawar, S. B., & Modak, P. R. (2020). Theory of EMI shielding. In Materials for Potential EMI Shielding Applications (pp. 9–25). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817590-3.00002-6.

Kukreja, B. S., & Löfström, J. (2009). Composites in The Aircraft Industry.

Makuuchi, K., & Cheng, S. (2011). Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications. In Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications. John Wiley & Sons, Inc. https://doi.org/10.1002/9781118162798.

Mallick, P. K. (2007). Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design.

Menczel, J. D., & Prime, R. B. (2008). Thermal Analysis of Polymers - Fundamentals and Applications. Wiley.

Mittal, K. L., & Pizzi, A. (2002). Adhesion Promotion Techiniques (I. Hopewell Junction/Marcel Dekker (Ed.)).

Mohan, V. B., Lau, K. tak, Hui, D., & Bhattacharyya, D. (2018). Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations. Composites Part B: Engineering, 142(January), 200–220. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.013

Ossila. (2023). sheet resistance theory. Www.Ossila.Com. https://www.ossila.com/en-eu/pages/sheet-resistance-theory.

Park, S.-J., & Seo, M.-K. (2011). Interface Science and Composites (Elsevier (Ed.)).

Pathak, A. K., Borah, M., Gupta, A., Yokozeki, T., & Dhakate, S. R. (2016). Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. Composites Science and Technology, 135, 28–38. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.09.007

Soares, J. M. A. A. (2021). Effect of Gamma Irradiation on the Functional Properties of Epoxy Carbon-Fiber Reinforced Composite Material. Academia da Força Aérea.

Sun, Y., & Chmielewski, A. G. (2017). Applications of Ionizing Radiation: Volume 1. http://tl-irmp.eu/wp-content/uploads/2018/01/APPLICATIONS-OF-IONIZING-RADIATION-IN-MATERIALS-PROCESSING-Volume-2.pdf%0Ahttp://tl-irmp.eu/download/book-application-of-ionizing-radiation-in-materials-processing/.

Takeichi, T., & Furukawa, N. (2012). Epoxy Resins and Phenol-Formaldehyde Resins. In Polymer Science: A Comprehensive Reference, 10 Volume Set (Vol. 5, Issue 2). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00157-6

ThermoFisher Scientific. (2023). FTIR Spectroscopy Basics | Thermo Fisher Scientific. https://www.thermofisher.com/pt/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-

analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html.

Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. (2010). Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications. Advanced Materials, 22(35), 3906–3924. https://doi.org/10.1002/adma.201001068.

A proliferação de armas nucleares: A opção zero no século XXI

Fonte: Anton Petrus (s.d.).

Autor: ALF/PILAV Francisco Branco da Cunha
Mestrado Integrado em Aeronáutica Militar
Academia da Força Aérea, Sintra

Orientadora: Professora Doutora Sandra Maria Rodrigues Balão
Instituto Superior de Ciências Sociais e Políticas, Universidade de Lisboa

Coorientador: COR/TODCI Luís Rocha
Força Aérea Portuguesa

Resumo: A proliferação de armas nucleares tem sido um tema de intenso debate desde a sua génese, devido aos riscos e desafios que são inerentes a este tipo de armamento. A existência de armas nucleares pressupõe a possibilidade de uma guerra nuclear que seria devastadora para todo o planeta. O contínuo desenvolvimento e proliferação de armas nucleares que se tem verificado nos últimos anos potencia a deterioração das relações internacionais e também prejudica as iniciativas para a promoção da paz e da segurança.
Apoiado na teoria do neorrealismo defensivo e através de um método hipotético-dedutivo, considera-se determinante analisar casos recentes de ameaças de uso de armas nucleares, assim como ponderar o risco crescente de guerra nuclear como o que parece resultar do conflito entre a Rússia e a Ucrânia. Neste contexto há que refletir sobre a modernização dos arsenais nucleares por parte dos Estados possuidores daquele tipo de armamento; a crise nos acordos de controlo de armamento entre os Estados Unidos da América e a Rússia; os vários esforços para evitar a proliferação por atores não-estatais; os desafios enfrentados pelo Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares e pelo Tratado de Proibição de Armas Nucleares, com o objetivo central de discutir se este tipo de armamento contribui para uma dissuasão nuclear eficaz e quais são os principais obstáculos ao desarmamento nuclear.

Palavras-chave: Armas Nucleares; Proliferação de Armas Nucleares; Dissuasão Nuclear; Controlo de Armamento; Desarmamento Nuclear; Relações Internacionais.

1. Introdução

De acordo com o Conselho de Segurança da Organização das Nações Unidas (ONU) (1948, p.2), as Armas de Destruição em Massa (ADM) são definidas como: "*Atomic explosive weapons, radioactive material weapons, lethal chemical and biological weapons and any weapons developed in the future which might have characteristics comparable in destructive effect to those of the atomic bomb or other weapons metioned above*", e a elas estão associadas impactos relevantes nos domínios político, militar e económico, visto que a sua posse e/ou utilização afetam o futuro da segurança mundial (Caves & Seth Carus, 2014). As Armas Nucleares (AN) constituem um tipo de ADM que desempenha um papel particularmente relevante no ambiente de segurança internacional, sendo considerada a tipologia mais desenvolvida e mais sofisticada, sobretudo quando comparadas com as armas químicas e biológicas (Caves & Seth Carus, 2014).

A capacidade de proliferação de AN constitui uma ameaça que permanece atual para a humanidade e surge reforçada no contexto geopolítico em que vivemos, do qual pode resultar uma séria crise para a segurança global. A produção e comercialização deste tipo de armas apresenta-se, de facto, como um risco para toda a população mundial (CEDN, 2013).

Ao longo desta investigação, examinar-se-á o impacto das AN no atual contexto geopolítico. Através de documentos oficiais relacionados com o domínio nuclear, procurar-se-á avaliar, através de uma análise quantitativa, a eficácia das AN como fator dissuasor e identificar os principais obstáculos ao desarmamento nuclear, analisando, designadamente, dados e indicadores, de maneira quantitativa que permitam retirar ilações sobre as alterações nos arsenais nucleares ao longo da sua existência.

Na perspetiva das Relações Internacionais (RI), é fundamental salientar que esta investigação terá em conta as relações entre os Estados e a forma como a posse de AN afeta a Comunidade Internacional. Os desafios presentes no atual contexto geopolítico obrigam os Estados a adotarem perspetivas diferentes sobre a posse de AN e a proliferação nuclear. Desta forma, a presente investigação contribuirá para o campo das RI, identificando as questões e os riscos associados à posse e proliferação de armamento nuclear, bem como a forma como cada

Estado encara este tipo de armamento, procurando contribuir para a discussão da opção zero de AN.

1.1 Objeto de estudo

Dada a vasta abrangência do domínio nuclear, o objeto de estudo desta dissertação é a proliferação de AN e busca verificar relativamente à hipótese do desarmamento nuclear, através da discussão centrada sobre se as AN são um instrumento que contribui para uma dissuasão nuclear eficaz, quais são os principais obstáculos para um desarmamento nuclear mundial e discutir se é possível equacionar a opção zero de AN no mundo. No âmbito da delimitação temporal centramo-nos no século XXI. Na esfera social, o atual contexto geopolítico mundial e as interações entre os Estados que possuem capacidade nuclear merecem particular atenção.

1.2 Pertinência e relevância do estudo

Após a invasão da Ucrânia em fevereiro de 2022, a questão referente à existência, posse e capacidade de utilização de AN parece estar a passar por um momento de transição, deixando estas de ser consideradas um fator dissuasor de guerra, para passarem a ser vistas como um fator ofensivo, visto que a Rússia ameaça utilizar este tipo de armamento em solo ucraniano (Reuters, 2022a). O facto de a Rússia ser um membro permanente do Conselho de Segurança da ONU torna toda esta questão muito mais complicada, visto que tem o poder de vetar qualquer proposta, incluindo aquelas relacionadas com o conflito na Ucrânia, dificultando deste modo a tomada de decisão de qualquer ação cujo destinatário seja a Rússia (Magid & Shalomov, 2022).

Até aqui, o uso de AN teria apenas finalidades de dissuasão, mas a declaração por parte do porta-voz russo do Kremlin, Dmitry Peskov, de que a Rússia pode utilizar AN caso o Estado seja ameaçado (Whitcomb, 2022), afasta essa possibilidade. As forças nucleares da Rússia estão neste momento em alerta máximo, preparadas para combate, visto que Putin se encontra num cenário onde utilizar AN se apresenta mais atrativo do que aceitar uma derrota (Faiola, 2022). Após a alteração do *status quo*, no dia 14 de março de 2022, o Secretário-Geral da ONU, António Guterres, afirmou, por sua vez que: "*The prospect of nuclear conflict, once unthinkable, is now back within the realm of possibility*." (Ljunggren & Trevelyan, 2022), demonstrando que a segurança da humanidade pode estar em risco devido à invasão da Ucrânia pela Rússia.

No atual contexto geopolítico, podemos considerar que a mudança de paradigma associado às AN, passando de uma função de dissuasão para uma função de coação significou passarmos a conviver com uma constante ameaça de guerra nuclear, comprometendo a segurança mundial. As tensões e desconfianças entre Estados devido à posse de armamento nuclear conduz a que o risco de guerra nuclear seja uma preocupação significativa e constante para o mundo. Se se considerar que o objetivo de ter um sistema internacional mais seguro e estável passa pela redução de AN e eventual eliminação das mesmas (Guterres, 2022), não parecem restar grandes dúvidas que tal desiderato se apresenta hoje, cada vez mais, como uma utopia.

2. Nota metodológica

A presente investigação é fundamentada por uma epistemologia objetivista e solidifica-se através da utilização de um método hipotético-dedutivo com uma natureza positivista e quantitativa de base documental, uma vez que visita os factos prévios à investigação sobre a proliferação de armamento nuclear e a sua influência na atualidade (Lakatos & Marconi, 2003). É importante utilizar uma abordagem quantitativa para apoiar a análise de certas características do objeto de investigação, nomeadamente no que diz respeito a evidenciar a evolução dos

arsenais nucleares ao longo de toda a existência de AN no mundo, dos orçamentos que os Estados têm para investir nos seus arsenais e do número de ameaças do uso de AN.

2.1 Formulação da pergunta de partida

Para iniciar qualquer investigação, é crucial estabelecer um fio condutor, de modo a servir de orientação para o investigador à medida que o estudo se desenvolve. Esse fio condutor parte da pergunta de partida, que deve ser clara, viável e relevante. (Quivy & Campenhoudt, 2005).

Com base no que atrás foi exposto, a pergunta de partida que estrutura toda a nossa investigação, é a que abaixo se apresenta:

Considerando o atual contexto geopolítico, centrado no conflito Rússia-Ucrânia, a mera existência de AN contribui para uma dissuasão nuclear eficaz?

Associada a esta pergunta, surge outra pergunta de desenvolvimento (PD) que procura um melhor entendimento e facilitar a compreensão do impacto do objeto de estudo.

i. PD1: Quais são os principais obstáculos ao desarmamento nuclear mundial?

2.2 Hipóteses de trabalho

As hipóteses devem ser minimamente fundamentadas e referem-se ao modo como os conceitos se relacionam. Devem ser efetivas, claras e pertinentes (Gonçalves, 2004).

Tendo em conta a metodologia e o objeto de estudo descritos anteriormente, enunciaram-se as seguintes hipóteses de trabalho (HT):

i. HT1: A posse de AN não contribui para uma dissuasão eficaz no atual contexto geopolítico, como demonstrado pelos recentes casos de ameaça nuclear e pelo risco crescente de guerra nuclear.

ii. HT2: As doutrinas de segurança nacional profundamente enraizadas, a desconfiança entre os Estados com AN, os conflitos regionais, bem como as dificuldades em verificar o desmantelamento e assegurar o cumprimento dos acordos de controlo de desarmamento e de não-proliferação, são os principais obstáculos ao desarmamento nuclear internacional.

3. As armas nucleares no quadro das teorias das relações internacionais

As teorias das RI oferecem diferentes pontos de vista sobre o modo como as AN afetam o sistema internacional, visto que a existência e gestão deste tipo de armamento são temas complexos que exigem uma compreensão abrangente das teorias das RI.

O realismo clássico realça a importância da segurança nacional e do poder no ambiente internacional, com esses objetivos a serem alcançados através da dissuasão nuclear, visto que nenhum Estado que possui AN foi atacado por outro Estado com esta mesma capacidade, facto conhecido como “tabu nuclear”, e também pelo poder de negociação que estas oferecem (Jervis, 1989). As AN têm perigos, mas são consideradas pelos realistas clássicos um instrumento político que pode ser utilizado para reduzir os conflitos nucleares através de restrições à proliferação nuclear e de acordos de controlo de armamento, com estas iniciativas a basear-se num equilíbrio estratégico de poder (Morgenthau, 1978). No entanto, há quem argumente que este tipo de armamento possa não contribuir para uma dissuasão nuclear eficaz visto que os governantes dos Estados com AN não têm agido de forma racional e previsível, demonstrando que a posse deste tipo de armamento aumenta a probabilidade de um conflito nuclear (ICAN, 2023). Acresce que os acordos de controlo de armamento encontram-se suspensos, em larga medida devido ao conflito entre a Rússia e a Ucrânia (Bugos, 2023), o que parece indicar que as AN possam estar a perder influência como um instrumento político no ambiente internacional

(Sagan, 1996). Cada vez mais existem realistas reconhecidos, tais como George Shultz, Bill Perry, Henry Kissinger e Sam Nunn, que defendem um mundo sem AN (Shultz et al., 2013), associando-se mesmo a movimentos relacionados com esse objetivo, tal como é o caso do movimento Global Zero (Pifer, 2016).

Derivado do realismo, surge o neorrealismo. Os neorrealistas salientam a importância do equilíbrio de poder nos assuntos internacionais e consideram as AN como um instrumento importante para manter esse mesmo equilíbrio (Waltz, 1979). São a favor de limitar a proliferação internacional porque esta representa um perigo para a estabilidade internacional (Mearsheimer, 2014). Tendem também a apoiar e a reconhecer o valor dos acordos de controlo de armamento para reduzir os riscos colocados pelas AN, muito embora este apoio seja limitado visto que este tipo de acordos não deve pôr em causa os interesses de segurança de um Estado (Mearsheimer, 1993). No que toca ao desarmamento nuclear, os neorrealistas apoiam esta hipótese. No entanto, também estão cientes das dificuldades existentes para o alcançar. Defendem que a posse de AN por vários Estados contribui para a estabilidade internacional, utilizando a dissuasão para não desencadear uma guerra nuclear (Schweller, 2006). Para estes, os Estados vão tentar adquirir AN numa tentativa de aumentar a sua própria segurança enquanto o sistema internacional for anárquico, mantendo-se assim apenas a favor dos acordos de controlo de armamento, já que para os neorrealistas a hipótese de desarmamento nuclear não é realista (Mearsheimer, 2014).

Dentro do neorrealismo, surge o neorrealismo defensivo que é a posição onde o investigador se enquadra no âmbito das teorias das RI, considerando o objeto de investigação e respetivos objetivos. Para os neorrealistas defensivos, a anarquia incentiva os Estados a adotarem estratégias defensivas (Taliaferro, 2000). No entanto, nem todos os Estados querem possuir AN para garantir a sua sobrevivência e defesa, pelo que o sucesso da dissuasão nuclear está em causa, devido à racionalidade dos Estados. Podem existir motivos, tais como a tentativa de expansão territorial, que suscitem o interesse em adquirir este tipo de armamento. A posse e desenvolvimento de AN cria preocupações no que toca à corrida armamentista, à proliferação nuclear e à possibilidade de acidentes nucleares, logo os neorrealistas defensivos também apoiam o desarmamento nuclear visto que este pode reduzir a possibilidade de utilização não intencional. Estes estão conscientes dos riscos do uso de AN, salientando assim a importância dos acordos de controlo de armamento para atingir um desarmamento nuclear (Van Evera, 1999). Nos últimos anos, têm surgido preocupações quanto à modernização dos arsenais nucleares por parte dos Estados. Mundialmente, o número de AN continua a diminuir, mas atualmente esta redução apenas acontece porque os Estados Unidos da América (EUA) e a Rússia estão a desmantelar ogivas anteriormente retiradas. Em contraste com a redução do inventário global, o número de AN operacionais está neste momento a aumentar. Isto deve-se à modernização dos arsenais nucleares por parte dos Estados a um ritmo significativo, visto que estão a aumentar o seu poder na estratégia nacional (Kristensen et al., 2023). O conflito entre a Rússia e a Ucrânia é uma das principais causas desta modernização, principalmente por parte da Rússia (Korda, 2022). Existem neorrealistas defensivos que argumentam que a dissuasão nuclear possa não é eficaz devido às diferentes perceções da Rússia, que veem as AN como um instrumento para conquistar território e hegemonia e não para garantir a sua própria sobrevivência e segurança, tendo por base a ameaça do uso deste tipo de armamento (Van Evera, 1999). Devido a estas ameaças e da rápida expansão do arsenal nuclear chinês, os EUA têm também modernizado o seu arsenal (Center for Global Security Research Study Group, 2023), levando à atual corrida armamentista, e consequentemente aumentando a probabilidade de acidentes nucleares. Este conflito para além de criar uma corrida armamentista também fez suspender o Novo *Strategic and Tactical Arms Reduction* (START) que era muito importante para

continuar a reduzir o número de AN no mundo (Pifer, 2023). Os neorrealistas defensivos estão conscientes dos riscos do aumento da possibilidade de uso de AN que atualmente se verifica, pelo que defendem a importância dos acordos de controlo de armamento e apoiam o desarmamento nuclear, devido ao aumento, inclusive, da possibilidade do uso acidental deste tipo de armamento (Van Evera, 1999).

Contrariamente aos neorrealistas defensivos, os neorrealistas ofensivos consideram que as AN são instrumentos úteis para reforçar as capacidades ofensivas de um Estado (Mearsheimer, 2014). Estes pensadores defendem que uma dissuasão nuclear credível pode desencorajar a agressão de outros Estados, diminuindo assim o perigo da existência de um conflito (Jervis, 1989). Para os neorrealistas ofensivos, a posse de AN funciona apenas como um poderoso fator dissuasor, porque a utilização deste tipo de armamento iria ultrapassar qualquer benefício de uma agressão. A dissuasão nuclear, para estes, promove a estabilidade e preserva o equilíbrio de poderes (Mearsheimer, 2014). No que toca a um desarmamento nuclear, consideram que este é inatingível e perigoso porque iria conduzir a um desequilíbrio de poder, pondo em risco a segurança dos Estados. Os neorrealistas ofensivos defendem que a posse de AN por parte de alguns Estados vai motivar outros a possuir esse tipo de armamento para garantir a sua própria segurança, tal como acontece atualmente, com Estados a desenvolverem programas nucleares e a modernizarem os seus arsenais (Kristensen et al., 2023). Para estes, não se deve procurar o desarmamento absoluto, mas sim concentrar-se na gestão e nos acordos de controlo de armamento (Waltz, 2012).

4. Ameaça nuclear vigente no atual contexto geopolítico

Desde a Guerra Fria, a maior ameaça à paz mundial parece ser, assumidamente, a guerra que desde 2022 está a fustigar a Ucrânia assumindo o potencial de conflito nuclear um nível bastante elevado e real, apesar das tentativas de travar a proliferação de AN (Osaghae, 2023). Este conflito conduziu à rutura das relações diplomáticas entre a Rússia e o Ocidente, com uma tensão crescente que suscita redobradas preocupações relativas à potencial utilização de AN (ICAN, 2022).

