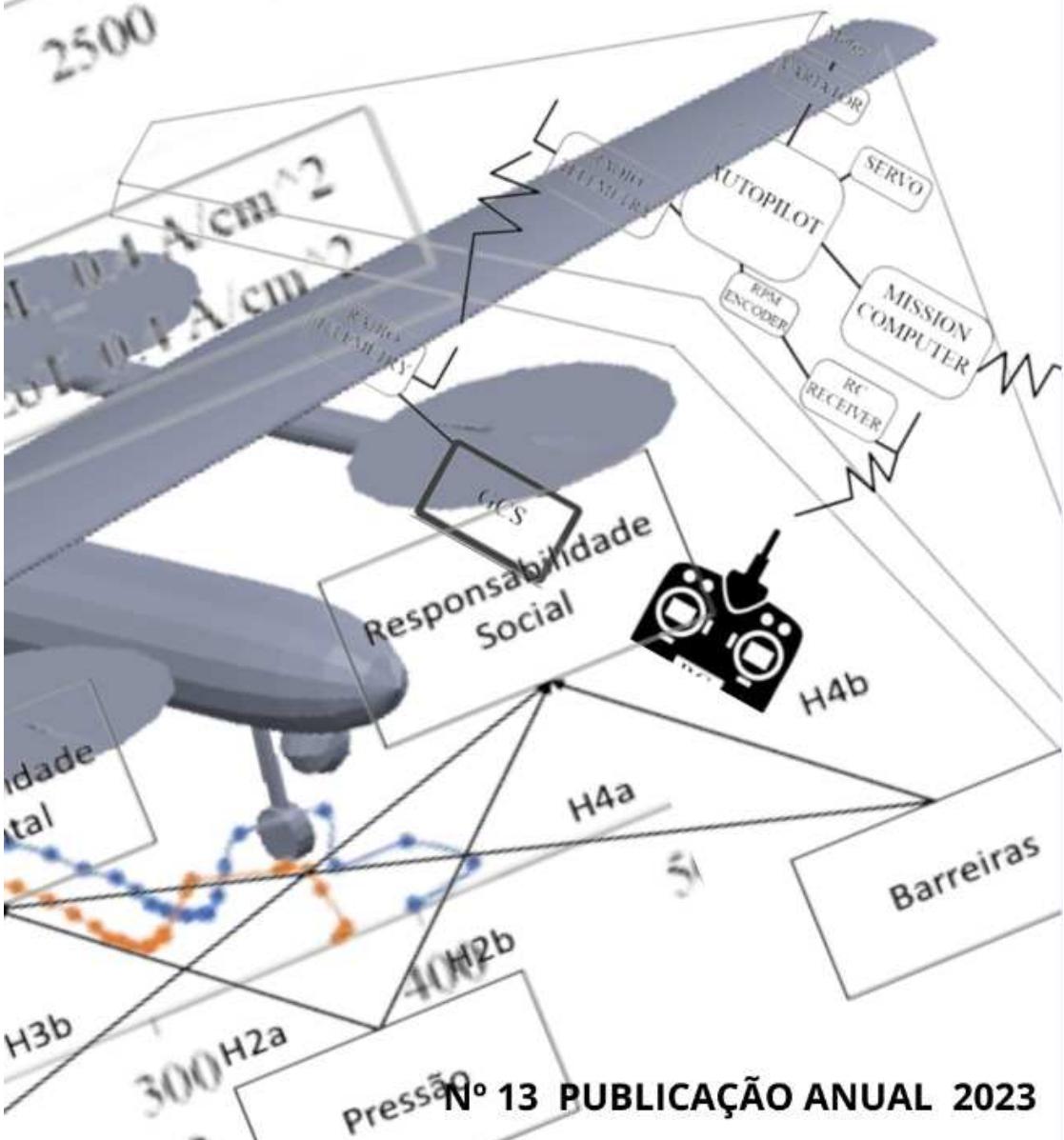




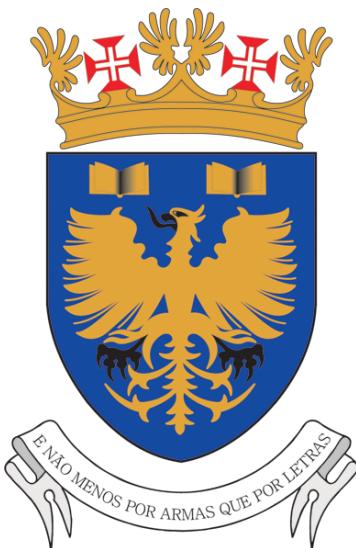
REVISTA CIENTÍFICA Academia da Força Aérea

"E não menos por Armas que por Letras"



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 13, publicação anual, 2023

Ficha Técnica

Diretor

Comandante da Academia da Força Aérea
Major-General Piloto Aviador, Luís Manuel Nunes Serôdio

Conselho Editorial

Diretor da Direção de Ensino da Academia da Força Aérea
Coronel Engenheiro Eletrotécnico, Paulo Santos

Comandante do Corpo de Alunos
Coronel Piloto Aviador, Luís Silva

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

Diretor do Centro de Investigação da Academia da Força Aérea
Tenente-Coronel Engenheiro Aeronáutico, Luís Félix

Conselho Consultivo

Luís Pereira, Major Engenheiro de Aeródromos
Pedro Guerreiro, Major Técnico de Operações de Meteorologia
João Pina, Major de Administração Aeronáutica
Ana Gomes, Major Psicóloga
Diogo Silva, Capitão Engenheiro Eletrotécnico
Ana Castanho, Capitão de Administração Aeronáutica
Vasco Coelho, Tenente Engenheiro Aeronáutico

Propriedade:	Academia da Força Aérea
Título:	Revista Científica da Academia da Força Aérea
Composição da Capa:	Sónia Barros da Silva, Assistente Técnica
Periodicidade:	Anual, Número 13, 2023
ISSN:	2182-2182
Depósito legal:	328295/11
Distribuição Gratuita	
Morada:	Academia da Força Aérea, Granja do Marquês
Código Postal:	2715-021 Pêro Pinheiro, Portugal
Correio eletrónico:	gabcmd@academiafa.edu.pt



Mensagem de Abertura



No plano essencial da cidadania, importa sublinhar que a produção de trabalhos científicos é porventura a forma mais distinta de aprofundar temas com particular relevância não só para a comunidade científica, mas também para os investigadores e para as Instituições que os apoiam, e igualmente para a sociedade a que todos pertencemos.

Efetivamente, a evolução de qualquer sociedade só acontece com conhecimento, e conhecimento só se alcança com a produção de estudos e trabalhos efetuados com objetividade e rigor científico.

Neste sentido, considero que a presente publicação tem o reconhecido mérito de abordar temas de domínios tão importantes como as tecnologias militares e aeronáuticas, a economia e gestão, as relações internacionais e o comportamento organizacional.

Enquanto militar, e piloto aviador, sempre valorizei a importância da divulgação de estudos concretos, rigorosos e objetivos, fundamentais à consolidação do conhecimento como suporte a todos os processos intrínsecos à tomada de decisão, motivo pelo qual considero que esta publicação, pela atualidade das temáticas apresentadas, e rigor científico apresentado, se constitui como uma referência e de leitura obrigatória.

Por tudo o referido, e na qualidade de Chefe do Estado Maior da Força Aérea, manifesto o meu reconhecimento a todos os alunos, docentes, oficiais, sargentos, praças e trabalhadores civis que têm prestado serviço na Academia da Força Aérea, e que com o seu esforço e dedicação, contribuem diariamente para o cumprimento da missão da Força Aérea e das Forças Armadas.

A todos apresento os meus votos de uma profícua leitura.

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



Editorial

O desenvolvimento do conhecimento e do saber científicos é o motor que impulsiona as instituições a prepararem-se para o futuro, encontrando as soluções mais adequadas para resolver os problemas complexos com que a sociedade invariavelmente se defronta.



A formação de um oficial dos Quadros Permanentes da Força Aérea, impõe, para além de todas as exigências relacionadas com a atividade militar e da respetiva especialidade, uma formação de base científica, assente nas ciências militares, onde se inclui a realização de trabalhos de investigação, procurando o contributo individual para o todo, representado na Instituição que abraçaram, e o desenvolvimento de uma atitude de procura constante de conhecimento e atualização científica, essenciais para garantir o sucesso ao longo da sua carreira, num mundo em que a mudança é constante e se realiza a um ritmo cada vez maior.

Neste sentido, a Academia da Força Aérea, como Estabelecimento de Ensino Superior Público Militar, mantém uma determinação firme para a constante produção de trabalhos de investigação com qualidade e relevância para o conhecimento científico, conforme se apresentam nesta publicação, em que se abordam questões tão diversas desde as áreas das tecnologias militares e aeronáuticas, às relações internacionais, da economia e gestão e do comportamento organizacional.

Termino, dirigindo uma palavra de profundo apreço a todos os docentes que contribuíram e orientaram os trabalhos aqui publicados, sem os quais não seria possível atingir a qualidade e a relevância que almejamos, assim como a todos os autores dos artigos, que partilham connosco parte do seu legado académico, realizado ao longo deste percurso de formação longo, árduo e complexo, mas pleno de significado.