A tensão geopolítica surge plenamente associada ao facto de a Rússia possuir o maior arsenal nuclear do mundo, com cerca de 5889 AN (Kristensen et al., 2023), e ameaça utilizá-las para defender o seu território, com o argumento de que os EUA abriram esse precedente após o lançamento das bombas atómicas no Japão em 1945 (Reuters, 2022b).

O conflito entre a Rússia e a Ucrânia trouxe, no entanto, limitações ao desenvolvimento do seu arsenal nuclear visto que a indústria russa não conseguiu cumprir com o plano de desenvolvimento nuclear de 2022, em parte devido às várias sanções que lhe foram impostas, pelo que será expectável que o plano de modernização nuclear russo para 2023 não seja, muito provavelmente, totalmente implementado (Starchak, 2023). Mas, apesar destas dificuldades, a modernização e a expansão do arsenal nuclear da Rússia continua a constituir um problema devido ao elevado risco de vir a recorrer a AN no âmbito do atual conflito.

Embora tenha um arsenal nuclear significativamente menor que os EUA e a Rússia, a China também tem vindo a modernizar, diversificar e expandir o seu arsenal. Desde 2021, tem acelerado a sua expansão nuclear com o objetivo de ter cerca de 1500 AN até 2035 (United States Department of Defense, 2022). Atualmente estima-se que a China tenha ultrapassado as 400 AN, um nível que os EUA não pensavam que se poderia atingir até ao final desta década (Bugos & Klare, 2023).

Nos últimos anos, a França e o Reino Unido também atualizaram os seus arsenais nucleares. Os dois Estados consideraram necessário modernizar o seu arsenal nuclear para

manter a sua credibilidade operacional a longo prazo no nível de rigor que atualmente é exigido pelo ambiente internacional (Mills, 2022; NTI, 2017).

Os Estados com AN não signatários do Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares (TNP) também têm modernizado e expandido os seus arsenais nucleares. A Índia e o Paquistão têm-nos desenvolvido, sendo o Paquistão considerado um dos Estados que mais rapidamente tem vindo a evoluir tais capacidades ao nível mundial (Arms Control Association, 2022). A Coreia do Norte possui, por sua vez, um programa nuclear que tem sido uma fonte de preocupação para a Comunidade Internacional. Este Estado continua a efetuar testes nucleares apesar de uma série de sanções e de várias tentativas diplomáticas para pôr fim a esta opção (Council on Foreign Relations, 2022). Estima-se que a Coreia do Norte tenha cerca de 20 AN (Reuters, 2023). Por último, Israel: apesar de nunca ter confirmado ou negado, pensa-se ser também um Estado dotado de AN. As suas capacidades neste domínio são desconhecidas e o seu programa nuclear é um segredo de Estado (NTI, 2022a).

O terrorismo nuclear por parte de atores não-estatais constitui também uma enorme ameaça nuclear. Estes atores não se sentem desencorajados de tentar adquirir armamento nuclear por qualquer tipo de ameaças, mesmo que a obtenção desse tipo de armamento seja muito improvável devido à Resolução 1540 do Conselho de Segurança da ONU, que formalmente impede a obtenção de AN por parte de atores não-estatais (Security Council Report, 2023), e também devido às medidas da AIEA, que é a principal organização para combater o terrorismo nuclear.

A ascensão de um sistema nuclear multipolar no qual vários Estados possuem AN, representa o fim de uma era caracterizada pelo equilíbrio de poder entre duas superpotências com AN (EUA e Rússia), sendo assim uma ameaça à efetividade da dissuasão nuclear. Por todas estas razões, é difícil preservar a estabilidade e parar a utilização de armamento nuclear (Kobara, 2023).

A Comunidade Internacional deve trabalhar em conjunto para enfrentar a crescente ameaça nuclear de acordo com os princípios do neorrealismo defensivo. Isto exige esforços consistentes de modo a procurar deter a proliferação de AN, continuar com os esforços de controlo de armamento e de desarmamento nuclear, assim como reforçar as medidas de segurança para deter o terrorismo nuclear. A humanidade pode trabalhar em direção a um futuro mais seguro, firmemente baseado nas ideias do neorrealismo defensivo, dando prioridade a essas iniciativas coordenadas entre nações e organizações internacionais.

5. Controlo de Armamento

As políticas de controlo de armamento constituem parte integrante das políticas de segurança das grandes potências e respetivas alianças. Assim, a análise dos processos de desarmamento e controlo de armamento tem de ser feita em paralelo com a análise das políticas de segurança seguidas pelas duas superpotências durante o período da Guerra Fria, que continuam a ser grandes potências militares. Em regra, os avanços nos processos de controlo de armamento coincidem com períodos de maior desanuviamento internacional, e os retrocessos com conjunturas de maior tensão (Rebolledo et al., 2019). “O controlo de armamento abrange todas as medidas que visam proibir, limitar, reduzir, estabilizar ou regulamentar a existência e a utilização do armamento, implicando a imposição de certas restrições na política de armamento de um Estado e também um controlo internacional da quantidade, características e utilização do armamento” (Albuquerque & Teles, 1998, p.2). O seu principal objetivo consiste em aumentar a estabilidade estratégica e previsibilidade, reduzindo o risco de guerra, assim como facilitar a gestão de crises (Rebolledo et al., 2019).

Os mecanismos de controlo de proliferação revelaram-se insuficientes para a conter eficazmente porque evidenciam muitas vulnerabilidades e denotam grandes limitações quanto ao controlo de exportações de tecnologias de duplo uso, mostrando pouca eficácia nos sistemas de verificação. As principais razões prendem-se com as estratégias de poder e influência das potências que aspiram à posse de armamento nuclear, sobretudo por causa do poder que usualmente surge associado a esta, e também às motivações associadas ao rentável comércio de armamento. Ainda assim, as medidas de controlo têm desempenhado um papel importante no sentido de melhorar as condições de segurança, reduzindo riscos, evitando situações com escaladas incontroláveis e atenuando a corrida armamentista, através do desenvolvimento de medidas de confiança e cooperação (Rebolledo et al., 2019).

Devido ao período de tensão que atualmente se vive na Comunidade Internacional, Guterres (2019) afirmou que as relações entre Estados com AN se estão a afundar num clima de desconfiança, chamando a atenção para a necessidade de investir nos tratados e acordos existentes para que o objetivo de chegar a um desarmamento nuclear possa ser preservado, para a segurança de toda a humanidade.

O número de AN diminuiu significativamente depois do final da Guerra Fria, de um pico de aproximadamente 70300 em 1986 para cerca de 12500 (Kristensen et al., 2023), e isso deve-se aos acordos de controlo de armamento.

A política de controlo de armamento iniciou-se em 1987 com o *Intermediate-Range Nuclear Forces Treaty* (INF), que fez eliminar todos os misseis de curto e médio alcance dos EUA e da URSS e introduziu também mecanismos extensivos de verificação e troca de dados, incluindo inspeções no local entre as duas potências (NTI, 2019). No entanto, este tratado foi suspenso em 2019 devido aos EUA alegarem várias violações ao mesmo por parte da Rússia (Bugos, 2019). Outro tratado entre os EUA e a URSS foi o START I, assinado em 1991, entrando em vigor em 1994 e expirou em 2009. Assumiu o objetivo de reduzir as AN estratégicas entre ambas as potências, limitando-as a 1600 veículos de entrega e 6000 ogivas nucleares, obtendo uma redução de 10000 a 12000 ogivas comparando com 1991 (NTI, 2011). Em 1993 foi assinado entre as mesmas potências o START II, que foi ratificado em 1996 pelos EUA e em 2000 pela Rússia. Este tratado veio complementar o START I, que dividia a redução de armamento nuclear em duas fases: no final da primeira fase, os EUA e a Rússia teriam de reduzir as suas AN estratégicas destacadas para 3800 a 4250; no final da segunda fase, cada Estado não poderia ter mais de 3500 ogivas nucleares destacadas, sendo que destas, não mais de 1750 poderiam estar em submarinos (NTI, 2021). Este tratado foi declarado nulo pela Rússia em 2002 como resposta ao cancelamento do *Anti-Ballistic Missile Treaty* por parte dos EUA, e também porque este não havia entrado em vigor (Boese, 2002). Para continuar com a redução e limitação de AN, surge o Novo START que foi assinado em 2010 e entrou em vigor em 2011, substituindo assim o START I, o START II e o *Strategic Offensive Reductions Treaty* (SORT) (NTI, 2023). Este Novo START estabelece que tanto os EUA como a Rússia não podem ter mais de 1550 ogivas nucleares estratégicas destacadas, inclui um conjunto de medidas de verificação que estão adaptadas para corresponder aos objetivos do tratado, podendo ser observações, inspeções, partilha de informação e 18 inspeções no local por ano para cada Estado (United States Department of State, 2023). No entanto, em fevereiro de 2023, a Rússia, decidiu suspender a sua participação no Novo START, dizendo que para retomar as negociações e atividades deste tratado, os EUA teriam de cortar o seu apoio à Ucrânia e trazer o Reino Unido e a França para a mesa de negociações sobre o controlo de armamento (Bugos, 2023).

Desde o início das negociações do Novo START que os EUA nele querem incluir também as AN táticas. Esta inclusão constituiria um próximo passo lógico para o tratado, no entanto, nunca seria uma negociação fácil visto que tanto em 2011 como em 2021 a Rússia considerou

inaceitável incluir AN táticas no tratado (Pifer, 2023). A guerra entre a Rússia e a Ucrânia veio efetivamente tornar mais difícil chegar a um acordo para limitar as AN táticas, devido à ameaça da Rússia de utilizar as mesmas nesse conflito (Lendon, 2022).

Seria desejável que os EUA e a Rússia iniciassem as negociações para um novo tratado que continue a limitar e a reduzir o número de ogivas nucleares e também que limitasse as AN táticas, monitorizasse igualmente os respetivos sistemas de lançamento, de modo a assegurar uma verificação mais complexa do que a presente no Novo START. Ambos os Estados têm interesse na redução do risco nuclear. No entanto, com o atual conflito e com a suspensão do Novo START, a confiança entre os dois Estados é cada vez menor e as decisões a tomar são mais difíceis e demoradas (Pifer, 2023), se é que, no atual contexto geopolítico, isso seja possível.

6. A opção zero de armas nucleares

6.1 Tratado de não-proliferação de armas nucleares

Assinado em 1968, o TNP assumiu-se como o principal tratado no domínio nuclear. Este documento é revisto de cinco em cinco anos e foi assinado por mais países do que qualquer outro tratado de limitação de armas, demonstrando a intenção em melhorar a cooperação entre países no que toca ao desenvolvimento nuclear (Bureau of International Security and Nonproliferation, 2023).

O TNP divide os seus Estados-Membros em dois tipos: Estados com AN e Estados sem AN. No primeiro grupo de países estão aqueles que construíram e detonaram uma AN antes do dia um de janeiro de 1967, estes países são os EUA, a Rússia, a China, a França e o Reino Unido, conhecidos também por Clube Nuclear e P5. O segundo grupo de países são todos os restantes que não podem tentar comprar ou produzir AN (Kimball, 2022).

Este tratado é quase mundialmente aceite, excetuando-se a Índia, o Paquistão, Israel e a Coreia do Norte, que não fazem parte do tratado (Lee & Nacht, 2020). Relativamente aos três primeiros países, estes têm capacidade de armamento nuclear, logo apenas poderiam entrar no tratado se desmantelassem o seu arsenal nuclear, tal como a África do Sul fez para conseguir aderir ao tratado (Kimball, 2022). A Coreia do Norte retirou-se do tratado em 2003 porque achava que a Agência Internacional de Energia Atómica (AIEA) não contribuía para o bem-estar da sua nação (Scheinman, 2005). O TNP tem como objetivo tratar de vários assuntos. O primeiro é a não-proliferação, como está descrito nos Artigos I, II e III. Estes artigos afirmam que nenhum Estado com AN deve transferi-las, nem deve ajudar, encorajar ou induzir qualquer Estado sem AN a fabricar ou adquirir esse tipo de armamento de outra forma, já que os Estados sem AN não devem receber AN de ninguém, nem fabricar, nem adquirir, mas sim aceitar as salvaguardas da AIEA sobre todos os materiais nucleares nos seus territórios. O segundo assunto é o uso pacífico do material e tecnologia nuclear, visto que o Artigo IV diz que os Estados podem desenvolver, produzir e utilizar energia nuclear para fins pacíficos que estejam em conformidade com os Artigos I e II, comprometendo-se a facilitar e a participar na partilha de equipamentos e informações sobre o uso pacífico da energia nuclear. O terceiro tópico é o desarmamento, já que o Artigo VI diz que todas as partes devem negociar de boa-fé as medidas efetivas relativamente à cessação da corrida armamentista e ao desarmamento nuclear geral. Noutros assuntos, temos o Artigo VII que refere o direito de todos os Estados concluírem os tratados regionais, tal como são os Tratados Regionais de Zona Livre de Armas Nucleares (TRZLAN), e o TNP que foi também acompanhado pela Resolução 255 do Conselho de Segurança da ONU, garantindo segurança para os Estados sem AN que fazem parte do tratado (NTI, 2022b).

No entanto, como qualquer tratado, o TNP está sujeito a várias críticas e desafios devido à permanente mudança do ambiente da Comunidade Internacional. Estes desafios e críticas podem eventualmente colocar em causa a efetividade do tratado (Lee & Nacht, 2020).

O primeiro desafio surge da tentativa de proliferação por parte de alguns Estados, tal como a Índia, o Paquistão e Israel. O Irão também iniciou um programa nuclear, que causou muitas desconfianças à Comunidade Internacional, conduzindo à criação do JCPOA que foi suspenso em 2018. Existe a necessidade urgente do Irão não desenvolver mais o seu programa nuclear, visto que na ausência de um novo acordo de redução da expansão nuclear do Irão, verifica-se cada vez mais o investimento no enriquecimento de urânio por parte daquele ator, com a AIEA a encontrar partículas com 83.7% de pureza, que é muito próximo dos 90% que caracteriza o armamento nuclear (Bell & Gritten, 2023). O facto de a Coreia do Norte ver o seu programa nuclear como um símbolo do poder da sua nação, mostra que nenhuma pressão de outro Estado vai impedir o desenvolvimento do programa. Tanto a Rússia como a China têm utilizado o seu poder no Conselho de Segurança da ONU para bloquear sanções à Coreia do Norte pela sua série de testes nucleares (Herskovitz & Bloomberg, 2023), sendo que 2022 foi o ano com mais testes nucleares registados por parte da Coreia do Norte (Davenport, 2023).

Outro desafio é o reaparecimento do nacionalismo em vários Estados, ideologia que incentiva os seus cidadãos a valorizar e a elevar os valores do seu país, colocando os interesses nacionais em primeiro lugar (Bieber, 2018), ameaçando assim o TNP já que este tipo de pensamento pode conduzir à pressão no sentido de uma eventual renegociação das obrigações impostas pelo TNP aos Estados com AN para terem medidas mais favoráveis no que toca ao seu estatuto (Mendes, 2021). Assim, existe uma crescente competição entre as principais potências nucleares que as leva a modernizarem-se na precisão dos sistemas de armas e nos novos meios de defesa (Galamas, 2015) enfraquecendo o TNP não só devido ao desenvolvimento dos arsenais nucleares, mas também através das divergências entre as potências nucleares, que são os membros do Conselho de Segurança da ONU, e portanto, contribuindo para aumentar o risco de insegurança à escala global. Deste modo, se existir algum país que esteja a violar o tratado, este assunto nunca pode ser resolvido de uma maneira imparcial (Duarte, 2019), tal como conseguimos perceber, pela última conferência de revisão do TNP que se realizou em 2022.

De facto, durante a realização desta conferência, surgiram várias divergências entre os Estados-Membros sobre os pilares do tratado. Os Estados com AN e os Estados sem AN discordaram no que toca aos esforços e progresso feito pelos Estados com AN para cumprir com o Artigo VI (NTI, 2022b). No entanto, foi reconhecido que o impacto do uso de AN está a pairar sobre toda a humanidade, visto que o risco de utilização se encontra hoje num nível extremamente elevado, reforçando assim o argumento que defende que todas as ogivas devem ser desmanteladas, destruídas e todas as AN devem ser eliminadas da Terra (Foye, 2022).

6.2 Tratado de proibição de armas nucleares

Em articulação com o TNP a que atrás nos referimos, o Tratado de Proibição de Armas Nucleares (TPAN) entrou em vigor em 2021 com o objetivo de proibir o desenvolvimento, teste, produção, aquisição, posse, armazenamento, transferência, colocação, instalação, uso e ameaça de uso de AN (UNODA, 2023).

Este tratado reforça os compromissos do TNP de modo a que os Estados signatários cumpram com a sua responsabilidade de procurar medidas efetivas de desarmamento nuclear (Gibbons, 2018). No entanto, os Estados com AN e os seus aliados opuseram-se desde o início ao TPAN porque consideram que este tratado assenta em perspetivas irrealistas com potencial muito reduzido no que se refere a efeitos práticos, afirmando alguns autores inclusive, que pode

prejudicar o TNP e as salvaguardas incluídas no mesmo (Kimball & Bugos, 2022a). Os defensores deste tratado garantem que a política de dissuasão nuclear não é eficaz para garantir a segurança internacional (Benedict, 2017) e consideram que o TPAN vem reforçar o TNP e a sua exigência de alcançar um desarmamento nuclear, com o objetivo de desencadear ações urgentes para reduzir o risco nuclear e promover o desarmamento (Kimball & Bugos, 2022a).

Outros autores, pelo contrário, argumentam que o TPAN põe em causa a política de dissuasão nuclear existente, visto que os países com AN têm vindo a modernizar os seus arsenais nucleares, não contribuindo para uma política de dissuasão que mantenha a segurança internacional (ICAN, 2023).

Em junho de 2022, teve lugar a primeira reunião dos Estados-Membros do TPAN com o objetivo de construir uma estrutura para a aplicação eficaz do tratado. Têm sido feitos esforços para expandir o tratado a mais Estados, porque para atingir a sua finalidade é necessário que os Estados com AN adiram a este tratado de modo a implementar um desarmamento e abordar as consequências colaterais do uso de AN (Gibbons & Herzog, 2022).

6.3 Plano de ação global zero

A Comunidade Internacional não só tem realizado esforços para reforçar os tratados que têm o objetivo de alcançar um desarmamento nuclear, como também tem investido em movimentos com esse mesmo objetivo.

Um movimento conhecido como Global Zero começou a ganhar força devido a vários líderes mundiais terem começado a partilhar o objetivo de eliminar todas as AN do mundo até 2045 através de um processo multilateral, universal e verificável (O'Hanlon, 2010).

O Plano Global Zero está dividido em quatro fases. A Fase I incide em reduzir o arsenal nuclear dos EUA e da Rússia para 1100 ogivas nucleares cada. A Fase II consiste em reduzir o arsenal nuclear dos EUA e da Rússia para 300 ogivas cada. A Fase III tem como objetivo que os Estados com AN negoceiem, assinem e ratifiquem os Acordos Global Zero que pressupõem remover todas as AN do serviço militar dentro de dois anos e exigem a destruição completa de todas as ogivas nucleares até 2045. A última fase, Fase IV, consiste na constante proibição, verificação e execução universal da remoção das AN (Global Zero, 2023).

No entanto, há quem argumente que o Global Zero não aborda explicitamente a questão das razões que sustentam a expectativa de que um mundo sem AN seja mais seguro do que um mundo com algumas AN, incluindo também algumas dúvidas sobre que reduções drásticas fazem sentido, examinando igualmente as contingências de um mundo sem AN para verificar se são superiores a um mundo com AN, considerando o esforço que se tem verificado no último meio século quanto à estabilidade de um mundo em dissuasão nuclear. Verifica-se também a existência da preocupação com os arsenais nucleares do Irão, da Coreia do Norte e também dos atores não-estatais, mostrando que o desarmamento nuclear completo da Rússia, dos EUA, China, França e Reino Unido é tangencial para a perspetiva sobre o Irão, a Coreia do Norte e dos atores não-estatais (Schelling, 2009).