Luis Manuel Nunes Serôdio, Major-General Piloto Aviador
Comandante da Academia da Força Aérea

Introdução

A Revista Científica da Academia da Força Aérea (AFA) tem ao longo dos seus 13 números promovido a divulgação da investigação científica da AFA, sendo ao mesmo tempo um repositório de conhecimento na área das Ciências Militares.



Apesar da sua publicação ser anual, consolida e agrega a investigação científica dos alunos da AFA, divulgando em fonte aberta e acessível a todos, os trabalhos por estes realizados no âmbito das dissertações de mestrado, em subáreas científicas das tecnologias militares, do comportamento organizacional, das relações internacionais, da estratégia e da economia e gestão.

Para este número da revista, foram identificados sete artigos com um elevado relevo para o conhecimento científico enquadrado nas ciências militares aeronáuticas.

Na área das tecnologias militares são apresentados quatro artigos.

O artigo “Longitudinal Control of a Tail-Sitter UAV” aborda o desenvolvimento e simulação de um modelo matemático que descreve a dinâmica de uma aeronave não tripulada, em particular na componente de controlo longitudinal.

O artigo “Graphene-Based Epoxy Resin Application on Laminated Composite Materials for Aeronautical Structures” tem como objetivo caracterizar materiais compósitos laminados fabricados de três matrizes diferentes de forma a avaliar o impacto do grafeno nas propriedades mecânicas dos laminados.

O artigo “Hydrogen Fuel Cell for Unmanned Aerial Systems: Operational Environment Contamination Response” aborda a utilização de células de hidrogénio em sistemas aéreos não tripulados adaptados às necessidades da Força Aérea.

O artigo “Software architecture for low-cost UAVs – An application considering automatic target tracking mission scenarios” aborda o desenvolvimento de uma arquitetura de software para utilização num UAV de asa fixa.

Na área científica do comportamento organizacional apresenta-se o artigo “Capital Psicológico Positivo como preditor do Desempenho Percebido: Estudo aplicado aos Alunos da Academia da Força Aérea” cujo principal objetivo foi a análise da influência do capital psicológico positivo no desempenho dos alunos da Academia da Força Aérea.

Na área científica das relações internacionais propõe-se um artigo com o tema “República da Turquia: Partido da Justiça e Desenvolvimento e a Projeção de uma Potência Regional (2001-2020)” onde se analisam mudanças promovidas pela Turquia no contexto da sua política interna e seu enquadramento no sistema internacional.

Para a área científica da economia e gestão, o artigo “Determinantes da Adoção de Práticas de Sustentabilidade dos Fornecedores da Força Aérea Portuguesa” analisa a percepção dos fornecedores da Força Aérea relativamente aos determinantes da adoção de práticas de responsabilidade social e responsabilidade ambiental.

Todos os artigos que esta edição da revista científica da AFA apresenta advêm da investigação dos seus autores e foram revistos e apreciados pelo conselho consultivo, sendo por isso considerados instrumentos de consolidação e de aumento do conhecimento nas ciências militares aeronáuticas promovendo por isso a qualidade do ensino e investigação da AFA.

Paulo César Cabedal dos Santos, Coronel Engenheiro Eletrotécnico
Diretor da Direção de Ensino



Revista Científica

Academia da Força Aérea

Índice

Longitudinal Control of a Tail-Sitter UAV	7
Raquel Alexandra Maia Rocha Alferes Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Engenharia Aeronáutica	
Graphene-Based Epoxy Resin Application on Laminated Composite Materials for Aeronautical Structures	23
António Luís Monteiro Oliveira Alferes Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Engenharia Aeronáutica	
Determinantes da Adoção de Práticas de Sustentabilidade dos Fornecedores da Força Aérea Portuguesa	38
Luis Manuel Pinto Oliveira Alferes Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Administração Aeronáutica	
Software architecture for low-cost UAVs – An application considering automatic target tracking mission scenarios	54
João Filipe Gomes Moreira Alves Aspirante a Oficial Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Piloto Aviador	
Hydrogen Fuel Cell for Unmanned Aerial Systems: Operational Environment Contamination Response	69
José Guilherme Costa Moura Aspirante a Oficial Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Piloto Aviador	
República da Turquia: Partido da Justiça e Desenvolvimento e a Projeção de uma Potência Regional (2001-2020)	79
André Ferreira Belbut Aspirante a Oficial Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Piloto-Aviador	
Capital Psicológico Positivo como preditor do Desempenho Percebido: Estudo aplicado aos Alunos da Academia da Força Aérea	90
Gonçalo Filipe Cantante Marquardo Aspirante a Oficial Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Piloto-Aviador	

Longitudinal Control of a Tail-Sitter UAV



Autor: **Raquel Alexandra Maia Rocha**

Alferes Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Engenharia Aeronáutica
Academia da Força Aérea, Sintra

Orientador: **Prof. Alexandra Bento Moutinho**

Instituto Superior Técnico, Lisboa

Orientador: **Prof. José Raul Carreira Azinheira**

Instituto Superior Técnico, Lisboa

Abstract

The present article details a tail-sitter unmanned aerial vehicle model and the challenges of designing its flight controller. As a particular type of fixed-wing aircraft, tail-sitters are able to perform both aerodynamic flight and stationary maneuvers, vertical take-off and landing, as well as transitions between the two operating conditions. In this work, first, a mathematical nonlinear model describing the aircraft dynamics is detailed and a real-time simulator is implemented. Second, the nonlinear model is linearized and analysed so that linear control methods can be used. Since the aircraft lateral and longitudinal dynamics can be decoupled, it is considered only the longitudinal model for control purposes. Using classical control techniques, namely proportional–integral–derivative and linear quadratic regulator controllers, the stabilization of linearized models, the trajectory tracking during transitions and also the autonomous take-off and landing maneuvers are possible by means of a supervisory control logic. This supervisory controller is responsible for selecting the controller operating mode depending on the actual flight stage and desired maneuver. Finally, the whole controller is tested by simulating a vertical take-off and landing minimum mission. The simulation results are presented and the controller analysed.

Keywords: Tail-sitter, Nonlinear Model, Linear Control, Linear Quadratic Regulator, Autonomous Transitions, Vertical Take-Off and Landing.

1 Introduction

Every year there is a constant need of support in wildfire operations. The Eye in the Sky project is an initiative with the main goal of developing aerial platforms to improve the situational perception and monitoring of the fire perimeter Eye In The Sky (2020). Unmanned Aerial Vehicles (UAV) transported by a High Altitude Balloon (HAB) to these areas of interest have been presented as solutions to collect and transmit reliable high resolution real-time images to improve emergency operations.

Within the scope of this project different UAV configurations have been proposed and studied. UAVs are often classified into two categories: fixed-wing aircraft, which have better performance in flight efficiency and long endurance missions; and rotor-crafts, which are preferred for their precise maneuvering and hovering capabilities. Understanding the advantages of combining these two qualities, recent developments have been done in a third category: the fixed-wing Vertical Take-Off and Land (VTOL) aircraft, able to perform both hovering and efficient aerodynamic flight. Among with several ways to perform VTOL manoeuvre, a flying wing tail-sitter configuration is chosen as a case study of the modeling and its associated control challenges.

The challenge of controlling a tail-sitter, in comparison with conventional aircraft, arises from the very different aircraft dynamics between hover and leveled flights. One the one hand, if linear control methods are intended, such differences may require distinct controllers for each operating mode. In Myrand-Lapierre, Desbiens, Gagnon, Wong, and Poulin (2010), to stabilize the aircraft and for reference tracking in each operating mode, the use of Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers is successfully explored. In Casau (2011), Carlos and Parreira (2019) and Kriel (2008), an optimal control technique namely Linear–Quadratic Regulator (LQR) was successfully implemented during both flight conditions and transitions, in a conventional configuration aircraft, a flying wing and a tail-sitter, respectively. In respect of the switching logic between the different operating modes linear controller, several control strategies, such as the use of a supervisory control or gain scheduling, have been reported.

In Chiappinelli (2018), a single quaternions nonlinear based controller, with a cascaded architecture, is developed for the very same tail-sitter propose for this thesis, the X-VERT VTOL Horizon Hobby. This nonlinear controller has proven through experimental flight tests to be able to perform the transitions needed. The main advantage of this control structure is that it is able to perform through large attitude ranges since it does not assume any particular operating condition.

Beside of the nonlinear controllers valuable implementations, the simplicity of linear control systems gives them a great amount of advantages as they can be analyzed using very powerful known mathematical tools and are less demanding during computer simulations.

Therefore, in the present work, the use of optimal linear control techniques is proposed and the main objectives are: first, the understanding of a nonlinear model of the chosen tail-sitter platform provided for control purposes, and its implementation in a real-time simulator for control design and testing purposes; second, the focus on the longitudinal stability analysis

of the nonlinear model by making use of linearization and linear control theory analysis; third, the design of a longitudinal flight controller able to perform stable hover and level flights, as well as transition between this two types of flights, and also to perform autonomous take-off and landing; finally, the simulation of a minimum flight mission which would include all the critical phases to verify the smooth operation between flight modes and validate the developed controller.