7. Conclusões

Partindo do princípio de que os riscos associados à proliferação de AN têm vindo a aumentar ao longo da história e a ter efeitos significativos na geopolítica e estabilidade internacional, consideramos ter sido possível demonstrar que as tentativas de inverter o atual estado de situação não têm sido bem-sucedidas e que os progressos registados na prevenção da proliferação de AN desde o fim da Guerra Fria têm vindo a piorar devido à suspensão de acordos de controlo de armamento e conflitos no âmbito dos quais se assiste ao aumento do nível de tensões e com ele, da crescente probabilidade de uso de armamento nuclear.

Em 2022, com a invasão da Ucrânia por parte da Rússia, foi provocada uma escalada de tensões no mundo devido às constantes ameaças por parte deste ator em utilizar AN neste conflito, aumentando assim a iminência de uma guerra nuclear e provocando a alteração do paradigma de dissuasão em vigência. Através do neorrealismo defensivo conseguimos explicar as ações russas. Apesar dos pensadores que se enquadram nesta perspetiva considerarem que as AN são um instrumento importante na dissuasão nuclear, esta apenas é credível caso um Estado queira melhorar as suas probabilidades de sobrevivência e de segurança. Estes também afirmam que nem todos os Estados têm as mesmas crenças e perceções, e deste modo, a racionalidade dos Estados faz-nos questionar sobre o sucesso da dissuasão nuclear. As ameaças de utilização de AN por parte da Rússia no conflito com a Ucrânia deterioraram as relações político-diplomáticas entre aquele ator e os EUA, levando mesmo à suspensão do Novo START, tratado fundamental no controlo de armamento entre estes dois Estados, que possuem os maiores arsenais nucleares mundiais. Deste modo, a ameaça de utilização de armamento nuclear no conflito entre a Rússia e a Ucrânia aumentou a probabilidade de um conflito nuclear, ao ponto de estarmos agora mais vulneráveis do que nunca a um apocalipse nuclear, e de acordo com o neorrealismo defensivo, visto que a Rússia não possui AN exclusivamente para garantir a sua sobrevivência e segurança, torna-se evidente que a posse de AN não contribui para uma dissuasão nuclear eficaz.

A perspetiva neorrealista defensiva argumenta que os conflitos ocorrem quando existem mudanças no sistema internacional devido às crenças e perceções dos Estados. A Rússia, ao invadir a Ucrânia, está a tentar mudar a estrutura do sistema internacional com a tentativa de expandir o seu território, utilizando as AN não só para garantir a sua sobrevivência e segurança, mas também para estabelecer supremacia na Comunidade Internacional, perturbando assim o equilíbrio de poder outrora existente. Este conflito, para além de deteriorar a relação entre estes dois Estados também causou um clima de desconfiança geral no mundo, que, em conjunto com as doutrinas de segurança nacional profundamente enraizadas que vêem as AN e a estratégia de dissuasão como um símbolo da sua segurança, são consideradas um problema para alcançar o desarmamento nuclear global. Outro problema são os desafios encontrados em torno do TNP. É fundamental garantir o cumprimento dos Estados-Membros, uma vez que este tratado é o principal instrumento de controlo de disseminação de AN no sistema internacional. Nestes desafios, estão incluídos o aumento de esforços de proliferação por parte de Estados, o ressurgimento de nacionalismos com as suas doutrinas de segurança profundamente enraizadas a nível mundial, o aumento da corrida armamentista entre as principais potências nucleares e o aumento de encargos e responsabilidades da AIEA que cada vez mais tem dificuldade em verificar os processos de desarmamento. De acordo com os neorrealistas defensivos, o desarmamento nuclear deve ser apoiado para reduzir esta possibilidade do uso acidental de AN, no entanto, os desafios acima mencionados têm aumentando esta possibilidade, podendo-os considerar como os principais obstáculos ao desarmamento nuclear.

Para travar o aumento da proliferação de AN e consequente aumento do risco de utilização de AN, para os neorrealistas defensivos, será relevante reforçar o TNP visto que este tratado é fundamental para alcançar o desarmamento nuclear e para reduzir os riscos do uso de AN e equilibrar o poder entre os Estados no sistema internacional.

É também necessário um aumento a credibilidade do TPAN e da sua norma de deslegitimação das AN pela Comunidade Internacional de modo a que os Estados tenham vontade política para apoiar este tratado. É crucial que a norma do tabu nuclear, que proíbe o uso de AN, ganhe mais expressão na Comunidade Internacional. No entanto, a relutância dos Estados em renunciar aos seus arsenais nucleares pode ser explicada através do neorrealismo defensivo, visto que este enfatiza que os Estados são atores racionais que procuram maximizar

a sua segurança, e a posse deste tipo de armamento é uma componente crucial da estratégia nacional desses Estados. No entanto, é possível que estes Estados se sintam pressionados a ratificar o TPAN, à semelhança do TNP, visto que o neorrealismo defensivo defende a importância dos acordos de controlo de armamento e do desarmamento nuclear devido ao elevado risco da possibilidade de uso de AN no atual contexto geopolítico.

É também necessário cumprir com o Documento de Viena que é uma medida de segurança que obriga os Estados a apresentarem informações sobre o seu pessoal militar e o planeamento de exercícios militares e também com os acordos bilaterais de controlo de armamento, de modo a que se possa criar condições para um desarmamento nuclear. Para isso, é preciso também apoiar projetos como o Global Zero que tem o objetivo de eliminar as AN do mundo até 2045, visto que tem um plano bem delineado para proceder a esse desarmamento. No entanto, à luz do neorrealismo defensivo, é necessário que esta iniciativa seja percecionada como credível, exequível e suscetível de, efetivamente, contribuir para a ordem e segurança internacionais.

É improvável que as AN sejam erradicadas num futuro próximo, porque, como defende o neorrealismo defensivo, nenhum Estado quer correr o risco de as abandonar enquanto outros não o fizerem. No entanto, é necessário perceber que as dificuldades enfrentadas só podem ser resolvidas com esforço de toda a Comunidade Internacional. No entanto, esta opção deve ser equacionada devido ao elevado risco de uso de AN no atual contexto geopolítico.

Referências bibliográficas

Albuquerque, C., & Teles, P. G. (1998). Controlo e redução do armamento. Janus 1998: Suplemento: As Forças Armadas Portuguesas. https://repositorio.ual.pt/handle/11144/2276

Arms Control Association. (2022). Arms Control and Proliferation Profile: Pakistan. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/factsheets/pakistanprofile

Bell, B., & Gritten, D. (2023). Iran nuclear: IAEA inspectors find uranium particles enriched to 83.7%. BBC News. https://www.bbc.com/news/world-middle-east-64810145

Benedict, K. (2017). On the prohibition of nuclear weapons treaty. Bulletin of the Atomic Scientists. https://thebulletin.org/2017/07/on-the-prohibition-of-nuclear-weapons-treaty/

Bieber, F. (2018). Is Nationalism on the Rise? Assessing Global Trends. Ethnopolitics, 17(5), 519–540. https://doi.org/10.1080/17449057.2018.1532633

Boese, W. (2002). Russia Declares Itself No Longer Bound by START II. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/act/2002-07/news/russia-declares-itself-longer-bound-start-ii

Bugos, S. (2019). U.S. Completes INF Treaty Withdrawal. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/act/2019-09/news/us-completes-inf-treaty-withdrawal

Bugos, S. (2023). Russia Suspends New START. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/act/2023-03/news/russia-suspends-new-start

Bugos, S., & Klare, M. (2023). Pentagon: Chinese Nuclear Arsenal Exceeds 400 Warheads. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/act/2023-01/news/pentagon-chinese-nuclear-arsenal-exceeds-400-warheads

Bureau of International Security and Nonproliferation. (2023). Nuclear Non-Proliferation Treaty. United States Department of State. https://www.state.gov/nuclear-nonproliferation-treaty/

Caves, Jr., & Seth Carus, W. (2014). The Future of Weapons of Mass Destruction: Their Nature and Role in 2030. Center for the Study of Weapons of Mass Destruction, Art. 10. https://wmdcenter.ndu.edu/Portals/97/Documents/Publications/Occasional%20Papers/10_Future%20of%20WMD.pdf

CEDN. (2013). Conceito Estratégico de Defesa Nacional. Conceito Estratégico de Defesa Nacional.

Center for Global Security Research Study Group. (2023). China's Emergence as a Second Nuclear Peer: Implications for U.S. Nuclear Deterrence Strategy. The Center for Global Security Research.

Conselho de Segurança da ONU. (1948). Comission for Conventional Armaments. Resolutions Adopted by the Comission at Its Thirteenth Meeting.

Council on Foreign Relations. (2022). What to Know About Sanctions on North Korea. Council on Foreign Relations. https://www.cfr.org/backgrounder/north-korea-sanctions-un-nuclear-weapons

Davenport, K. (2023). North Korea Plans to Expand Nuclear Arsenal. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/act/2023-01/news/north-korea-plans-expand-nuclear-arsenal

Duarte, S. (2019). Ditch the Bomb, not the NPT - Bulletin of the Atomic Scientists. Bulletin of the Atomic Scientists. https://thebulletin.org/2019/11/ditch-the-bomb-not-the-npt/

Faiola, A. (2022). Why Putin's nuclear threat in Ukraine could be more than bluster. The Washington Post. https://www.washingtonpost.com/world/2022/03/15/putin-russia-nuclear-weapons-ukraine/

Foye, H. (2022). UN Member State Reactions at the Close of the 2022 NPT Review Conference. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/blog/2022-09-06/un-member-state-reactions-close-2022-npt-review-conference

Galamas, F. (2015). The Motivations Behind the Nuclear Modernization Programs of the P5. Nação e Defesa, 140, 25–46.

Gibbons, R. D. (2018). The humanitarian turn in nuclear disarmament and the Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons. The Nonproliferation Review, 25(1–2), 11–36. https://doi.org/10.1080/10736700.2018.1486960

Gibbons, R. D., & Herzog, S. (2022). The First TPNW Meeting and the Future of the Nuclear Ban Treaty. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/act/2022-09/features/first-tpnw-meeting-future-nuclear-ban-treaty

Global Zero. (2023). The Global Zero Action Plan. Global Zero. https://www.globalzero.org/reaching-zero/

Gonçalves, A. (2004). Métodos e Técnicas de Investigação Social I - Programa, Conteúdo e Métodos. Universidade Do Minho.

Guterres, A. (2019). Guterres pede a EUA e Rússia que prolonguem acordo de redução de armas nucleares. ONU News. https://news.un.org/pt/story/2019/09/1688712

Guterres, A. (2022). Elimination of Nuclear Weapons 'the Greatest Gift' World Could Give to Future Generations, Secretary-General Stresses, Marking International Day. United Nations Meetings Coverage and Press Releases. https://press.un.org/en/2022/sgsm21492.doc.htm

Herskovitz, J., & Bloomberg. (2023). What to Watch as North Korea Ratchets Up Nuclear Tensions. Time. https://time.com/6256935/north-korea-nuclear-developments/

ICAN. (2022). Why condemn threats to use nuclear weapons? International Campaign to Abolish Nuclear Weapons. https://www.icanw.org/why_condemn_threats_to_use_nuclear_weapons?locale=en

ICAN. (2023). What about "nuclear deterrence" theory? International Campaign to Abolish Nuclear Weapons. https://www.icanw.org/what_about_nuclear_deterrence_theory

Jervis, R. (1989). The Meaning of the Nuclear Revolution: Statecraft and the Prospect of Armageddon. Cornell University Press. https://books.google.pt/books?id=WDeZHrS9r2EC

Kimball, D. (2022). The Nuclear Nonproliferation Treaty (NPT) at a Glance. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/factsheets/nptfact

Kimball, D., & Bugos, S. (2022). The Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons At A Glance. Arms Control Association. https://www.armscontrol.org/factsheets/nuclearprohibition

Kobara, J. (2023). End of two-way nuclear deterrence makes world more dangerous. Nikkei Asia. https://asia.nikkei.com/Spotlight/Datawatch/End-of-two-way-nuclear-deterrence-makes-world-more-dangerous

Korda, M. (2022). How Russia's war in Ukraine could derail its nuclear modernization. Outrider. https://outrider.org/nuclear-weapons/articles/how-russias-war-ukraine-could-derail-its-nuclear-modernization

Kristensen, H., Korda, M., Johns, E., & Kohn, K. (2023). Status of World Nuclear Forces. Federation Of American Scientists. https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-world-nuclear-forces/

Lakatos, E. M., & Marconi, M. de A. (2003). Fundamentos de Metodologia Científica (Atlas, Ed.; 5th ed.). https://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india

Lee, M., & Nacht, M. (2020). Challenges to the Nuclear Non-Proliferation Treaty. Strategic Studies Quarterly, 14(3), 95–120. https://www.jstor.org/stable/26937413

Lendon, B. (2022). Armas nucleares táticas de Putin podem ter o mesmo impacto que as bombas atómicas lançadas no Japão. CNN Portugal. https://cnnportugal.iol.pt/guerra/ucrania/armas-nucleares-taticas-de-putin-podem-ter-o-mesmo-impacto-que-as-bombas-atomicas-lancadas-no-japao/20220926/63316dd90cf2f9a86eb77d78

Ljunggren, D., & Trevelyan, M. (2022). Kremlin: Russia would only use nuclear weapons if its existence were threatened. Reuters. https://www.reuters.com/world/europe/kremlin-russia-would-only-use-nuclear-weapons-if-its-existence-were-threatened-2022-03-22/

Magid, S., & Shalomov, Y. (2022). Russia's veto makes a mockery of the United Nations Security Council - Atlantic Council. Atlantic Council. https://www.atlanticcouncil.org/blogs/ukrainealert/russias-veto-makes-a-mockery-of-the-united-nations-security-council/

Mearsheimer, J. (1993). The Case for a Ukrainian Nuclear Deterrent. Foreign Affairs, 72(3), 50–66. https://doi.org/10.2307/20045622

Mearsheimer, J. (2014). The Tragedy of Great Power Politics. W. W. Norton. https://books.google.pt/books?id=hSdFAwAAQBAJ

Mendes, J. (2021). A Proliferação de Armas Nucleares: Riscos e Desafios para o Século XXI. Academia da Força Aérea.

Mills, C. (2022). Nuclear weapons at a glance: France. House of Commons Library. https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-9074/CBP-9074.pdf

Morgenthau, H. J. (1978). Politics Among Nations: The Struggle for Power and Peace (5th ed.). Alfred A. Knopf. https://books.google.pt/books?id=M9IIAAAAMAAJ

NTI. (2011). START I. Nuclear Threat Initiative. https://www.nti.org/education-center/treaties-and-regimes/treaties-between-united-states-america-and-union-soviet-socialist-republics-strategic-offensive-reductions-start-i-start-ii/

NTI. (2017). United Kingdom Nuclear Overview. Nuclear Threat Initiative. https://www.nti.org/analysis/articles/united-kingdom-nuclear/

NTI. (2019). INF Treaty. Nuclear Threat Initiative. https://www.nti.org/education-center/treaties-and-regimes/treaty-between-the-united-states-of-america-and-the-union-of-soviet-

socialist-republics-on-the-elimination-of-their-intermediate-range-and-shorter-range-missiles/
NTI. (2021). START II. Nuclear Threat Initiative. https://www.nti.org/education-center/treaties-and-regimes/treaty-between-united-states-america-and-union-soviet-socialist-republics-strategic-offensive-reductions-start-ii/
NTI. (2022a). Israel. Nuclear Threat Initiative. https://www.nti.org/countries/israel/
NTI. (2022b). NPT. Nuclear Threat Initiative. https://www.nti.org/education-center/treaties-and-regimes/treaty-on-the-non-proliferation-of-nuclear-weapons/
NTI. (2023). New START Treaty. Nuclear Threat Initiative. https://www.nti.org/education-center/treaties-and-regimes/treaty-between-the-united-states-of-america-and-the-russian-federation-on-measures-for-the-further-reduction-and-limitation-of-strategic-offensive-arms/
O'Hanlon, M. E. (2010). Is a World Without Nuclear Weapons Really Possible? Brookings. https://www.brookings.edu/opinions/is-a-world-without-nuclear-weapons-really-possible/
Osaghae, E. E. (2023). The View from the Global South: The Bridge to Cross. Council of Councils. https://www.cfr.org/councilofcouncils/global-memos/invasion-shook-world
Pifer, S. (2016). A Realist's Rationale for a World without Nuclear Weapons.
Pifer, S. (2023). How the war in Ukraine hinders US-Russian nuclear arms control. Bulletin of the Atomic Scientists. https://thebulletin.org/2023/01/how-the-war-in-ukraine-hinders-us-russian-nuclear-arms-control/#post-heading
Quivy, R., & Campenhoudt, L. (2005). Manual de Investigação em Ciências Sociais (4a Ed). Gradiva.
Rebolledo, V. G., Viana, V. R., Garcia, F. P., & Correia, J. P. (2019). Proliferação e Controlo de Armamentos. https://www.youtube.com/watch?v=ArQLq1PRnZU
Reuters. (2022a). A Rússia poderá vir a utilizar armas nucleares? Público. https://www.publico.pt/2022/05/06/mundo/noticia/russia-podera-utilizar-armas-nucleares-2005203
Reuters. (2022b). Russia is expanding and modernizing its nuclear arsenal, defense secretary says. NBC News. https://www.nbcnews.com/news/world/russia-ukraine-war-nuclear-arsenal-vladimir-putin-lloyd-austin-rcna61103
Reuters. (2023). High activity spotted at North Korea nuclear complex after Kim's bomb-fuel order. NBC News. https://www.nbcnews.com/news/world/high-activity-spotted-north-korea-nuclear-complex-kims-bomb-fuel-order-rcna77804
Sagan, S. D. (1996). Why Do States Build Nuclear Weapons?: Three Models in Search of a Bomb. International Security, 21(3), 54–86. https://doi.org/10.2307/2539273
Scheinman, L. (2005). Scheinman: Iran, North Korea, and the NPT's Loopholes. Council on Foreign Relations. https://www.cfr.org/interview/scheinman-iran-north-korea-and-npts-loopholes
Schelling, T. C. (2009). A world without nuclear weapons? Daedalus, 138(4), 124–129. https://doi.org/10.1162/daed.2009.138.4.124
Schweller, R. L. (2006). Unanswered Threats: Political Constraints on the Balance of Power. Princeton University. https://books.google.pt/books?id=-XVB9RJiYhAC
Security Council Report. (2023). Monthly Forecast. Security Council Report.
Shultz, G. P., Perry, W. J., Kissinger, H. A., & Nunn, S. (2013). Toward a World without Nuclear Weapons. Wall Street Journal. www.NuclearSecurityProject.org
Starchak, M. (2023). The Results of Russia's 2022 Nuclear Modernization. The Jamestown Foundation. https://jamestown.org/program/the-results-of-russias-2022-nuclear-modernization/

Taliaferro, J. W. (2000). Security Seeking under Anarchy: Defensive Realism Revisited. International Security, 25(3), 128–161. http://www.jstor.org/stable/2626708

United States Department of Defense. (2022). Military and Security Developments Involving the People's Republic of China 2022. https://media.defense.gov/2022/Nov/29/2003122279/-1/-1/1/2022-MILITARY-AND-SECURITY-DEVELOPMENTS-INVOLVING-THE-PEOPLES-REPUBLIC-OF-CHINA.PDF

United States Department of State. (2023). New START Treaty. United States Department of State. https://www.state.gov/new-start/

UNODA. (2023). Treaty on the prohibition of nuclear weapons. United Nations Office for Disarmament Affairs. https://www.un.org/disarmament/wmd/nuclear/tpnw/

Van Evera, S. (1999). Causes of War: Power and the Roots of Conflict. Cornell University Press. http://www.jstor.org/stable/10.7591/j.ctt24hg70

Waltz, K. N. (1979). Theory of International Politics. McGraw-Hill. https://books.google.pt/books?id=j6qOAAAAMAAJ

Waltz, K. N. (2012). Why Iran Should Get the Bomb: Nuclear Balancing Would Mean Stability. Foreign Affairs, 91(4), 2–5. http://www.jstor.org/stable/23218033

Whitcomb, D. (2022). Kremlin spokesman: Russia would use nuclear weapons only in case of "threat to existence of state." Reuters. https://www.reuters.com/world/kremlin-spokesman-russia-would-use-nuclear-weapons-only-case-threat-existence-2022-03-28/

A Satisfação como variável mediadora na influência do balanço Trabalho-Família na retenção dos militares dos Quadros Permanentes da Força Aérea

Fonte: Força Aérea Portuguesa (2014).