2 Platform and Notation Presentation

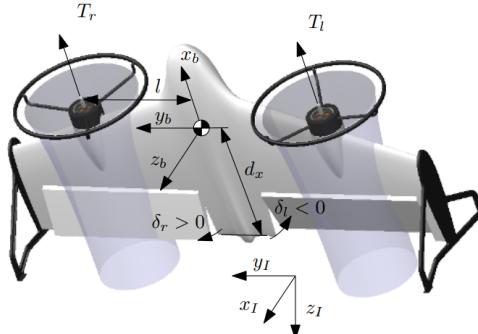


Figure 1: Tailsitter CAD model showing the body and inertial frame, the four actuators, and the slipstream acting on a portion of the control surfaces. The deflections are defined positive along y_B using the right hand rule. From Chiappinelli (2018).

The proposed platform to design and control was the E-flite X-Vert VTOL tail-sitter, made by Horizon Hobby. Its geometry can be described as a tailless blended wing-body aircraft with a span of approximately 0.5 [m] and a mass of approximately 0.2 [kg], depending on the selected additional sensors. As a result, instead of having ailerons on its wings and elevators on its tail, it has a single control surface on the trailing edge on each side, known as elevons. The X-Vert has two propellers, aligned with the control surfaces, and fixed in a forward direction in the body frame.

In addition to the thrusters, composed by the propellers and the corresponding motors, the wing body and elevons aerodynamics, other components including the propellers guards and the landing gear are considered. These last structures only result in pure drag forces. To simulate the take-off and landing phases, the ground forces generated in response to the aircraft touching the ground are also included.

2.1 Reference Frames

The aircraft dynamic model derivation requires the definition of mainly two reference systems to characterize the position and orientation of the aircraft: the inertial frame \mathbb{F}_I and the body frame \mathbb{F}_B . The inertial frame $\mathbb{F}_I = [x_I, y_I, z_I]^T$ is fixed on the Earth's surface and is chosen as NED coordinates (North-East-Down). The ground is assumed to be locally flat and non-rotating for the current application, considering the distance and duration of the flight. The body frame $\mathbb{F}_B = [x_B, y_B, z_B]^T$ is fixed on the aircraft moving body and located at its center of gravity (CG). The CG is assumed to be laterally centered, inside the chord line, and located at a distance d_x from the trailing edge.

2.2 Attitude Representation

The transformation between the body frame \mathbb{F}_B and the inertial frame \mathbb{F}_I is obtained by rotating these frames certain angles about their three axes. In aircraft applications, these angles are commonly referred to as Euler angles Randal W. Bread (2012), namely roll (ϕ), pitch (θ) and yaw (ψ).

Knowing that the aircraft will operate over a large attitude range, the mathematical singularity of this Euler representation, known as gimbal lock, cannot be ignored. Instead, the quaternion q attitude representation is used despite of its lack of intuitive appeal Sola (2017).

2.3 Actuators

This aircraft has an unconventional set of actuator constituted by two counter-rotating propellers and two elevons. The propellers are driven by the thruster signals τ_l , τ_r , that go between 0 and 1, and provide the unidirectional thrust forces T_l , T_r and torques Q_l , Q_r about the propeller axis of rotation. The elevons, with a maximum deflection of 39° , are control surfaces intentionally located behind the thrusters, in the propeller's flow (slipstream), to ensure their effectiveness during low-speed operations. Their deflections are represented by δ_l , δ_r , and, being defined by the right hand rule, a positive deflection means the elevon deflects down.

The relation between this actuation representation and the conventional set of actuators (elevator δ_E , aileron δ_A , rudder δ_R and thrust signal δ_T) are:

$$\begin{aligned}\delta_E &= \frac{\delta_r + \delta_l}{2} & \delta_A &= \frac{\delta_r - \delta_l}{2} \\ \delta_R &= \frac{\tau_r - \tau_l}{2} & \delta_T &= \frac{\tau_r + \tau_l}{2}\end{aligned}\quad (1)$$

3 Nonlinear Model

The current section describes a nonlinear model of the X-Vert tail-sitter that is implemented in a *Matlab/Simulink* simulator. To model the aircraft dynamics, each of the constituting components is defined so that it can be represented by a force and moment that, when translated to the aircraft center of gravity (CG), can fed the aircraft equations of motion. From the application of the Newton's second law to a rigid body Randal W. Bread (2012), these equations are:

$$\begin{aligned}\dot{p} &= R(q) v_B \\ \dot{q} &= \frac{1}{2} \Omega q \\ \dot{v}_B &= \frac{1}{m} F_B - \omega_B \times v_B \\ \dot{\omega}_B &= I^{-1} (M_B - \omega_B \times I \omega_B)\end{aligned}\quad (2)$$

where $p = [p_N, p_E, p_D]^T$ is the inertial position, $R(q)$ is the rotation matrix from body frame to inertial frame, which is calculated from the unit quaternion q representing the angular position, $v_B = [u, v, w]^T$ is the velocity of the CG in the body frame, $\omega_B = [p, q, r]^T$ are the body angular rates in the body frame, m is the vehicle total mass, I is the inertia matrix of the vehicle, and \times is the 3D cross product. Ω is the quaternion attitude relation with the body rates and is given by:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix}\quad (3)$$