Autor: TEN/PILAV Pedro Miguel Carvalho Marques
Mestrado Integrado em Aeronáutica Militar
Academia da Força Aérea, Sintra

Orientadora: Professora Doutora Sónia P. Gonçalves
Instituto Superior de Ciências Sociais e Políticas, Universidade de Lisboa

Coorientador: CAP/PSI Adelino Pereira
Força Aérea Portuguesa, Centro de Psicologia da Força Aérea, Lisboa

Resumo: A retenção constitui um tema na atual agenda das organizações militares, pelo que o presente trabalho de investigação tem como principal objetivo analisar a relação entre o Balanço Trabalho-Família, a Satisfação no Trabalho e a Retenção dos Militares dos Quadros Permanentes da Força Aérea. Para tal, optou-se por uma metodologia quantitativa por questionário aplicado através da plataforma *Google Forms*. A recolha de dados teve por base todos os militares dos Quadros Permanentes da Força Aérea, excluindo os Oficiais Generais, tendo participado 445 militares, correspondendo a 14,8% da população. Os resultados obtidos indicam que tanto o Balanço Trabalho-Família, como a Satisfação no Trabalho possuem correlações positivas significativas com a Retenção dos Militares. E que, a relação entre o Balanço Trabalho-Família e a Retenção dos Militares é totalmente mediada pela Satisfação no Trabalho. Esta investigação contribui e dá evidências estatisticamente significativas à Força Aérea, para que se possam tomar medidas que contribuam para uma melhor eficácia na Retenção dos Militares. No final deste trabalho são apresentadas limitações do estudo assim como recomendações para investigações futuras.

Palavras-chave: Balanço Trabalho-Família; Satisfação no Trabalho; Retenção; Militares; Força Aérea Portuguesa.

1. Introdução

O sucesso de qualquer organização depende da retenção de profissionais de excelência dessa organização (Lahkar Das & Baruah, 2013). O mercado de trabalho encontra-se cada vez mais competitivo, e conseguir reter o talento acaba por ser uma vantagem para qualquer organização (Camara et al., 2010). O principal objetivo da retenção é evitar a perda de trabalhadores competentes, pois tal perda pode ter um efeito adverso na produtividade e na prestação de serviços (Samuel & Chipunza, 2009).

O significativo constrangimento nas Forças Armadas (FFAA) tem obrigado as chefias a refletir sobre a gestão criteriosa dos seus recursos humanos, materiais e financeiros (Abreu, 2019). Desde o fim do Serviço Militar Obrigatório (SMO), as FFAA têm-se confrontado com certos problemas, como a dificuldade de recrutamento, o *turnover* e a dificuldade de retenção. As saídas de militares provocam a perda de recursos humanos altamente especializados, no qual se investiu, quer em formação, quer em conhecimentos, em áreas com características tão particulares que são difíceis de substituir (Rijo et al., 2018).

Nos últimos anos, é de conhecimento público que as FFAA se encontram a debater com o grave problema de escassez de recursos humanos. Assim, numa tentativa de procurar soluções para este problema, nasce este trabalho. O estudo da retenção dos militares e das razões que os levam a querer permanecer ou sair da organização, poderá vir a facilitar a Gestão de Recursos Humanos (GRH) nas FFAA e em particular na Força Aérea Portuguesa (FAP). O presente estudo foca a sua atenção em dois preditores que se têm manifestado relevantes noutros contextos: o Balanço Trabalho-Família (Chen et al., 2005; Hackett & Guion, 1985; Hanisch & Hulin, 1990; Harrison et al., 2006; Judge et al., 2021) e a Satisfação no Trabalho (Clarke et al., 2004; Griffeth et al., 2000; Hughes & Bozionelos, 2007; Keeton et al., 2007; Noor, 2011).

Auxiliar os trabalhadores a equilibrar as suas vidas profissional e familiar é visto, cada vez mais, como um imperativo social e comercial. Há cerca de duas décadas, o Departamento do Trabalho dos Estados Unidos da América (1999) sugeriu que a combinação bem-sucedida de trabalho e família se tornaria uma questão importante para o mercado de trabalho em atrair e

reter trabalhadores de alta qualidade (Carlson et al., 2009). A incapacidade de conseguir equilibrar a esfera familiar e a esfera profissional é a maior causa de insatisfação no trabalho e está altamente correlacionada com ações de desistência, como a intenção de saída e o absentismo (Hughes & Bozionelos, 2007).

A forma como os indivíduos experienciam e se relacionam com o seu trabalho tem vindo a ser alvo de estudo nos últimos anos. As atitudes no trabalho têm sido um dos tópicos mais amplamente estudados na pesquisa organizacional (Dalal, 2012, cit. por Bowling & Sessa, 2020). Estas atitudes são avaliações fundamentais das experiências de trabalho que potencialmente influenciam comportamentos importantes dos trabalhadores e resultados organizacionais (Bowling & Sessa, 2020). Dentro do universo das atitudes no trabalho, a importância da Satisfação no Trabalho tem vindo a ser demonstrada em diversos estudos, que verificaram que a mesma está relacionada com uma variedade de comportamentos individuais e organizacionais relevantes, como o desempenho, o absentismo, a intenção de saída, a produtividade e a rentabilidade organizacional (Judge et al., 2021).

Assim, com base nas demais argumentações supracitadas e na problemática existente, o autor propõe-se a estudar este tema utilizando como pergunta de partida: "Qual a influência do Balanço-Trabalho Família e da Satisfação no Trabalho na Retenção dos Militares dos Quadros Permanentes (QP) da FAP?".

2. Revisão da literatura

2.1 Retenção

Embora o termo retenção de trabalhadores seja definido de várias maneiras, este basicamente denota várias medidas tomadas pelas organizações para incentivar os seus trabalhadores a permanecerem nas mesmas por mais tempo. O principal motivo para a retenção é impedir que os elementos talentosos saiam (Singh, 2019).

Para Samuel e Chipunza (2009) a retenção é um movimento voluntário de uma organização para criar um ambiente que envolva e retenha os trabalhadores a longo prazo. O principal objetivo da retenção é evitar a perda de trabalhadores competentes da organização, pois tal perda pode ter um efeito adverso na produtividade e na prestação de serviços.

O envolvimento dos trabalhadores tem uma série de resultados importantes. A retenção é um desses resultados. A retenção é normalmente medida por taxas de rotatividade, ou *turnover*, como é referido na literatura, que medem as saídas de trabalhadores de uma organização. Para serem obtidos bons resultados na retenção dos trabalhadores de valor nas organizações, é importante entender as razões por trás do *turnover* (Torrington et al., 2020).

O *Turnover* refere-se à rotatividade de trabalhadores entre organizações e no mercado de trabalho, entre a situação de emprego e desemprego ou inatividade. Esta ampla definição incorpora distintas facetas do fenómeno que têm tido reflexo em diversos estudos de investigação. O turnover pode ser tanto voluntário como involuntário e ocorre num momento específico, que é marcado pela separação física do indivíduo da organização (Heilmann et al., 2009).

A intenção de saída, segundo Tett e Meyer (1993), pode ser definida como a vontade consciente e deliberada de deixar a organização e é medida durante o intervalo de tempo que antecede a saída, propriamente dita, do indivíduo da organização.

2.1.1 Retenção nas Forças Armadas

Existem duas razões principais para os militares saírem prematuramente da organização. A atratividade das alternativas fora das FFAA e a insatisfação com as circunstâncias dentro das FFAA. Sendo que, a maioria das decisões de sair é baseada numa combinação de ambos os motivos. Entre os militares que saem principalmente devido à atratividade de oportunidades alternativas de emprego, encontramos pilotos, especialistas em tecnologias de informação e comunicação, técnicos de aeronaves e controladores de tráfego aéreo. A saída destas pessoas altamente treinadas é um grande problema, pois é muito caro recrutá-las e treiná-las. Relativamente aos militares que abandonam a organização devido a circunstâncias ou perspetivas de trabalho insatisfatórias, este grupo, consiste frequentemente, em militares que foram destacados muitas vezes. Em muitos destes casos, a família começa a não aceitar a ausência do militar e este vê-se na obrigação de deixar as FFAA (NATO, 2007).

2.2 Balanço Trabalho-Família

A família e o trabalho são provavelmente os domínios mais importantes na vida das pessoas (Whitely & England, 1977). O nosso tempo, a nossa identidade e até mesmo a nossa própria existência estão ligados ao papel desempenhado por cada um de nós, quer a nível familiar, quer a nível laboral. A visão tradicional de que o trabalho e a família são esferas separadas na vida deu lugar à visão de que o trabalho e a família estão inteiramente interligados. Assim, em vez de se considerar apenas a experiência dos indivíduos num domínio como se o outro não existisse, ou não fosse relevante, os investigadores passaram a estudar como as duas esferas se sobrepõem e se influenciam mutuamente (Brotheridge & Lee, 2005). O balanço trabalho-família é um conceito subdesenvolvido, apesar do seu uso generalizado na literatura trabalho-família (Valcour, 2007). Ao longo da história, podemos observar uma evolução no conceito de balanço trabalho-família. Grzywacz e Carlson (2007) sugeriram a seguinte definição para o balanço trabalho-família: cumprimento das expectativas que são negociadas e compartilhadas entre um indivíduo e os seus colegas de trabalho e entre um indivíduo e a sua família. Definir o balanço trabalho-família em termos da capacidade de um indivíduo cumprir responsabilidades socialmente negociadas no trabalho e na família também tem vários recursos práticos atraentes para as organizações. Acima de tudo, tal definição simplifica a interface trabalho-família para as organizações.

2.2.1 Balanço Trabalho-Família nas Forças Armadas

Os militares assumem trabalhos e deveres que vão muito além do típico trabalho das nove até as dezassete horas. A entrada no serviço militares é um compromisso com uma vida ditada por deveres e responsabilidades, e é um estilo de vida dedicado à honra e ao serviço (HPRC, 2020).

Segundo o Artigo 14.º do Regulamento de Disciplina Militar, os militares devem possuir uma “(...) permanente prontidão para o serviço, ainda que com sacrifício dos interesses pessoais.” (Regulamento de Disciplina Militar, Lei Orgânica n.º 2/2009, art. 14.º), sendo este espírito de sacrifício que lhes permite enfrentar as missões para as quais são nomeados, enfrentando longas horas de trabalho, muitas vezes deslocados geograficamente das suas famílias. O cumprimento da missão e dos deveres militares exercem, frequentemente, uma pressão indireta sobre as famílias dos militares (Campaniço, 2014).

2.3 Satisfação no Trabalho

Diversos investigadores têm tentado estudar a forma como as pessoas experienciam e se relacionam com o seu trabalho (e.g., Leavitt & Bass, 1964; Wood et al., 2020; Shockley et al., 2021). Dentro do universo das atitudes no trabalho, a satisfação no trabalho tem sido o mais estudado desses construtos (Judge et al., 2017). A importância da satisfação no trabalho foi demonstrada em diversos estudos, que verificaram que a mesma está relacionada com uma variedade de comportamentos individuais e organizacionais relevantes, como o desempenho de tarefas, o absentismo, a intenção de saída, a produtividade e a rentabilidade organizacional (Judge et al., 2021).

Na literatura podemos encontrar diversas conceções sobre a satisfação no trabalho, tendo sido apresentadas várias definições ao longo do tempo, sendo que a definição apresentada por Locke (1976, cit. por Guo et al., 2015) é aquela que é mais utilizada (Judge & Klinger, 2008) e define a satisfação no trabalho como um estado emocional agradável ou positivo resultante de uma avaliação do próprio trabalho ou de experiências do trabalho. Concluiu que as dimensões típicas do trabalho que haviam sido estudadas por investigações anteriores misturam dois níveis diferentes de análise, os eventos ou condições (trabalho, remuneração, promoção, reconhecimento, benefícios, condições de trabalho) e agentes (supervisão, colegas de trabalho e a organização e gestão).

2.3.1 Satisfação nas Forças Armadas

Em geral, os militares relatam níveis mais baixos de satisfação no trabalho do que os civis (Bowers, 1976; Blair & Phillips, 1983; Fredlan & Littel, 1983; Woodruff & Conway, 1990). A satisfação no trabalho nas FFAA pode ser única devido ao stress inerente e às compensações associadas ao ambiente de trabalho (Sanchez et al., 2004). Diversos estudos mostram que altos níveis de stress estão relacionados com baixos níveis de satisfação no trabalho (eg., Landsbergis, 1988; Cummins, 1990). Os militares e as suas famílias enfrentam uma combinação única de stressores, como mudanças frequentes na vida, a possibilidade de destacamentos, a possibilidade que o membro militar da família seja morto ou ferido em serviço, isolamento geográfico, remuneração relativamente baixa e alta incidência de crianças pequenas em casa (Black, 1993). Segundo Lopes et al. (2015) os militares portugueses mostram estar mais satisfeitos com o seu trabalho atual, com os camaradas e supervisores, e menos satisfeitos com as oportunidades de promoção e remuneração. De forma geral, o estudo evidencia que ser mais velho, ter menos escolaridade e estar há mais tempo nas fileiras, estão associados a uma menor satisfação com os fatores extrínsecos ao trabalho, nomeadamente com a remuneração e as oportunidades de promoção.

2.4 Levantamento de hipóteses

Após análise da literatura, e de acordo com o os objetivos do estudo, foram formuladas as seguintes hipóteses:

Hipótese 1: O Balanço Trabalho-Família tem uma correlação positiva com a Retenção dos Militares, ou seja, níveis mais elevados no Balanço Trabalho-Família conduzem a níveis mais altos de Retenção.

Hipótese 2: A Satisfação no Trabalho tem uma correlação positiva com a Retenção dos Militares, ou seja, níveis mais elevados de Satisfação no Trabalho conduzem a níveis mais altos de Retenção.

Hipótese 3: A relação entre o Balanço Trabalho-Família e a Retenção dos Militares é mediada pela Satisfação no Trabalho, ou seja, níveis mais elevados no Balanço Trabalho-Família

conduzem a níveis mais elevados de Satisfação no Trabalho que por sua vez levam a uma maior Retenção.

3. Metodologia

Dada a natureza do estudo e o seu objetivo, decidiu-se para a elaboração do mesmo, a utilização de um inquérito por questionário, com um desenho transversal. O método utilizado neste estudo será o hipotético-dedutivo, que segundo Marconi e Lakatos (2007, p.22) "se inicia pela perceção de uma lacuna nos conhecimentos, acerca da qual formula hipóteses e, pelo processo de inferência dedutiva, testa a predição da ocorrência de fenómenos abrangidos pela hipótese". A partir da teoria apresentada na Revisão da Literatura, foi criado um modelo de análise que relaciona o Balanço Trabalho-Família com a Satisfação no Trabalho e a Retenção dos Militares.

3.1 Caracterização do instrumento de recolha de dados

O instrumento de medida utilizado no presente estudo consistiu num inquérito dividido em quatro partes. Na primeira parte foram colocadas questões para determinar os dados demográficos da amostra. As restantes partes são correspondentes a cada uma das três variáveis em estudo anteriormente mencionadas. Para o Balanço Trabalho-Família foi utilizada a escala delineada de Carlson et al. (2009) traduzida e validada por Marôco et al. (submitted). Para a Satisfação no Trabalho foi utilizada a *Short Index of Job Satisfaction* (SIJS) de Judge et al. (2000) adaptada e validada para a população portuguesa por Sinval e Marôco (2020). Para a Retenção dos Militares foi utilizada a escala desenvolvida por Bozeman e Perrewé (2001) traduzida e validada por Marôco et al. (submitted) para medir a Intenção de Saída.

3.2 Procedimento de recolha e análise de dados

A aplicação do questionário decorreu entre 16 de janeiro de 2023 a 08 de março de 2023. Com o objetivo de publicitar o questionário à população selecionada, com a ajuda das Relações-Públicas da Força Aérea, o *link* para o preenchimento foi colocado no Portal FAP (página de *intranet* da FAP). O questionário foi também enviado através de *Groupwise* (plataforma de correio eletrónico interno instituída na FAP) para cada militar e aplicado com suporte ao *Google Forms*. Os dados recolhidos foram analisados através do programa informático *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versão 29.0.

3.3 População e amostra

A população alvo deste estudo foram todos os militares dos QP a prestar serviço dentro da estrutura orgânica da FAP: Oficiais (desde a categoria de Capitão/Oficial Subalterno até à categoria de Oficial Superior) e Sargentos. O questionário foi enviado a 566 Oficiais Superiores, 722 Capitães ou Oficiais Subalternos e 1925 Sargentos, perfazendo um total de 3213 questionários enviados. A amostra final (n=445) é caracterizada por militares com uma média de idades de 40,10 anos, sendo estas compreendidas entre os 23 e os 59 anos (DP=7,01). Maioritariamente a população estudada é do sexo masculino (78,00%), é casada ou está em união de facto (74,60%) e tem pelo menos um filho (75,50%).

Tabela 1 - Caracterização comparativa da amostra e população em estudo

		População		Amostra	
		n	%	n	%
Total		3213	100	445	100
Categoria	Oficial Superior	566	17,62	65	14,60
	Capitão/Oficial Subalterno	722	22,47	118	26,50
	Sargento	1925	59,91	262	58,90

4. Resultados

4.1 Análise descritiva

Após serem verificadas as propriedades psicométricas do instrumento em estudo, procedeu-se à análise das médias e desvios-padrão das diferentes variáveis.

Tabela 2 - Estatística Descritiva das Variáveis

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão
Balanço Trabalho-Família	445	1	7	4,73	1,31
Satisfação no Trabalho	445	1	7	4,38	1,46
Intenção de Saída	445	1	7	3,96	1,84

É possível verificar que a variável com valor médio mais elevado é o Balanço Trabalho-Família (M=4,73; DP=1,31) e que a variável com valor médio mais baixo é a Intenção de Saída (M=3,96; DP=1,83). Todos os itens foram medidos através de escalas do tipo *Likert* de 7 pontos, em que 1=Discordo Fortemente e 7=Concordo Fortemente.

4.2 Associação entre variáveis

Foi realizado o estudo da correlação entre as variáveis de forma a medir a intensidade da relação entre as mesmas através do coeficiente de correlação de *Pearson*. Este coeficiente mede a intensidade e a direção da associação de tipo linear entre duas variáveis quantitativas e varia entre -1 e +1, sendo que, se a correlação é positiva, as variáveis variam no mesmo sentido, se a correlação é negativa, as variáveis variam em sentido oposto. O valor absoluto da correlação (r) indica a intensidade da associação (Marôco, 2014).