F_B and M_B are the total force and moment acting at the CG and are considered the sum of the forces and moments due to gravity (which by definition is applied at the CG, and so it does not produce torque), the thrusters (which result from the left and right operating propellers), the wing aerodynamics (including the wing body and the elevons effects), the rods drag (from structural segments), and the vehicle's contact with the ground:

$$\begin{aligned} F_B &= F_g + F_t + F_a + F_r + F_c \\ M_B &= M_t + M_a + M_r + M_c \end{aligned} \quad (4)$$

3.1 Air Velocity

In order to compute the thrust, aerodynamic and rod forces, the air velocities v_a at these segments or components of the aircraft are needed. Considering the possibility of wind conditions, the air velocity at the CG is computed as $v_a = v_B - v_w$, where v_w is the wind velocity in the body frame. Although, no wind model is considered in this work, it should be implemented in future works to add realism to the simulation.

At any point rather than the CG and out of the slipstream, the air velocity $v_{a,i}$ at the position r_i from the CG should consider the body angular rates ω_B , and is given by:

$$v_{a,i} = v_a + \omega_B \times r_i \quad (5)$$

Beside of the vector representation, the air velocity (at the CG v_a or at any other point $v_{a,i}$) can also be expressed in terms of the airspeed $V_a = \text{norm}([u_a, v_a, w_a])$, the angle of attack $\alpha = \text{atan2}(w_a, u_a)$ and the angle of side slip $\beta = \text{asin}(v_a, V_a)$.

3.2 Gravity

The gravity's effect on the aircraft is modeled as a force proportional to the mass m and the gravitational acceleration g applied at the CG:

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{R}^T(\mathbf{q}) [0, 0, mg]^T \quad (6)$$

The CG location is assumed to be in the vertical plane of symmetry of the aircraft at a distance d_x from the trailing edge, and in the same horizontal plane as the thrusters axes of rotation and the cord line of the wings.

3.3 Thrusters

To define the thrusters force, only the longitudinal forces component, normal to the propeller's disks, are considered:

$$\mathbf{F}_t = [T_l + T_r, 0, 0]^T \quad (7)$$

Each thruster generates a torque Q about the x_B axis and a yawing moment about the z_B because they are placed at a lateral distance l from the CG. In addition, the resisting torques from the motors' moving parts, which are proportional to the thruster rotational inertia I_{th} , the difference between the propeller's angular speeds Ω_l and Ω_r , and the body rates r and q , are considered:

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} Q_r - Q_l \\ 0 \\ l(T_l - T_r) \end{bmatrix} + I_{th} (\Omega_l - \Omega_r) \begin{bmatrix} 0 \\ -r \\ q \end{bmatrix} \quad (8)$$

Each thruster unit (left and right) consists of a propeller coupled with a brushless electric motor, in turn driven by an Electronic Speed Controller (ESC). First, the ESC is connected to the battery with an available voltage V_{batt} and varies the voltage provided to the motor V_m accordingly to the controller's commanded throttle signal τ :

$$V_m = V_{batt} \tau \quad (9)$$

The electric motor receives the V_m voltage and the electric current I and rotates the propeller at an angular velocity Ω . The dynamics of the electric motor are derived from the Kirchhoff's current law and Newton's second law applied to the electrical and mechanical systems Moutinho and Azinheira (2018), respectively, and are given by:

$$\begin{aligned}\dot{I} &= \frac{1}{L_m} (V_m - R_m I - K_e \Omega) \\ \dot{\Omega} &= \frac{1}{J_m} (K_t I - Q - B_m \Omega)\end{aligned}\quad (10)$$

where J_m is the inertial moment, L_m is the inductance, R_m is the motor resistance, B_m is the damping constant, K_e is the back-electromotive force, K_t is the torque constant, and Q is the torque produced by the thruster model.