Tabela 3 - Análise Correlacional entre as Variáveis

Variável	1	2	3
1. Balanço Trabalho-Família	-		
2. Satisfação no Trabalho	0,56*	-	
3. Intenção de Saída	-0,38*	-0,66*	-

Nota. n=445, *p < 0,01

Como podemos observar na Tabela 3, todas as correlações são estatisticamente significativas. O Balanço Trabalho-Família apresenta uma correlação forte e positiva (r=0,56, p<0,01) com a Satisfação no Trabalho e uma correlação moderada e negativa com a Intenção

de Saída (r=0,38, *p*<0,01). A Satisfação no Trabalho apresenta uma correlação forte e negativa com a Intenção de Saída (r=0,66, *p*<0,01).

4.3 Predição da Intenção de Saída

Como se verificou a existência de correlações (estatisticamente significativas) entre as variáveis em estudo, procedeu-se à análise de regressão linear das mesmas.

A primeira regressão linear realizada (tabela 4) pretendeu averiguar a significância estatística da relação entre a variável Balanço Trabalho-Família, enquanto preditora, e a variável Intenção de Saída, como dependente.

Tabela 4 - Regressão Linear entre o Balanço Trabalho-Família e Intenção de Saída

Variável Preditora	R	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Erro Padrão da Estimativa	Durbin-Watson
Balanço Trabalho-Família	0,38*	0,15	0,14	1,71	1,86

*p < 0,01

Tal como apresentado na tabela 4, o Balanço Trabalho-Família contribui cerca de 14% para a explicação da variância da Intenção de Saída.

A segunda regressão linear realizada (tabela 5) pretendeu averiguar a significância estatística da relação entre a variável Satisfação no Trabalho, enquanto preditora, e a variável Intenção de Saída, como dependente.

Tabela 5 - Regressão Linear entre a Satisfação no Trabalho e Intenção de Saída

Variável Preditora	R	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Erro Padrão da Estimativa	Durbin-Watson
Satisfação no Trabalho	0,66*	0,43	0,43	1,39	1,93

*p < 0,01

Tal como apresentado na tabela 5, a Satisfação no Trabalho contribui cerca de 43% para a explicação da variância da Intenção de Saída.

4.4 Análise de mediação

De forma a averiguar a hipótese de mediação (Hipótese 3) recorreu-se à macro *Process* v4.3 (Hayes, 2022) para o SPSS.

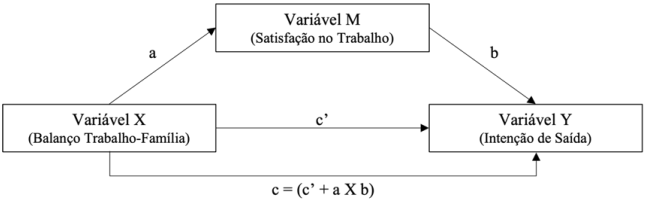


Figura 1 - Modelo de mediação simples

De acordo com a figura 1, a variável X (Balanço Trabalho-Família) corresponde à variável independente, a variável M (Satisfação no Trabalho) corresponde à variável mediadora e a variável Y (Intenção de Saída) corresponde à variável dependente. O valor "a" representa o efeito da variável X em M. O valor "b" representa o efeito da variável M em Y. O valor "c'" representa o efeito direto, ou seja, a relação direta entre a variável X e a variável Y na presença da variável M. O efeito indireto é a relação que flui da variável X para a variável M e depois para a variável Y, e é representado por "a × b". Por fim, o valor "c" representa o efeito total, ou seja, é a influência combinada do efeito direto entre duas variáveis e o efeito indireto fluindo através do mediador, e é representado por "c = (c'+ a × b).

Tabela 6 - Resultados modelo de mediação

a	b	c'	a × b	c	Intervalo *Bootstrap*
0,62*	-0,82*	-0,03^{ns}	-0,51	-0,54*	$[-0{,}61;\ -0{,}42\ ]$

*p < 0,01
ns= não significativo ($p \approx 0{,}67$)

Segundo Preacher e Hayes (2004), uma variável é considerada mediadora se: a variável independente prevê significativamente a variável dependente na ausência da variável mediadora (c=-0,54; p < 0,01); se a variável independente prevê significativamente a variável mediadora (a=0,62; p < 0,01); se a variável mediadora prevê significativamente a variável dependente (b=-0,82; p < 0,01); se o efeito da variável independente sobre a variável dependente diminuir com a inclusão da variável mediadora ($|c'|$=0,03< |c|=0,54). Como c' não mostrou ser significativo ($p \approx 0{,}67$), estamos perante uma mediação total. Se "c'" fosse significativo estávamos perante uma mediação parcial.

Como intervalo de confiança *Bootsrap* de 95% para 5000 amostragens não abrange estatisticamente o zero, ou seja, segundo Hayes (2022) o efeito do Balanço Trabalho-Família na Intenção de Saída é mediado totalmente pela Satisfação no Trabalho.

5. Discussão de resultados

Este estudo pretende analisar em que medida a Satisfação no Trabalho é uma variável mediadora na relação entre o Balanço Trabalho-Família e a Retenção dos militares dos QP da FAP. Para tal, recorreu-se à aplicação de um inquérito por questionário a todos os militares dos QP (com exceção dos Oficiais Generais), tendo sido obtida uma amostra de 445 indivíduos.

Tabela 7 - Resumo dos testes de hipóteses

Hipótese 1	Confirmada
Hipótese 2	Confirmada
Hipótese 3	Confirmada

A tabela 7 apresenta o resumo dos resultados obtidos pelos testes de hipóteses, ou seja, quais as hipóteses que foram ou não confirmadas. Seguidamente são apresentados os testes de hipóteses efetuados.

Teste da H1: A hipótese 1 afirmava que o Balanço Trabalho-Família estava correlacionado positivamente com a Retenção dos Militares.

Tal como apresentado na secção da correlação entre variáveis, na tabela 3, pode-se verificar que o Balanço Trabalho-Família possui uma correlação moderada e negativa com a Intenção de Saída (r = -0,38).

Pelo que analisado, é confirmada a H1: O Balanço Trabalho-Família está correlacionado negativamente com a Intenção de Saída, portanto, níveis mais elevados no Balanço Trabalho-Família conduzem a menos Intenção de Saída, logo a níveis mais elevados de Retenção. O equilíbrio entre a vida profissional e familiar por parte dos militares explica em 14% (R^2 = 0,14) a variação da intenção de o militar querer ou não permanecer na FAP. Este resultado está alinhado com a literatura, onde de acordo com Hughes e Bonzionelos (2007), Shankar e Bhatnagar (2010), Noor (2011) e Chimote e Srivasta (2013) existe uma relação de causa efeito entre o Balanço Trabalho-Família e a intenção de permanecer ou sair de uma organização.

Teste da H2: A hipótese 2 afirmava que a Satisfação no Trabalho estava correlacionada positivamente com a Retenção dos Militares.

Tal como apresentado na tabela 3, pode-se verificar que a Satisfação no Trabalho possui uma correlação forte e negativa com a Intenção de Saída (r = -0,66).

Pelo que analisado, é confirmada a H2: A Satisfação no Trabalho está correlacionada negativamente com a Intenção de Saída, portanto, níveis mais elevados de Satisfação no Trabalho conduzem a menos Intenção de Saída, logo a níveis mais elevados de Retenção. Sendo que, a satisfação nos militares explica em 43% (R^2 = 0,43) a variação da intenção de o militar querer ou não permanecer na FAP. Este resultado está alinhado com a literatura, onde de acordo com Hackett e Guion (1985), Hanisch e Hulin (1990), Che et al. (2005), Harrison et al. (2006) e Judge et al. (2021) existe uma interferência positiva entre a Satisfação no Trabalho e a Retenção, sendo de esperar que os militares que estejam satisfeitos no seu trabalho, queiram continuar na organização.

Teste da H3: A hipótese 3 afirmava que a relação entre o Balanço Trabalho-Família e a Retenção dos Militares é mediada pela Satisfação no Trabalho.

Tal como apresentado na figura 1 e na tabela 6, pode-se verificar que a relação entre o Balanço Trabalho-Família e a Retenção dos Militares é mediada pela Satisfação no Trabalho.

Pelo que analisado, é confirmada a H3: A relação entre o Balanço Trabalho-Família e a Retenção dos Militares é mediada pela Satisfação no Trabalho, ou seja, níveis mais elevados no Balanço Trabalho-Família conduzem a níveis mais elevados de Satisfação no Trabalho que por sua vez levam a uma menor Intenção de Saída, logo maior Retenção. Sendo que, como a relação direta entre o Balanço Trabalho-Família e a Retenção não mostrou ser significativa na presença da variável mediadora Satisfação no Trabalho, estamos perante uma mediação total. Este resultado está alinhado com a literatura, onde de acordo com Griffeth et al. (2000), Clarke et al. (2004), Keeton et al. (2007), Hughes e Bonzionelos (2007) e Noor (2011) era plausível que a Satisfação no Trabalho tivesse um papel mediador, uma vez que, uma consequência da Satisfação no Trabalho é a Retenção e o Balanço Trabalho-Família também apresenta uma interferência positiva com a Satisfação no Trabalho.

6. Conclusões

O presente estudo pretendia analisar qual a influência do Balanço Trabalho-Família e da Satisfação no Trabalho na Retenção dos Militares dos QP da FAP. Através da análise realizada, e respondendo à pergunta de partida, concluiu-se que tanto o Balanço Trabalho-Família, como a Satisfação no Trabalho são variáveis preditoras da Retenção dos Militares, pois ambas tiveram correlações significativas com a Retenção dos Militares.

O Balanço Trabalho-Família apresenta uma correlação moderada e negativa com a intenção de saída, sendo que explica 14% da variância da mesma e a Satisfação do Trabalho apresenta uma correlação forte e negativa com a intenção de saída, sendo que explica 43% da variância da mesma. Estes resultados indicam que altos níveis de Balanço Trabalho-Família e de Satisfação no Trabalho contribuem para uma melhor taxa de Retenção dos Militares.

A relação entre o Balanço Trabalho-Família e a Satisfação no Trabalho, também apresentam uma correlação significativa, sendo neste caso, forte e positiva. Portanto, podemos concluir que o equilíbrio entre a vida profissional e a vida familiar traduz-se num aumento da Satisfação no Trabalho.

Relativamente ao papel mediador da Satisfação no Trabalho, na relação entre o Balanço Trabalho-Família e a Retenção dos Militares. Os resultados indicam-nos que quando analisamos as duas variáveis preditoras em conjunto, a intenção de saída, passa a ser explicada, quase totalmente, pela Satisfação no Trabalho, existindo assim, uma mediação total da Satisfação no Trabalho nesta relação, ou seja, a influência do Balanço Trabalho-Família na Retenção dos Militares, é totalmente mediada pela Satisfação no Trabalho. Este resultado sugere que deve haver um maior investimento e uma maior preocupação em ajudar os militares a equilibrar as suas vidas profissional e familiar, pelo que irá aumentar os seus níveis de Satisfação no Trabalho, que resultará em melhores taxas de Retenção na organização.

As FFAA deparam-se com alguns problemas que têm vindo a acentuar-se progressivamente, como a dificuldade de retenção de militares nas suas fileiras. A FAP é uma organização cujo ativo mais importante são as pessoas que dela fazem parte. A perda de capital humano especializado constitui um problema em termos financeiros, mas também em conhecimento e experiência em áreas que muitas vezes são muito específicas e de difícil substituição. Estudar as razões por detrás da decisão de querer permanecer ou não na organização, permite que sejam tomadas medidas efetivas que combatam à saída de militares das FFAA. Desta forma, as contribuições do presente estudo são particularmente interessantes para a organização em que este foi envolvido. Em primeiro lugar, este foi o primeiro estudo em que foi abordado o Balanço Trabalho-Família na FAP. Em segundo lugar, conseguiu-se comprovar que o Balanço Trabalho-Família e a Satisfação no Trabalho têm uma importância preponderante na Retenção dos Militares dos QP, permitindo assim que sejam conhecidas duas áreas de atuação que permitam obter melhores taxas de retenção e que para esse efeito sejam feitos estudos futuros com o objetivo de conhecer, exatamente, quais as medidas mais efetivas que levam ao aumento dos níveis de Balanço Trabalho Família e Satisfação no Trabalho, nesta mesma amostra.

No decorrer da presente investigação foram encontradas algumas limitações que serão de seguida enunciadas. Apesar de todo o esforço realizado para que o questionário fosse difundido para todos os militares dos QP, a população alvo demonstrou uma relativa fraca adesão, tendo sido obtida uma taxa de resposta de 14,8%. O número de respostas obtido ficou assim um pouco aquém do esperado. Tendo em conta que o questionário era de auto-preenchimento, é possível que ocorram alguns enviesamentos nas respostas, derivados da desejabilidade social, de respostas aleatórias, da falsificação e do estilo de resposta (Ribeiro, 2010). Por fim, outra limitação encontrada tem a ver com a sensibilidade do tema não permitir a determinação de mais dados demográficos da amostra. Idealmente ter-se-ia estudado estas variáveis em função do posto e não só da categoria e em função do número de anos de serviço.

Como propostas para investigações futuras, sugere-se a realização de um estudo longitudinal que averigue se os militares que efetivamente têm vontade de permanecer na organização assim o fizeram, ou não, e determinar as razões por detrás de tal decisão. Isto, porque, a intenção de saída, explica a variabilidade da saída, mas não completamente. Em

segundo lugar, sugere-se que sejam realizados estudos com o intuito de perceber que medidas efetivas melhoram os níveis de Balanço Trabalho-Família e de Satisfação no Trabalho na FAP. Efetuando, para além de questionários, entrevistas aos militares e às suas famílias. As execuções destes estudos podem realmente fazer a diferença para melhorarem as taxas de retenção nas FFAA. Em terceiro lugar, e à semelhança do que foi feito na Força Aérea Norte Americana (Mattock et al., 2019) , seria interessante estudar se a aplicação de um bónus de retenção aos militares compensaria a formação de um novo e até que valor financeiro compensaria pagar o bónus impedindo a saída de talentos da organização. Por último, em 2019 foi criado o modelo de Inquérito de Saída (RCP/2019 – Proc. 3) que deve ser aplicado pela área de pessoal, no momento de desquite, a todos os militares que manifestaram vontade de sair da FAP. Sugere-se, então, que se utilize os dados desde inquérito com o objetivo de identificar quais os motivos que sustentam as saídas, com a finalidade de se estudarem/aplicarem medidas que mitiguem esta situação.

Referências bibliográficas

Abreu, A. (2019). Atrição e Desistência no Estágio de Seleção de Voo. Instituto Universitário Militar.

Black, W. G. (1993). Military-induced family separation: a stress reduction intervention. Social Work, 38(3), 273–280.

Blair, J. D., & Phillips, R. L. (1983). Job Satisfaction Among Youth in Military and Civilian Work Settings. Armed Forces & Society, 9(4), 555–568. https://doi.org/10.1177/0095327X8300900403

Bowers, D. (1976). Work related attitudes of military personnel. In N. L. Goldman & D. R. Segal (Eds.), The Social Psychology of Military Service (pp. 89–115). Sage.

Bowling, N., & Sessa, V. (2020). Essentials of Job Attitudes and Other Workplace Psychological Constructs (pp. 3–12). https://doi.org/10.4324/9780429325755-2

Bozeman, D. P., & Perrewé, P. L. (2001). The effect of item content overlap on organizational commitment questionnaire-turnover cognitions relationships. Journal of Applied Psychology, 86(1), 161–173. https://doi.org/10.1037/0021-9010.86.1.161

Brotheridge, C. M., & Lee, R. T. (2005). Impact of work-family interference on general well-being: A replication and extension. International Journal of Stress Management, 12(3), 203–221. https://doi.org/10.1037/1072-5245.12.3.203

Camara, P. B., Guerra, P. B., & Rodrigues, J. V. (2010). Novo Humanator: Recursos Humanos e Sucesso Empresarial (4th ed.). Dom Quixote.

Campaniço, S. (2014). Conflito trabalho-família, ambiente organizacional e suporte do líder: um estudo com militares da Marinha. Instituto Superior de Ciências Sociais e Políticas.

Carlson, D. S., Grzywacz, J. G., & Zivnuska, S. (2009). Is work'family balance more than conflict and enrichment? Human Relations, 62(10), 1459–1486. https://doi.org/10.1177/0018726709336500

Chen, G., Ployhart, R. E., Cooper Thomas, H., Anderson, N., & Bliese, P. D. (2005). The Power Of Momentum: A New Model Of Dynamic Relationships Between Job Satisfaction Change And Turnover Intentions. Management Journal, 54(1), 159–181.

Clarke, M. C., Koch, L. C., & Hill, E. J. (2004). The work-family interface: Differentiating balance and fit. Family and Consumer Sciences Research Journal, 33(2), 121–140. https://doi.org/10.1177/1077727X04269610

Cummins, R. C. (1990). Job Stress and the Buffering Effect of Supervisory Support. Group & Organization Studies, 15(1), 92–104. https://doi.org/10.1177/105960119001500107

Fredlan, J. E., & Littel, R. D. (1983). Job satisfaction determinants: Differences between servicemen and civilians. Journal of Political and Military Sociology, 11(2), 265–280.

Griffeth, R. W., Hom, P. W., & Gaertner, S. (2000). A Meta-Analysis of Antecedents and Correlates of Employee Turnover: Update, Moderator Tests, and Research Implications for the Next Millennium. Journal of Management, 26(3), 463–488.

Grzywacz, J. G., & Carlson, D. S. (2007). Conceptualizing Work—Family Balance: Implications for Practice and Research. Advances in Developing Human Resources, 9(4), 455–471. https://doi.org/10.1177/1523422307305487

Guo, W., Li, T., & Wu, N. (2015). Empirical Study on the Effects of Leader's Verbal Communication Style on Employee's Job Satisfaction. Journal of Human Resource and Sustainability Studies, 03(04), 211–227. https://doi.org/10.4236/jhrss.2015.34027

Hackett, R. D., & Guion, R. M. (1985). A Reevaluation of the Absenteeism-Job Satisfaction Relationship. Organizational Behavior and Human Decision Processes, 35, 340–381.

Hanisch, K. A., & Hulin, C. L. (1990). Job Attitudes and Organizational Withdrawal: An Examination of Retirement and Other Voluntary Withdrawal Behaviors. Journal of Vocational Behavior, 37, 60–78.

Harrison, D. A., Newman, D. A., & Roth, P. L. (2006). How Important Are Job Attitudes? Meta-Analytic Comparisons Of Integrative Behavioral Outcomes And Time Sequences. Academy of Management Journal, 49(2), 305–325.

Hayes, A. F. (2022). Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis (3rd ed.). Guilford Press.

Heilmann, S. G., Bell, J. E., & McDonald, G. K. (2009). Work-home conflict: A study of the effects of role conflict on military officer turnover intention. Journal of Leadership and Organizational Studies, 16(1), 85–96. https://doi.org/10.1177/1548051809334194

HPRC. (2020). Work-life balance in the military. In Consortium for Health and Military Performance. Human Performance Resources by CHAMP. https://www.hprc-online.org/social-fitness/teams-leadership/work-life-balance-military

Hughes, J., & Bozionelos, N. (2007). Work-life balance as source of job dissatisfaction and withdrawal attitudes: An exploratory study on the views of male workers. Personnel Review, 36(1), 145–154. https://doi.org/10.1108/00483480710716768

Judge, T. A., Bono, J. E., Locke, E. A., Tippie, H. B., & Judge, T. A. (2000). Personality and job satisfaction: The mediating role of job characteristics. Journal of Applied Psychology, 85(2), 237–249. https://doi.org/10.1037/0021-9010.85.2.237

Judge, T. A., & Klinger, R. (2008). Job Satisfaction: Subjective Well-Being at Work. The Science of Subjective Well-Being, 293–413.