The model of the propeller's aerodynamics can be derived based on Momentum Theory and Bernoulli's Equation from Leishman (2006) and McCormick (1994). Knowing the propeller's angular speed Ω , the inflow velocity u_{in} , and the propeller's radius r_p , the advance ratio J , in [1/rev], is calculated as follows:

$$J = \frac{\pi u_{in}}{\Omega r_p} \quad (11)$$

Then, according to the UIUC data site Department of Aerospace Engineering of University of Illinois at Urbana-Champaign (2022), for the E-flite 130 x 75 [mm] propeller the values of the thrust and torque coefficients C_T and C_P can be retrieved as a function of the advance ratio J :

$$C_T = C_T(J), \quad C_Q = C_P(J) \quad (12)$$

Finally, thrust force T and torque Q for any given angular speed Ω are calculated:

$$T = \frac{4}{\pi^2} \rho \Omega^2 r_p^4 C_T, \quad Q = \frac{4}{\pi^3} \rho \Omega^2 r_p^5 C_P \quad (13)$$

The same model is used for the left and right thrusters. The torques Q_l and Q_r are computed as magnitudes, and their directions are taken into account in (8).

3.4 Slipstream

The velocity downstream of the propeller disk is accelerated and can be predicted from Momentum Theory Leishman (2006). When in the fully developed wake, the air velocity is given by:

$$v_{wake} = v_{in} + [2 w_{ind}, 0, 0]^T \quad (14)$$

where v_{in} is the inflow velocity (air velocity before the propeller) and w_{ind} is the induce velocity, which is defined as the difference between V_{prop} (the velocity immediately below the propeller) and V_{in} . Knowing the T produced by each propeller, the induced velocity w_{ind} of each one can be determined solving the following fourth order equation:

$$w_{ind}^4 + 2 \cos(\varphi) V_{in} w_{ind}^3 + V_{in}^2 w_{ind}^2 = \left(\frac{T}{2 \rho A} \right)^2 \quad (15)$$

where $\varphi = \text{acos}(u_{in}, V_{in})$ represents the angle between V_{in} and the axis of rotation of the propeller, $A = \pi r_p^2$ is the disk area and ρ is the air density in [kg/m^3]. The area of the elevon affected by the propeller wake is given by $S_{wake} = 2 r_{wake} c_e$, where c_e is the elevon chord and r_{wake} is the wake radius, which in fully developed wake can be approximated by a simple relation with the propeller's radius $r_{wake} = \sqrt{2} r_p$.

3.5 Wing Aerodynamics

The wing is decomposed into four segments, see Fig. 2. The segments 1 and 2 represent the area of the half wing and elevon that is not affected by the fully developed wake on each side; and the segments 3 and 4 represent the area of the elevon under the propeller wake. This separation is important to ensure the effectiveness of the control surfaces mainly during hover flight.

The four segments are described by the position coordinates of their aerodynamic center $r_i = [x_i, y_i, z_i]$ in the body frame, its surface S_i , and its own air velocity $V_{a,i}$, angle of attack α_i , and side slip β_i . Therefore, each segment i creates its

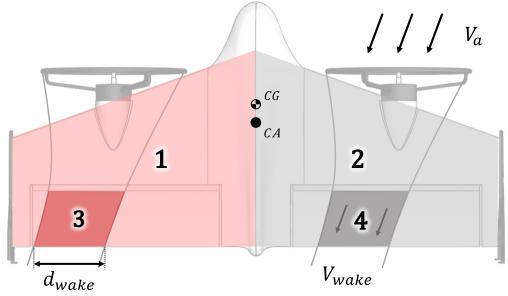


Figure 2: Wing Segments.

own lift force L_i , drag force D_i , and pitching moment m_i about its aerodynamic center, from the following equations:

$$\begin{aligned} L_i &= \frac{1}{2} \rho V_{a,i}^2 S_i C_L(\alpha_i, \delta_i) \\ D_i &= \frac{1}{2} \rho V_{a,i}^2 S_i C_D(\alpha_i, \delta_i) \\ m_i &= \frac{1}{2} \rho V_{a,i}^2 S_i \bar{c}_i C_m(\alpha_i, \delta_i) \end{aligned} \quad (16)$$

where lift coefficient C_L , drag coefficient C_D , and pitching moment coefficient C_m are functions of the local angle of attack α_i and elevon deflection δ_i . These aerodynamics coefficients are modeled as flat-plate segments for the full range of angles of attack, which include the linear range of low angles of attack and the nonlinear range when the angle of attack overcomes the stall angle. The control surface deflections can be represented as an increase in the airfoil camber and a reduction in its effective chord length, and so, also affect the aerodynamic forces and moments coefficients. The high ordered nonlinear functions used in this work were adapted from Chiappinelli (2018) and are shown in Fig. 3 and 4.