Judge, T. A., Weiss, H. M., Kammeyer-Mueller, J. D., & Hulin, C. L. (2017). Job attitudes, job satisfaction, and job affect: A century of continuity and of change. Journal of Applied Psychology, 102(3), 356–374. https://doi.org/10.1037/apl0000181

Judge, T. A., Zhang, S., & Glerum, D. R. (2021). Job Satisfaction. In V. I. Sessa & N. A. Bowling (Eds.), Essentials of Job Attitudes and Other Workplace Psychological Constructs (pp. 207–241). Routledge.

Keeton, K., Fenner, D. E., Johnson, T. R. B., & Hayward, R. A. (2007). Predictors of Physician Career Satisfaction, Work-Life Balance, and Burnout LEVEL OF EVIDENCE: II. In Obstet Gynecol (Vol. 109).

Lahkar Das, B., & Baruah, M. (2013). Employee Retention: A Review of Literature. Journal of Business and Management, 14(2), 8–16. www.iosrjournals.orgwww.iosrjournals.org

Landsbergis, P. A. (1988). Occupational stress among health care workers: A test of the job demands-control model. Journal of Organizational Behavior, 9(3), 217–239. https://doi.org/10.1002/job.4030090303

Leavitt, H. J., & Bass, B. M. (1964). Organizational Psychology. Annual Review of Psychology, 15(1), 371–398. https://doi.org/10.1146/annurev.ps.15.020164.002103

Lei Orgânica n.o2/2009 da Assembleia da República: Regulamento de Disciplina Militar, Pub. L. No. Artigo 14.o, Diário da República n.o 140/2009, Série I de 2009-07-22 4669 (2009). https://www.defesa.gov.pt/pt/defesa/organizacao/sc/pjm/apjm/legislacao/Documents/RDM.pdf

Lopes, S., Chambel, M. J., Castanheira, F., & Oliveira-Cruz, F. (2015). Measuring Job Satisfaction in Portuguese Military Sergeants and Officers: Validation of the Job Descriptive Index and the Job in General Scale. Military Psychology, 27(1), 52–63. https://doi.org/10.1037/mil0000060

Marconi, M. de A., & Lakatos, E. M. (2007). Fundamentos de Metodologia Científica (6th ed.). Atlas.

Marôco, A., Gonçalves, S. P., & Nogueira, F. (n.d.). Work-family balance - Validation of a measurement instrument. Organization Management Journal.

Marôco, J. (2014). Análise Estatística com o SPSS Statistics (6th ed.).

Mattock, M. G., Asch, B. J., Hosek, J., & Boito, M. (2019). The Relative Cost-Effectiveness of Retaining Versus Accessing Air Force Pilots. RAND Corporation. https://doi.org/10.7249/RR2415

NATO. (2007). Recruiting and Retention of Military Personnel. www.rto.nato.int

Noor, K. M. (2011). Work-Life Balance and Intention to Leave among Academics in Malaysian Public Higher Education Institutions. International Journal of Business and Social Science, 2(11). www.ijbssnet.com

Preacher, K. J., & Hayes, A. F. (2004). SPSS and SAS procedures for estimating indirect effects in simple mediation models. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 36(4), 717–731. https://doi.org/10.3758/BF03206553

Ribeiro, J. L. P. (2010). Investigação e Avaliação em Psicologia e Saúde (2nd ed.). Placebo.

Rijo, F., Marreiros, J., Mairos, J., & Paquete, O. (2018). A Retenção dos Militares nas Forças Armadas. Revista de Ciências Militares, 6(1), 333–356. https://www.ium.pt/cisdi/index.php/pt/publicacoes/revista-de-ciencias-militares.

Samuel, M. O., & Chipunza, C. (2009). Employee retention and turnover: Using motivational variables as a panacea. African Journal of Business Management, 3(8), 410–415. https://doi.org/10.5897/AJBM09.125

Sanchez, R. P., Bray, R. M., Vincus, A. A., & Bann, C. M. (2004). Predictors of Job Satisfaction Among Active Duty and Reserve/Guard Personnel in the U.S. Military. Military Psychology, 16(1), 19–35.

Shockley, K. M., Clark, M. A., Dodd, H., & King, E. B. (2021). Work-family strategies during COVID-19: Examining gender dynamics among dual-earner couples with young children. Journal of Applied Psychology, 106(1), 15–28. https://doi.org/10.1037/apl0000857

Singh, D. (2019). A Literature Review on Employee Retention with Focus on Recent Trends. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, 425–431. https://doi.org/10.32628/ijsrst195463

Sinval, J., & Marôco, J. (2020). Short index of job satisfaction: Validity evidence from Portugal and Brazil. PLOS ONE, 15(4). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231474

Tett, R. P., & Meyer, J. P. (1993). Job Satisfaction, Organizational Commitment, Turnover Intention, and Turnover: Path Analyses Based On Meta-Analytic Findings. Personnel Psychology, 46, 259–293.

Torrington, D., Hall, L., Taylor, S., & Atkinson, C. (2020). Human Resource Management (11th ed.). Pearson Education Limited.

Valcour, M. (2007). Work-Based Resources as Moderators of the Relationship Between Work Hours and Satisfaction With Work-Family Balance. Journal of Applied Psychology, 92(6), 1512–1523. https://doi.org/10.1037/0021-9010.92.6.1512

Whitely, W., & England, G. W. (1977). Managerial Values as a Reflection of Culture and the Process of Industrialization. In Academy of Managemenl Journal (Vol. 20, Issue 3).

Wood, J., Oh, J., Park, J., & Kim, W. (2020). The Relationship Between Work Engagement and Work–Life Balance in Organizations: A Review of the Empirical Research. Human Resource Development Review, 19(3), 240–262. https://doi.org/10.1177/1534484320917560

Woodruff, S. I., & Conway, T. L. (1990). Perceived Quality of Life and Health-Related Correlates Among Men Aboard Navy Ships. Military Psychology, 2(2), 79–94. https://doi.org/10.1207/s15327876mp0202_2

Imagem Endoscópica Avançada e Inteligência Artificial na Deteção de Displasia e Cancro Gástrico Precoce

Autor: TEN/MED Jorge Miguel Pinto Homem Pires
Academia da Força Aérea, Sintra
Faculdade de Medicina da Universidade de Lisboa

Orientador: Professor Doutor Carlos Noronha Ferreira
Clínica Universitária de Gastrenterologia – Faculdade de Medicina da Universidade de Lisboa

Resumo: O cancro gástrico é o quinto cancro mais diagnosticado e a quarta causa de morte por doença oncológica a nível global. No Ocidente, o diagnóstico do cancro gástrico é feito tardiamente, o que impede uma intervenção através de técnicas endoscópicas minimamente invasivas e contribui para uma maior mortalidade. O extenso conhecimento existente sobre as lesões precursoras do cancro gástrico permite uma valiosa janela de oportunidade para a deteção e tratamento das lesões displásicas e cancro gástrico precoce (CGP) em que a abordagem endoscópica ainda é possível por dissecção da submucosa. A deteção de CGP através da endoscopia convencional com luz branca (WLI) apresenta significativas limitações, pelo que a utilização de modalidades de imagem endoscópica avançada como o *Narrow Band Imaging* (NBI), *Blue Laser Imaging* (BLI) e *Linked Color Imaging (*LCI) resulta numa melhor taxa de deteção de CGP, assim como, permite a classificação das lesões da mucosa e a delimitação das margens para posterior ressecção. Tendo em conta a variabilidade entre endoscopistas, estão a ser desenvolvidos programas de inteligência artificial (IA) aplicada à endoscopia para melhorar a taxa de deteção de lesões displásicas e GCP. Este Trabalho Final de Mestrado visa contemplar e comparar as diferentes técnicas de imagem endoscópica avançada e os trabalhos com programas de IA já publicados no contexto da deteção do CGP e suas lesões precursoras. Para tal, propõe efetuar uma revisão da literatura existente.

Palavras-chave: Displasia; Cancro gástrico precoce; Imagem endoscópica avançada; Inteligência artificial.

1. Introdução

Com este trabalho pretendeu-se analisar e comparar as diferentes técnicas de imagem endoscópica - convencional e avançada - bem como a aplicação de algoritmos de inteligência artificial (IA) no processamento e análise das imagens. Este trabalho baseou-se em estudos já publicados, nomeadamente no contexto da deteção do cancro gástrico precoce (CGP) e suas lesões precursoras.

2. Cancro gástrico

2.1. Epidemiologia

O cancro gástrico (CG) é o quinto cancro mais diagnosticado e a quarta causa de morte por doença oncológica a nível global (Sung et al., 2021). Portugal, em 2018, apresentou uma taxa bruta de incidência de 28/100.000, o que o torna um país de incidência moderada a elevada, e uma taxa bruta de mortalidade de 22,1/100.000 (Libânio et al., 2021).

Regra geral, no Ocidente, o diagnóstico do CG é feito tardiamente o que inviabiliza uma intervenção através de técnicas endoscópicas minimamente invasivas e contribui para uma maior mortalidade. Para tal contribuem o facto da sua apresentação ser insidiosa e não existir um programa de rastreio em massa, para identificação precoce da doença (Libânio et al., 2021).

Apesar de se ter vindo a verificar uma diminuição da incidência do CG nas últimas décadas, com o envelhecimento populacional que se verifica, principalmente, ao nível dos países

desenvolvidos é esperada uma inversão desta tendência (Karimi et al., 2014). Os tumores do cárdia representam uma exceção a esta tendência de queda da incidência, tendo esta aumentado nos países ocidentais (Devesa et al., 1998; Powell & McConkey, 1990).

2.1.1. Classificação de Lauren

Cerca de 90% dos CG têm a sua origem nas populações celulares que compõem as glândulas da mucosa, sendo, por isso, adenocarcinomas (Karimi et al., 2014). O adenocarcinoma gástrico pode ser dividido, segundo a Classificação de Lauren, nos tipos intestinal e difuso (Lauren, 1965). No caso de tumores que exibam características de ambos os tipos estes são classificados como de tipo misto.

Os tumores de tipo intestinal apresentam células tumorais bem diferenciadas. São mais prevalentes em áreas de alto risco de cancro gástrico. Encontram-se associados a fatores ambientais como a infeção por *H. pylori*, tabagismo e dieta (Libânio et al., 2021; Yakirevich & Resnick, 2013).

Os tumores de tipo difuso são constituídos por células indiferenciadas e com baixa adesão celular. Apresentam uma incidência semelhante em todas as populações - mais baixa que os do tipo intestinal e, tipicamente, são diagnosticados em indivíduos jovens. Associam-se a mutações genéticas e são mais agressivos (Yakirevich & Resnick, 2013).

2.1.2. Fatores de risco

O adenocarcinoma gástrico de tipo intestinal é uma patologia multifatorial com fatores de risco associados, de natureza modificável e não modificável. Alguns fatores de risco estão tipicamente associados ao surgimento de tumores do cárdia ou do restante estômago (não cárdia) (Karimi et al., 2014).

Os fatores de risco não modificáveis mais relevantes incluem a idade, história familiar (familiares de primeiro grau), sexo masculino e a raça (Libânio et al., 2021). A idade é um fator na progressão da incidência de CG, e a história familiar é outro fator de risco bem estabelecido, com um risco relatado de até 10 vezes (Kluijt et al., 2012; Yaghoobi et al., 2004). O sexo masculino também está associado a um risco maior de CG não cárdia (2 vezes) e cárdia (5 vezes) (Brown & Devesa, 2002).

Em relação aos fatores de risco modificáveis, a infeção por *H. pylori*, o tabagismo, uma baixa condição socioeconómica, um consumo elevado de alimentos salgados e fumados e um baixo consumo de frutas e vegetais são os fatores de risco relatados mais comuns (Karimi et al., 2014). Estes fatores elencados estão tipicamente associados ao desenvolvimento de tumores não cárdia (Karimi et al., 2014). O *H. pylori* é um carcinogéneo tipo I e contribui para 75-89% de todos os adenocarcinomas gástricos não cárdia (Plummer et al., 2015).

Tendo em conta que a vasta maioria dos CG são adenocarcinomas e que dentro destes, o tipo intestinal é o que permite uma abordagem endoscópica aos seus percursores, neste trabalho o termo CG reportará, essencialmente, ao adenocarcinoma de tipo intestinal.

2.1.3. Cascata oncogénica

O CG pode ser encarado como a etapa final da cascata de Correa (Correa, 1992). Desta forma, o desenvolvimento do adenocarcinoma gástrico tem a sua origem com a infeção crónica

por *H. pylori* e consequente inflamação crónica da mucosa. Segue-se o desenvolvimento de gastrite atrófica (GA), metaplasia intestinal (MI) e, posteriormente, lesões neoplásicas como displasia e CG. Como tal, a GA e a MI são consideradas como condições pré-neoplásicas.

Segundo uma meta-análise realizada por Marques-Silva *et al.*, as lesões precursoras do adenocarcinoma gástrico apresentam elevada prevalência. Com base em estudos endoscópicos, foi reportada uma prevalência de GA crónica de 33,4% e de 25,0% para MI na população geral (Marques-Silva et al., 2014).

2.1.3.1. Gastrite atrófica

A GA é definida pela diminuição do número de glândulas gástricas e a sua substituição pode ocorrer por meio do desenvolvimento de MI ou metaplasia pseudopilórica, sendo que esta última não se associa ao desenvolvimento de cancro gástrico (Dilaghi et al., 2021).

2.1.3.2. Metaplasia intestinal gástrica

A MI gástrica é definida pela substituição das células colunares típicas da mucosa gástrica por células do epitélio intestinal, como células caliciformes, células de Paneth e enterócitos (de Vries et al., 2007).

A existência de MI representa um risco de desenvolvimento de CG cerca de dez vezes superior (Correa, 1992; Leung & Sung, 2002). Dentro dos vários fenótipos de MI, a sua forma extensa com afeção do corpo e antro é considerada como sendo de risco elevado para o desenvolvimento de neoplasia (Dixon et al., 1996).

O tratamento da infeção por *H. pylori* pode levar à regressão da GA multifocal e, eventualmente, da MI.

2.1.3.3. Displasia gástrica

A displasia gástrica é caracterizada pela alteração das células epiteliais quanto ao seu tamanho, forma e orientação. Está também associada a alterações do núcleo com aumento do seu tamanho e atipia (de Vries et al., 2007).

Foram criadas diversas classificações numa tentativa de harmonizar as discrepâncias existentes entre patologistas, nomeadamente, ao nível do diagnóstico. Segundo a classificação da Organização Mundial de Saúde a displasia pode ser dividida em três categorias: displasia de baixo grau, displasia de alto grau e lesão indefinida para displasia (Sung, 2016).

2.1.4. Vigilância endoscópica

Nos países ocidentais, a menor taxa de cancro gástrico e a ausência de programas de rastreio em massa contribuem para o diagnóstico tardio e uma implementação mais lenta de tratamentos endoscópicos minimamente invasivos (Libânio et al., 2021).

Uma estratégia de prevenção secundária, por meio de vigilância endoscópica, de doentes com alto risco de adenocarcinoma gástrico de tipo intestinal ou por rastreamento de cancro gástrico em programas de rastreio do cancro colorretal poderá corresponder a um bom rácio custo-benefício, em países de risco intermédio, embora a identificação desses pacientes constitua um desafio (Areia et al., 2018).

2.2. Problemática atual

Em termos históricos o conceito de cancro gástrico precoce (CGP) teve a sua origem no Japão no ano de 1962 (Alfaro & Lauwers, 2011). Atualmente, a definição de CGP engloba tumores confinados à mucosa ou submucosa, independentemente, da existência de metastização ganglionar (Murakami, 1971). Desta forma, segundo o sistema de estadiamento pTNM, o CGP enquadra-se dentro dos estadios IA e IB. Por sua vez, a deteção de CGP tem implicação prognóstica, já que em algumas séries a taxa de sobrevivência a 5 anos de tumores de estadio I atinge os 95%, enquanto a mesma decresce para 66,5% para estadios II e 46,9% para estadios III (Katai et al., 2018).

Tem existido um esforço no sentido de alcançar uma deteção endoscópica do cancro gástrico mais precoce, dado que esta se associa a melhores desfechos e menor mortalidade (Banks et al., 2019). Uma revisão sistemática e meta-análise realizada por Pimenta-Melo *et al.* com base em 22 estudos com um total de 69.061 pacientes concluiu que cerca de 9,4% dos cancros gástricos não são detetados por endoscopia tradicional com luz branca, sendo os adenocarcinomas do corpo gástrico os mais subdiagnosticados (Pimenta-Melo et al., 2016). Tendo em conta o objetivo de deteção do CGP, a atual endoscopia com luz branca (WLI) apresenta uma sensibilidade subótima e, por isso, com potencial de incremento (Yoshida et al., 2021).

3. Imagem endoscópica

Desde a introdução do primeiro protótipo de gastroscópio em 1950 pela OLYMPUS, a área da imagem endoscópica tem alcançado significativos avanços (Magarotto et al., 2021). Além do aumento da qualidade da imagem que permite hoje obter imagem de alta-definição, foram também sendo acopladas ferramentas e tecnologias complementares que contribuíram para um melhor desempenho diagnóstico.

3.1. Método convencional - Luz branca

A endoscopia convencional com luz branca (WLI) é o método convencional atual, no entanto, a sua capacidade de deteção de cancro gástrico precoce (CGP) apresenta significativas limitações, sendo que cerca de 1 em cada 10 tumores não são detetados (Pimenta-Melo et al., 2016).

3.2. Técnicas de cromoendoscopia

O processo de desenvolvimento tumoral é acompanhado de alterações a nível estrutural e celular, com impacto nas propriedades de fluorescência endógena da mucosa. São estas alterações que vão permitir a sua deteção, nomeadamente, devido à degradação da estrutura de colagénio, espessamento da mucosa com consequente atenuação da luz azul e aumento da angiogénese, que se traduz numa maior absorção da hemoglobina e num aumento do metabolismo celular com repercussão em enzimas, como a espécie reduzida do dinucleótido de adenina nicotinamida (NADH) e a espécie oxidada do dinucleótido de adenina flavina (FAD) (Skala et al., 2007).

3.3. Cromoendoscopia virtual

Nos últimos anos, a cromoendoscopia virtual (CV) tem demonstrado ser uma ferramenta útil na deteção e diagnóstico de CGP e das suas lesões precursoras (Yashima et al., 2023). Comparativamente à WLI de alta-definição, a CV de alta-definição demonstrou ser superior no diagnóstico de metaplasia intestinal (MI), displasia e CGP (Waddingham et al., 2021). As recomendações internacionais atuais preconizam a utilização de CV, com ou sem magnificação, no diagnóstico de lesões pré-neoplásicas do estômago, na obtenção de biópsias guiadas da mucosa, assim como na deteção de lesões neoplásicas (Esposito et al., 2019; Pimentel-Nunes et al., 2019). De entre as diversas tecnologias destacam-se pela sua relevância o *Narrow Band Imaging* (NBI), o *Blue Laser Imaging* (BLI) e o *Linked Color Imaging* (LCI) (Osawa et al., 2018).

3.4. Narrow Band Imaging

A tecnologia de *Narrow Band Imaging* (NBI) começou a ser utilizada em 2005. Desde então, tornou-se a tecnologia de imagem endoscópica avançada (IEA) mais comummente utilizada a nível mundial (Gono, 2015).

A luz visível é composta pelos comprimentos de onda entre os 400 nm e os 700 nm, no entanto, dentro deste intervalo, luzes com comprimentos de onda diferentes vão apresentar comportamentos físicos diferentes quando em contacto com a mucosa (Gono, 2015).

O sistema NBI conta com uma fonte de luz constituída por uma lâmpada de xénon cujos raios luminosos irão passar por um filtro NBI e, posteriormente, um segundo filtro RGB (*Red-Green-Blue*) rotativo. A componente vermelha é descartada pelo filtro RGB e os comprimentos de onda reduzidos de 50-70 nm para 20-30 nm em redor dos 415 nm (luz azul) e 540 nm (luz verde) (Gono, 2015).

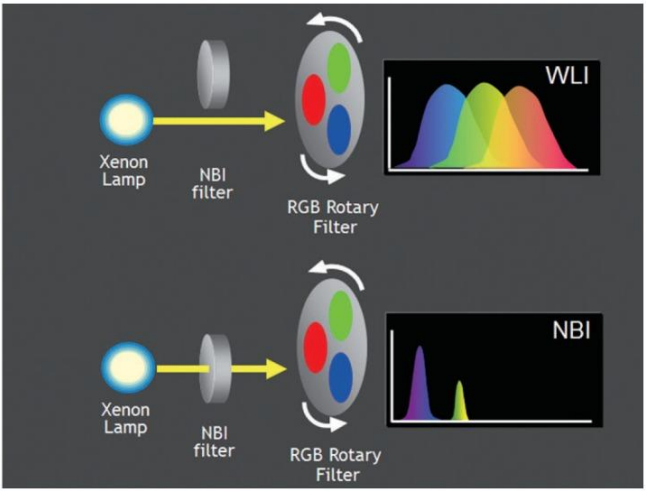


Figura 1 - Funcionamento da tecnologia de NBI.
Fonte (Gono, 2015).

A tecnologia NBI foi desenvolvida com o intuito de restringir os comprimentos de onda da luz emitida para que esta corresponda aos picos de absorção da hemoglobina. A combinação destes comprimentos de onda resulta numa luz que sofre dispersão na mucosa superficial e é absorvida pela hemoglobina presente nos capilares da mesma, permitindo gerar uma imagem onde a rede capilar da mucosa se encontra destacada, sendo assim mais facilmente observável (Gono, 2015).

3.5. Blue Laser Imaging

Este sistema utiliza dois tipos de laser com comprimentos de onda de 410 nm e 450 nm, correspondendo ao espetro da luz azul e violeta (Yoshida, Yagi, et al., 2014). O laser de 450 nm ao atingir um fósforo leva à emissão de luz fluorescente de largo espetro. Por ter um maior comprimento de onda este tipo de luz vai ser pouco absorvido e atingir camadas mais profundas da mucosa, permitindo uma melhor visualização dos vasos mais profundos de maior calibre (Togashi et al., 2016). A luz de comprimento de onda menor vai ser absorvida nas camadas mais superficiais da mucosa pela hemoglobina, contribuindo para um melhor contraste dos vasos e uma melhor visualização do padrão vascular (Bi et al., 2019).

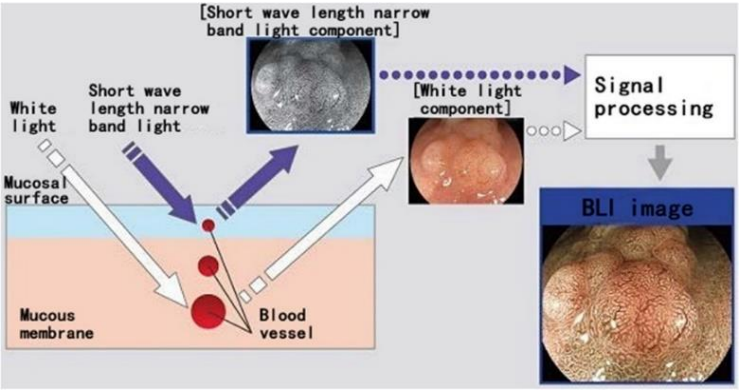


Figura 2 - Princípio de funcionamento do BLI.
Fonte: (Bi et al., 2019)

3.6. Linked Color Imaging

À semelhança do BLI, o LCI usa também utiliza dois tipos de luz, uma de comprimento de onda reduzido e luz branca. A luz laser com comprimento de onda de 410 nm vai permitir a visualização do padrão morfológico e vascular da mucosa, dado que a mesma irá apresentar uma reduzida penetração e ser absorvida pela hemoglobina da rede vascular superficial (Osawa et al., 2018; Shinozaki et al., 2019).

O processamento digital da imagem obtida por LCI aumenta o contraste dentro do espetro da luz vermelha, consequentemente, regiões da mucosa vermelhas à WLI irão ter uma aparência ainda mais vermelha e regiões originalmente brancas irão ter um aspeto ainda mais branco (Umegaki et al., 2023).

O seu elevado contraste de cores é uma vantagem desta tecnologia, uma vez que permite demarcar com maior facilidade as lesões da mucosa (Fukuda et al., 2015).

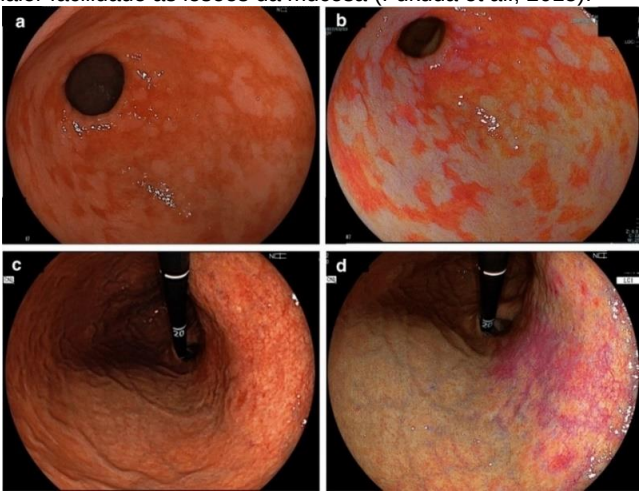


Figura 3 - Imagens obtidas com WLI e LCI. a: Imagem obtida com WLI de GA do corpo. b: Imagem obtida com LCI de GA do corpo. c: Imagem obtida com WLI de MI do antro. d: Imagem obtida com LCI de MI (cor lavanda) do antro.
Fonte: (Yashima et al., 2023).

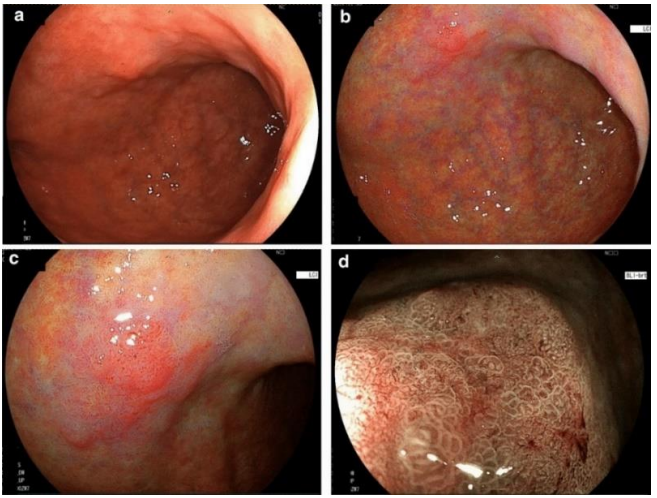


Figura 4 - Imagens obtidas com tecnologia LCI e BLI. a: Imagem de WLI de CGP da parede anterior do corpo. b: Imagem de LCI de CGP da parede anterior do corpo (região alaranjada com contorno cor de lavanda). c: Imagem de LCI de CGP aproximada. d: Imagem de BLI magnificada com visualização do padrão irregular de superfície e microvascular.
Fonte: (Yashima et al., 2023).

4. Inteligência Artificial

4.1. Conceito de Inteligência Artificial

A inteligência artificial (IA) tem subjacente a ideia de reproduzir o comportamento inteligente em máquinas, permitindo que estas alterem o seu comportamento de acordo com as circunstâncias externas (Yang & Bang, 2019). Trata-se de um conceito complexo, uma vez que o conceito de inteligência é, por si só, também ele complexo, dificultando o estabelecimento de uma definição uniforme e universal (Yang & Bang, 2019).

A IA permite que os sistemas analisem, de modo sistemático, grandes volumes de dados tendo em vista a resolução de determinadas questões, ou seja, agindo no sentido de alcançar um objetivo específico. Deste modo a análise computacional permite, através de aplicação de algoritmos, a interpretação de grandes volumes de dados de modo sistemático e rápido (Yang & Bang, 2019).

A IA sendo um conceito lato, engloba diversa subdivisões como o *machine learning* (ML). Dentro deste conceito mais restrito estão integradas técnicas que utilizam conjuntos de dados, encontram padrões nos mesmos e os aplicam a novos dados com o intuito de analisar e fazer predições (Nakaura et al., 2020).

O ML utiliza algoritmos que podem ser divididos em supervisionados e não supervisionados (Nakaura et al., 2020). Os algoritmos supervisionados são utilizados para predizer uma resposta a partir de um determinado conjunto de dados categorizados. Um

algoritmo supervisionado consegue utilizar um conjunto de imagens endoscópicas de múltiplas lesões previamente categorizadas como sendo malignas ou benignas e, quando exposto a uma nova imagem, categorizar a lesão como pertencendo a uma destas categorias. Por sua vez, nos algoritmos não supervisionados os dados não se encontram categorizados e é o algoritmo que, de forma independente, os analisa e organiza sem ter qualquer referência prévia (Nakaura et al., 2020).

O principal algoritmo de aprendizagem supervisionada de ML utilizado em imagem médica é o *Support Vector Machine* (SVM) (Yang & Bang, 2019).

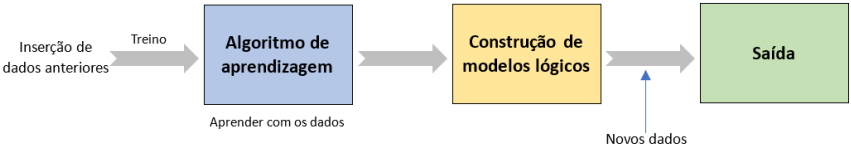


Figura 5 - Funcionamento dos algoritmos de Machine Learning

Com a evolução tecnológica surgiu dentro do ML um novo campo, o *deep learning* (DL). O DL recorre a algoritmos estruturados em múltiplas camadas à semelhança das redes neuronais (Yang & Bang, 2019). O primeiro algoritmo com múltiplas camadas surgiu nos anos 40 sendo constituído por três camadas, uma camada de entrada, uma camada escondida e uma camada de saída (McCulloch & Pitts, 1943). Nos anos 80 foi criado o primeiro algoritmo com múltiplas camadas escondidas, no entanto, diversos problemas impediram o desenvolvimento deste sistema, entre os quais a capacidade de computação limitada da época para treino dos mesmos (Yang & Bang, 2019). Nos últimos anos, com o ultrapassar destes obstáculos o DL tem tomado um lugar de destaque, nomeadamente, no diagnóstico médico.

De entre os diversos algoritmos de DL as redes neuronais convolutas profundas (RNCP) têm se destacado na área do diagnóstico imagiológico devido à sua capacidade de processamento de imagem (Yang & Bang, 2019). Estes algoritmos apresentam maior acuidade e flexibilidade comparativamente aos algoritmos de ML como o SVM, apresentando um conjunto de potenciais aplicações mais vasto (Zhao et al., 2022).

As RNCP são constituídas por três tipos de camadas. O primeiro tipo de camada é denominado de convolução, o segundo de agregação e o último de totalmente conectada (Yang & Bang, 2019).

Os SVM têm uma vantagem sobre as RCNP no sentido em que permitem averiguar quais as características que permitem o diagnóstico, ao invés de se limitarem a produzir um resultado (Yasuda et al., 2020). A utilização dos SVM poderia permitir perceber quais as características imagiológicas associadas às patologias e ajudar a expandir o conhecimento médico na área endoscópica. (Yasuda et al., 2020). Não obstante, os estudos mais recentes utilizam na sua vasta maioria as RNCP como sistema de aplicação da IA.

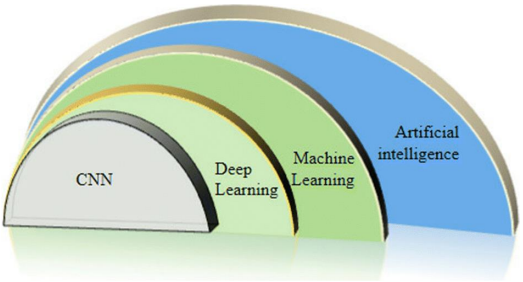


Figura 6 - Enquadramento das RNCP (CNN) dentro da IA.
Fonte: (Zhao et al., 2022)

4.2. A Inteligência Artificial Aplicada à Endoscopia

A endoscopia digestiva desempenha hoje um papel fulcral no diagnóstico e tratamento da patologia gastrointestinal. Dada a sua natureza técnica, é inevitável a variabilidade de desempenho entre os executantes, quer na vertente técnica como diagnóstica. Dadas as potencialidades da IA, foram desenvolvidos e estudados sistemas de ajuda à deteção e diagnóstico.

De uma forma geral, os algoritmos de IA no contexto da imagem médica podem ser divididos em *computer-aided detection* (CADe) se tiverem o objetivo de auxiliar a deteção de patologia e *computer-aided diagnosis* (CADx) se servirem para distinguir patologias e determinar o seu grau de progressão (Ochiai et al., 2022).

A aparência mais ténue do cancro gástrico precoce (CGP), assim como a menor prevalência de lesões gástricas e, consequentemente, menos imagens endoscópicas disponíveis para treinar os algoritmos de IA colocam desafios acrescidos à aplicação da mesma comparativamente ao seu desenvolvimento para o estudo do cólon, que se encontra mais desenvolvido (Ahmad, 2021).

A IA já demonstrou a sua eficácia na identificação e delimitação de lesões de CGP aliada a *magnification Narrow Band Imaging* (M-NBI) (Kanesaka et al., 2018). Atualmente, novos trabalhos estão a ser publicados reportando os resultados obtidos com algoritmos de DL aplicados a vídeos ao invés de apenas imagens, perspetivando-se a aplicação desta tecnologia em contexto clínico (Horiuchi, Hirasawa, et al., 2020).

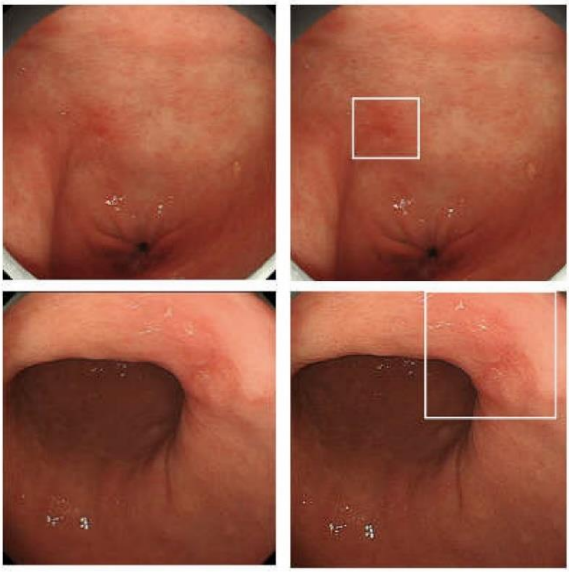


Figura 7 - Deteção de cancro gástrico através de sistema de CADe. Após a deteção da lesão o sistema assinala a sua localização para o endoscopistas.
Fonte:(Ochiai et al., 2022)

Os sistemas de IA têm não só a capacidade de auxiliar a deteção das lesões, assim como de as diferenciar. Dado o papel comprovado da imagem endoscópica avançada (IEA) na diferenciação das lesões gástricas, diversos sistemas de IA têm sido desenvolvidos para o diagnóstico endoscópico.

Para além da deteção e caracterização do cancro gástrico (CG), os sistemas de CADx podem ser aplicados para o diagnóstico das suas lesões precursoras. O primeiro sistema de CADx foi desenvolvido para o diagnóstico da infeção por *H. pylori* (Ochiai et al., 2022).

Um aspeto relevante da avaliação endoscópica diz respeito ao facto de mesmo com os sistemas de IA com elevada sensibilidade, o seu desempenho só poderá ser maximizado se for alcançada uma completa visualização da mucosa gástrica. Assim sendo, foram já desenvolvidos sistemas de IA com o intuito de auxiliar uma visualização completa da mucosa gástrica durante o exame endoscópico (Li et al., 2022; Wu, Zhang, et al., 2019; Wu, Zhou, et al., 2019).

A utilização da IA na endoscopia e o seu elevado desempenho abrem a porta para a utilização da mesma no processo de treino dos endoscopistas (Lui et al., 2020).

5. Análise comparativa de resultados

5.1. Comparação de imagem endoscópica avançada vs imagem endoscópica avançada com inteligência artificial

A aplicação da inteligência artificial (IA) no contexto da endoscopia digestiva alta tem por objetivo auxiliar os endoscopistas de forma a melhorar a acuidade diagnóstica, aumentando a taxa de deteção e reduzindo o número de falsos positivos. Estes sistemas de endoscopia assistida por IA são úteis não só na deteção precoce, mas também na diferenciação das lesões e predição da sua profundidade (Xiao et al., 2022).

5.2. Quadro síntese

No quadro seguinte sintetizam-se os resultados alcançados em diversos estudos que avaliaram o desempenho de múltiplas técnicas endoscópicas associadas a algoritmos de IA.

Quadro 1 - Síntese comparativa de resultados de aplicações da IA na deteção de cancro gástrico precoce e seus precursores

Estudo	Patologia	Aplicação	Técnica	Algoritmo	S	E	A
(Miyaki et al., 2013)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	FICE	SVM	85%	87%	86%
(Kanesaka et al., 2018)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	M-NBI	SVM	98%	95%	96%
		Delimitação de lesões			66%	81%	74%
(Hirasawa et al., 2018)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	WLI	RNCP	92%		
(Cho et al., 2019)	Cancro gástrico	Diagnóstico de CG	WLI	RNCP	76%	85%	82%
(Wu, Zhou, et al., 2019)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	WLI	RNCP	94%	91%	93%
(Yoon et al., 2019)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	WLI	RNCP	91%	98%	
		Avaliação do grau de invasão			79%	78%	
(Zhu et al., 2019)	Cancro gástrico	Avaliação do grau de invasão	WLI	RNCP	76%	96%	89%
(Luo et al., 2019)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	WLI	RNCP	95%	93%	93%
(Li et al., 2020)	Cancro gástrico	Diagnóstico de CGP	M-NBI	RNCP	91%	91%	91%
(Namikawa et al., 2020)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	WLI	RNCP	99%	93%	
		Deteção de úlcera gástrica			93%	99%	
(Horiuchi, Aoyama, et al., 2020)	Cancro gástrico e gastrite atrófica	Diagnóstico de CGP e GA	M-NBI	RNCP	95%	71%	85%

Estudo	Patologia	Aplicação	Técnica	Algoritmo	S	E	A
(Horiuchi, Hirasawa, et al., 2020)	Cancro gástrico	Diagnóstico de CGP	M-NBI	RNCP	87%	83%	85%
(Lui et al., 2020)	Cancro gástrico	Diagnóstico de CG	NBI	RNCP	97%	86%	91%
(Hu et al., 2021)	Cancro gástrico	Diagnóstico de CGP	M-NBI	RNCP	78%	74%	76%
(Ikenoyama et al., 2021)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	WLI	RNCP	58%	87%	90%
(Ueyama et al., 2021)	Cancro gástrico	Diagnóstico de CGP	M-NBI	RNCP	98%	100%	99%
(Wu et al., 2021)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	WLI	RNCP	100%	83%	
(Niikura et al., 2022)	Cancro gástrico	Deteção de CG	WLI	RNCP	100%		
(Wu, Wang, et al., 2022)	Cancro gástrico	Deteção de CGP	WLI	RNCP		93%	91%
(Wu, Xu, et al., 2022)	Cancro gástrico e lesões precursoras	Deteção de lesões	WLI	RNCP	93%		
		Diagnóstico de CGP			92%	92%	
(Ishioka et al., 2023)	Cancro gástrico	Diagnóstico de CGP	WLI	RNCP	85%	58%	71%
(Wang et al., 2019)	Metaplasia intestinal	Diagnóstico de MI	WLI	RNCP			90%
(Yan et al., 2020)	Metaplasia intestinal	Deteção de MI	M-NBI	RNCP	92%	86%	89%
(Lin et al., 2021)	Gastrite atrófica e metaplasia intestinal	Deteção de GA	WLI	RNCP	96%	96%	96%
		Deteção de MI			98%	98%	98%
(Xu et al., 2021)	Gastrite atrófica e metaplasia intestinal	Deteção de GA	M-NBI / BLI	RNCP	97%	73%	88%
		Deteção de MI			95%	84%	90%
(Zheng et al., 2020)	Gastrite atrófica e metaplasia intestinal	Deteção de GA	WLI	RNCP	87%	91%	
		Deteção de MI			90%	94%	
(Guimarães et al., 2020)	Gastrite atrófica	Diagnóstico de GA	WLI	RNCP	100%	88%	93%
(Zhang et al., 2020)	Gastrite atrófica	Diagnóstico de GA	WLI	RNCP	95%	94%	94%
(Shichijo et al., 2017)	Infeção H. pylori	Diagnóstico de infeção	WLI	RNCP	89%	87%	88%

Estudo	Patologia	Aplicação	Técnica	Algoritmo	S	E	A
(Itoh et al., 2018)	Infeção H. pylori	Deteção de infeção	WLI	RNCP	87%	87%	
(Nakashima et al., 2018)	Infeção H. pylori	Diagnóstico de infeção	WLI	RNCP	67%	60%	
			BLI		97%	87%	
			LCI		97%	83%	
(Shichijo et al., 2019)	Infeção H. pylori	Diagnóstico de infeção	WLI	RNCP			48%-84%
(Zheng et al., 2019)	Infeção H. pylori	Diagnóstico de infeção	WLI	RNCP	92%	99%	94%
(Nakashima et al., 2020)	Infeção H. pylori	Diagnóstico de infeção	WLI	RNCP	35%-95%	65%-94%	74%-78%
			LCI		63%-93%	80%-93%	79%-84%
(Yasuda et al., 2020)	Infeção H. pylori	Deteção de infeção	NBI	SVM	90%	86%	88%

S: Sensibilidade; E: Especificidade; A: Acuidade

6. Conclusões

O cancro gástrico é uma importante causa de mortalidade a nível mundial. A utilização de técnicas de imagem endoscópica avançada permite a deteção de condições pré-malignas, assim como de lesões displásicas e de cancro gástrico precoce permitindo o manejo por técnicas endoscópicas minimamente invasivas e contribuindo para uma redução da mortalidade relacionada com o cancro gástrico.

Este trabalho explorou as aplicações mais recentes da inteligência artificial, especialmente, do *deep learning* na avaliação endoscópica do CG e seus precursores. De uma forma geral, os estudos desenvolvidos demonstraram um bom desempenho diagnóstico dos sistemas de inteligência artificial, sendo este equiparável ao desempenho dos endoscopistas experientes e superior ao dos endoscopistas não experientes.

Referências bibliográficas

Areia, M., Spaander, M. C. W., Kuipers, E. J., & Dinis-Ribeiro, M. (2018). Endoscopic screening for gastric cancer: A cost-utility analysis for countries with an intermediate gastric cancer risk. In United European Gastroenterology Journal (Vol. 6, Issue 2, pp. 192–202). SAGE Publications Ltd.

Banks, M., Graham, D., Jansen, M., Gotoda, T., Coda, S., Di Pietro, M., … & Dinis-Ribeiro, M. (2019). British Society of Gastroenterology guidelines on the diagnosis and management of patients at risk of gastric adenocarcinoma. Gut, 68(9), 1545–1575.

Bi, Y., Min, M., Zhang, F., & Li, X. (2019). The Characteristics of Blue Laser Imaging and the Application in Diagnosis of Early Digestive Tract Cancer. Technology in Cancer Research & Treatment, 18, 153303381982587.

Cho, B.-J., Bang, C. S., Park, S. W., Yang, Y. J., Seo, S. I., Lim, H., … & Baik, G. H. (2019). Automated classification of gastric neoplasms in endoscopic images using a convolutional neural network. Endoscopy, 51(12), 1121–1129.

Correa, P. (1992). Human gastric carcinogenesis: a multistep and multifactorial process--First American Cancer Society Award Lecture on Cancer Epidemiology and Prevention. Cancer Research, 52(24), 6735–6740.

de Vries, A. C., Haringsma, J., & Kuipers, E. J. (2007). The Detection, Surveillance and Treatment of Premalignant Gastric Lesions Related to Helicobacter pylori Infection. Helicobacter, 12(1).

Gono, K. (2015). Narrow Band Imaging: Technology Basis and Research and Development History. Clinical Endoscopy, 48(6), 476–480.

Guimarães, P., Keller, A., Fehlmann, T., Lammert, F., & Casper, M. (2020). Deep-learning based detection of gastric precancerous conditions. Gut, 69(1), 4–6.

Hirasawa, T., Aoyama, K., Tanimoto, T., Ishihara, S., Shichijo, S., Ozawa, … & Tada, T. (2018). Application of artificial intelligence using a convolutional neural network for detecting gastric cancer in endoscopic images. Gastric Cancer, 21(4), 653–660.

Horiuchi, Y., Aoyama, K., Tokai, Y., Hirasawa, T., Yoshimizu, S., Ishiyama, … & Tada, T. (2020). Convolutional Neural Network for Differentiating Gastric Cancer from Gastritis Using Magnified Endoscopy with Narrow Band Imaging. Digestive Diseases and Sciences, 65(5), 1355–1363.

Horiuchi, Y., Hirasawa, T., Ishizuka, N., Tokai, Y., Namikawa, K., Yoshimizu, … & Tada, T. (2020). Performance of a computer-aided diagnosis system in diagnosing early gastric cancer using magnifying endoscopy videos with narrow-band imaging (with videos). Gastrointestinal Endoscopy, 92(4), 856-865.e1.

Hu, H., Gong, L., Dong, D., Zhu, L., Wang, M., He, J., … & Tian, J. (2021). Identifying early gastric cancer under magnifying narrow-band images with deep learning: a multicenter study. Gastrointestinal Endoscopy, 93(6), 1333-1341.e3.

Ikenoyama, Y., Hirasawa, T., Ishioka, M., Namikawa, K., Yoshimizu, S., Horiuchi, Y., … & Tada, T. (2021). Detecting early gastric cancer: Comparison between the diagnostic ability of convolutional neural networks and endoscopists. Digestive Endoscopy, 33(1), 141–150.

Ishioka, M., Osawa, H., Hirasawa, T., Kawachi, H., Nakano, K., Fukushima, … & Fujisaki, J. (2023). Performance of an artificial intelligence-based diagnostic support tool for early gastric cancers: Retrospective study. Digestive Endoscopy, 35(4), 483–491.

Itoh, T., Kawahira, H., Nakashima, H., & Yata, N. (2018). Deep learning analyzes Helicobacter pylori infection by upper gastrointestinal endoscopy images. Endoscopy International Open, 06(02), E139–E144.

Kanesaka, T., Lee, T. C., Uedo, N., Lin, K. P., Chen, H. Z., Lee, J. Y., … & Chang, H. T. (2018). Computer-aided diagnosis for identifying and delineating early gastric cancers in magnifying narrow-band imaging. Gastrointestinal Endoscopy, 87(5), 1339–1344.

Karimi, P., Islami, F., Anandasabapathy, S., Freedman, N. D., & Kamangar, F. (2014). Gastric Cancer: Descriptive Epidemiology, Risk Factors, Screening, and Prevention. Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention, 23(5), 700–713.

Katai, H., Ishikawa, T., Akazawa, K., Isobe, Y., Miyashiro, I., Oda, I., … & Nashimoto, A. (2018). Five-year survival analysis of surgically resected gastric cancer cases in Japan: a retrospective analysis of more than 100,000 patients from the nationwide registry of the Japanese Gastric Cancer Association (2001–2007). Gastric Cancer, 21(1), 144–154.

Leung, W. K., & Sung, J. J. Y. (2002). Intestinal metaplasia and gastric carcinogenesis. Alimentary Pharmacology & Therapeutics, 16(7), 1209–1216.

Li, L., Chen, Y., Shen, Z., Zhang, X., Sang, J., Ding, Y., … & Yu, C. (2020). Convolutional neural network for the diagnosis of early gastric cancer based on magnifying narrow band imaging. Gastric Cancer, 23(1), 126–132.

Libânio, D., Ortigão, R., Pimentel-Nunes, P., & Dinis-Ribeiro, M. (2021). Improving the Diagnosis and Treatment of Early Gastric Cancer in the West. GE Portuguese Journal of Gastroenterology.

Lin, N., Yu, T., Zheng, W., Hu, H., Xiang, L., Ye, G., … Si, J. (2021). Simultaneous Recognition of Atrophic Gastritis and Intestinal Metaplasia on White Light Endoscopic Images Based on Convolutional Neural Networks: A Multicenter Study. Clinical and Translational Gastroenterology, 12(8), e00385.

Lui, T. K. L., Wong, K. K. Y., Mak, L. L. Y., To, E. W. P., Tsui, V. W. M., Deng, Z., … & Leung, W. K. (2020). Feedback from artificial intelligence improved the learning of junior endoscopists on histology prediction of gastric lesions. Endoscopy International Open, 08(02), E139–E146.

Luo, H., Xu, G., Li, C., He, L., Luo, L., Wang, Z., … Xu, R. (2019). Real-time artificial intelligence for detection of upper gastrointestinal cancer by endoscopy: a multicentre, case-control, diagnostic study. The Lancet Oncology, 20(12), 1645–1654.

Magarotto, A., Bruno, M. T., & Masci, E. (2021). Advanced endoscopic imaging: a narrative review. Digestive Medicine Research, 4, 72–72.

Marques-Silva, L., Areia, M., Elvas, L., & Dinis-Ribeiro, M. (2014). Prevalence of gastric precancerous conditions. European Journal of Gastroenterology & Hepatology, 26(4), 378–387.

Miyaki, R., Yoshida, S., Tanaka, S., Kominami, Y., Sanomura, Y., Matsuo, T., … & Chayama, K. (2013). Quantitative identification of mucosal gastric cancer under magnifying endoscopy with flexible spectral imaging color enhancement. Journal of Gastroenterology and Hepatology, 28(5), 841–847.

Murakami, T. (1971). Pathological diagnosis-definition and gross classification of early gastric cancer. Gann Monogr Cancer Res, 11, 53–55.

Nakashima, H., Kawahira, H., Kawachi, H., & Sakaki, N. (2018). Artificial intelligence diagnosis of Helicobacter pylori infection using blue laser imaging-bright and linked color imaging: a single-center prospective study. Annals of Gastroenterology, 31(4), 462–468.

Nakashima, H., Kawahira, H., Kawachi, H., & Sakaki, N. (2020). Endoscopic three-categorical diagnosis of Helicobacter pylori infection using linked color imaging and deep learning: a single-center prospective study (with video). Gastric Cancer, 23(6), 1033–1040.

Nakaura, T., Higaki, T., Awai, K., Ikeda, O., & Yamashita, Y. (2020). A primer for understanding radiology articles about machine learning and deep learning. In Diagnostic and Interventional Imaging (Vol. 101, Issue 12, pp. 765–770). Elsevier Masson s.r.l.

Namikawa, K., Hirasawa, T., Nakano, K., Ikenoyama, Y., Ishioka, M., Shiroma, S., … & Tada, T. (2020). Artificial intelligence-based diagnostic system classifying gastric cancers and ulcers: comparison between the original and newly developed systems. Endoscopy, 52(12), 1077–1083.

Niikura, R., Aoki, T., Shichijo, S., Yamada, A., Kawahara, T., Kato, Y., … & Koike, K. (2022). Artificial intelligence versus expert endoscopists for diagnosis of gastric cancer in patients who have undergone upper gastrointestinal endoscopy. Endoscopy, 54(08), 780–784.

Ochiai, K., Ozawa, T., Shibata, J., Ishihara, S., & Tada, T. (2022). Current Status of Artificial Intelligence-Based Computer-Assisted Diagnosis Systems for Gastric Cancer in Endoscopy. Diagnostics, 12(12), 3153.

Osawa, H., Miura, Y., Takezawa, T., Ino, Y., Khurelbaatar, T., Sagara, Y., … & Yamamoto, H. (2018). Linked Color Imaging and Blue Laser Imaging for Upper Gastrointestinal Screening. Clinical Endoscopy, 51(6), 513–526.

Pimenta-Melo, A. R., Monteiro-Soares, M., Libânio, D., & Dinis-Ribeiro, M. (2016). Missing rate for gastric cancer during upper gastrointestinal endoscopy: A systematic review and meta-Analysis. European Journal of Gastroenterology and Hepatology, 28(9), 1041–1049.

Pimentel-Nunes, P., Libânio, D., Marcos-Pinto, R., Areia, M., Leja, M., Esposito, G., … & Dinis-Ribeiro, M. (2019). Management of epithelial precancerous conditions and lesions in the stomach (MAPS II): European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE), European Helicobacter and Microbiota Study Group (EHMSG), European Society of Pathology (ESP), and Sociedade Portuguesa de Endoscopia Digestiva (SPED) guideline update 2019. Endoscopy, 51(4), 365–388.

Shichijo, S., Endo, Y., Aoyama, K., Takeuchi, Y., Ozawa, T., Takiyama, H., … & Tada, T. (2019). Application of convolutional neural networks for evaluating Helicobacter pylori infection status on the basis of endoscopic images. Scandinavian Journal of Gastroenterology, 54(2), 158–163.

Shichijo, S., Nomura, S., Aoyama, K., Nishikawa, Y., Miura, M., Shinagawa, T., … & Tada, T. (2017). Application of Convolutional Neural Networks in the Diagnosis of Helicobacter pylori Infection Based on Endoscopic Images. EBioMedicine, 25, 106–111.

Ueyama, H., Kato, Y., Akazawa, Y., Yatagai, N., Komori, H., Takeda, T., … & Tada, T. (2021). Application of artificial intelligence using a convolutional neural network for diagnosis of early gastric cancer based on magnifying endoscopy with narrow-band imaging. Journal of Gastroenterology and Hepatology, 36(2), 482–489.

Umegaki, E., Misawa, H., Handa, O., Matsumoto, H., & Shiotani, A. (2023). Linked Color Imaging for Stomach. Diagnostics, 13(3), 467.

Waddingham, W., Nieuwenburg, S. A. V, Carlson, S., Rodriguez-Justo, M., Spaander, M., Kuipers, E. J., … & Banks, M. (2021). Recent advances in the detection and management of early gastric cancer and its precursors. Frontline Gastroenterology, 12(4), 322–331.

Wang, C., Li, Y., Yao, J., Chen, B., Song, J., & Yang, X. (2019). Localizing and Identifying Intestinal Metaplasia Based on Deep Learning in Oesophagoscope. 2019 8th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE), 1–4.

Wu, L., Shang, R., Sharma, P., Zhou, W., Liu, J., Yao, L., … Yu, H. (2021). Effect of a deep learning-based system on the miss rate of gastric neoplasms during upper gastrointestinal endoscopy: a single-centre, tandem, randomised controlled trial. The Lancet Gastroenterology & Hepatology, 6(9), 700–708.

Wu, L., Wang, J., He, X., Zhu, Y., Jiang, X., Chen, Y., … & Yu, H. (2022). Deep learning system compared with expert endoscopists in predicting early gastric cancer and its invasion depth and differentiation status (with videos). Gastrointestinal Endoscopy, 95(1), 92-104.e3.

Wu, L., Xu, M., Jiang, X., He, X., Zhang, H., Ai, Y., … & Yu, H. (2022). Real-time artificial intelligence for detecting focal lesions and diagnosing neoplasms of the stomach by white-light endoscopy (with videos). Gastrointestinal Endoscopy, 95(2), 269-280.e6.

Wu, L., Zhou, W., Wan, X., Zhang, J., Shen, L., Hu, S., … Yu, H. (2019). A deep neural network improves endoscopic detection of early gastric cancer without blind spots. Endoscopy, 51(06), 522–531.

Xu, M., Zhou, W., Wu, L., Zhang, J., Wang, J., Mu, G., … & Yu, H. (2021). Artificial intelligence in the diagnosis of gastric precancerous conditions by image-enhanced endoscopy: a multicenter, diagnostic study (with video). Gastrointestinal Endoscopy, 94(3), 540-548.e4.

Yan, T., Wong, P. K., Choi, I. C., Vong, C. M., & Yu, H. H. (2020). Intelligent diagnosis of gastric intestinal metaplasia based on convolutional neural network and limited number of endoscopic images. Computers in Biology and Medicine, 126, 104026.

Yang, Y. J., & Bang, C. S. (2019). Application of artificial intelligence in gastroenterology. World Journal of Gastroenterology, 25(14), 1666–1683.

Yashima, K., Onoyama, T., Kurumi, H., Takeda, Y., Yoshida, A., Kawaguchi, K., … & Isomoto, H. (2023). Current status and future perspective of linked color imaging for gastric cancer screening: a literature review. Journal of Gastroenterology, 58(1), 1–13.

Yasuda, T., Hiroyasu, T., Hiwa, S., Okada, Y., Hayashi, S., Nakahata, Y., … & Yagi, N. (2020). Potential of automatic diagnosis system with linked color imaging for diagnosis of Helicobacter pylori infection. Digestive Endoscopy, 32(3), 373–381.

Yoon, H. J., Kim, S., Kim, J.-H., Keum, J.-S., Oh, S.-I., Jo, J., … & Noh, S. H. (2019). A Lesion-Based Convolutional Neural Network Improves Endoscopic Detection and Depth Prediction of Early Gastric Cancer. Journal of Clinical Medicine, 8(9), 1310.

Yoshida, N., Doyama, H., Yano, T., Horimatsu, T., Uedo, N., Yamamoto, Y., … & Muto, M. (2021). Early gastric cancer detection in high-risk patients: a multicentre randomised controlled trial on the effect of second-generation narrow band imaging. Gut, 70, 67–75.

Zhang, Y., Li, F., Yuan, F., Zhang, K., Huo, L., Dong, Z., … & Shen, L. (2020). Diagnosing chronic atrophic gastritis by gastroscopy using artificial intelligence. Digestive and Liver Disease, 52(5), 566–572.

Zhao, Y., Hu, B., Wang, Y., Yin, X., Jiang, Y., & Zhu, X. (2022). Identification of gastric cancer with convolutional neural networks: a systematic review. Multimedia Tools and Applications, 81(8), 11717–11736.

Zheng, W., Yu, T., Lin, N., Ye, G., Zhu, X., Shen, Y., … & Si, J. (2020). Tu1075 DEEP CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR RECOGNITION OF ATROPHIC GASTRITIS AND INTESTINAL METAPLASIA BASED ON ENDOSCOPY IMAGES. Gastrointestinal Endoscopy, 91(6), AB533–AB534.

Zheng, W., Zhang, X., Kim, J. J., Zhu, X., Ye, G., Ye, B., … & Si, J. (2019). High Accuracy of Convolutional Neural Network for Evaluation of Helicobacter pylori Infection Based on Endoscopic Images: Preliminary Experience. Clinical and Translational Gastroenterology, 10(12), e00109.

Zhu, Y., Wang, Q.-C., Xu, M.-D., Zhang, Z., Cheng, J., Zhong, Y.-S., … & Li, Q.-L. (2019). Application of convolutional neural network in the diagnosis of the invasion depth of gastric cancer based on conventional endoscopy. Gastrointestinal Endoscopy, 89(4), 806-815.e1.