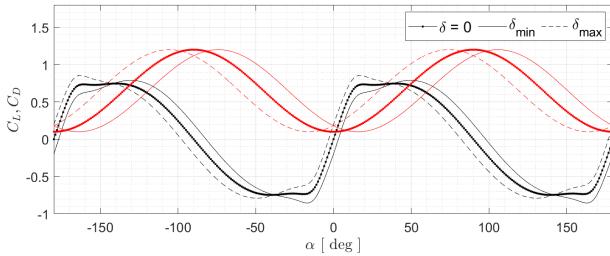


Figure 3: Angle of attack influence on lift coefficient (in black) and on drag coefficient (in red). Adapted from Chiappinelli (2018).

Additionally, although aerodynamic forces and moments have a higher dependence on the angle of attack, their values also depend on other variables. The model of these contributions was adapted from a small flying wing model Carlos and Parreira (2019) and are assumed as approximations for this work tail-sitter to add realism to the aerodynamic model:

$$\mathbf{F}_w = \frac{1}{2} \rho V_a^2 S \begin{bmatrix} 0 \\ C_{Y_p} \beta + \frac{b_w}{2V_a} (C_{Y_p} p + C_{Y_r} r) \\ \frac{c_w}{2V_a} (C_{L_\alpha} \dot{\alpha} + C_{L_q} q) \end{bmatrix} \quad (17)$$

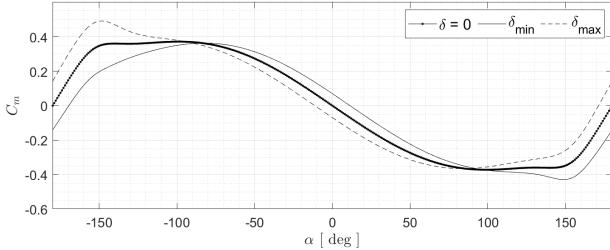


Figure 4: Angle of attack influence on pitching moment coefficient. Adapted from Chiappinelli (2018).

$$\mathbf{M}_w = \frac{1}{2} \rho V_a^2 S \bar{c} \begin{bmatrix} C_{l_\beta} \beta + \frac{b_w}{2V_a} (C_{l_p} p + C_{l_r} r) \\ \frac{c_w}{2V_a} (C_{m_\alpha} \dot{\alpha} + C_{m_q} q) \\ C_{n_\beta} \beta + \frac{b_w}{2V_a} (C_{n_p} p + C_{n_r} r) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Finally, since the aerodynamic center of the segments is not the same as the center of gravity CG of the aircraft, the segment's aerodynamic forces $\mathbf{F}_i = [L_i, 0, D_i]^T$ and moments $\mathbf{M}_i = [0, m_i, 0]^T$ have to be translated to the CG. Note that, all the aerodynamics forces are calculated in the wind frame \mathbb{F}_W . After summing these terms to the full wing aerodynamics contributions, the resulting aerodynamic force has to be rotated to the body frame \mathbb{F}_B by applying the rotation matrix $\mathbf{R}_a(\alpha, \beta)$.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_a &= \mathbf{R}_a \left(\sum \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_w \right) \\ \mathbf{M}_a &= \sum (\mathbf{M}_i + \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i) + \mathbf{M}_w \end{aligned} \quad (19)$$

3.6 Structural Segments Aerodynamics

The structural parts are modeled as rod segments that create drag forces. The propellers' guard are modeled as a circular rods and the landing gears are modeled as two straight rods each. The absolute value of the drag force produced can be modeled by:

$$D_j = \frac{1}{2} \rho V_{a,j}^2 l_j d_j C_{D_j}(Re) \quad (20)$$

Each structural segment j has a length l_j , a diameter d_j , a local air velocity vector $v_{a,j}$ evaluated through (5) and a specific drag coefficient C_{D_j} which is function of the Reynolds number Re . The propeller's guard length is equal to its perimeter.

The drag forces D_j have the same direction of the local air velocity. Multiplying them by the local air velocity unit vector in the body frame \mathbb{F}_B , all segment forces are represented in the same coordinate frame and can be translated to the center of gravity and summed as following:

$$\mathbf{F}_r = \sum D_j \mathbf{u}_j, \quad \mathbf{M}_r = \sum \mathbf{r}_j \times D_j \mathbf{u}_j \quad (21)$$

3.7 Ground Contact Dynamics

To model the contact forces, a spring-damper analogy is used in four strategic selected exterior points, located in the lower and outer parts of the lateral structures, to detect the contact with the ground. Considering the inertial frame \mathbb{F}_I , the spring term acts on the vertical z_I axis proportional to the displacement $d_k = -z_{I,k}$ of the point k penetrating the ground. On the other hand, the damper term is proportional to the point's inertial velocity $v_{I,k}$ and can act on the three axis directions

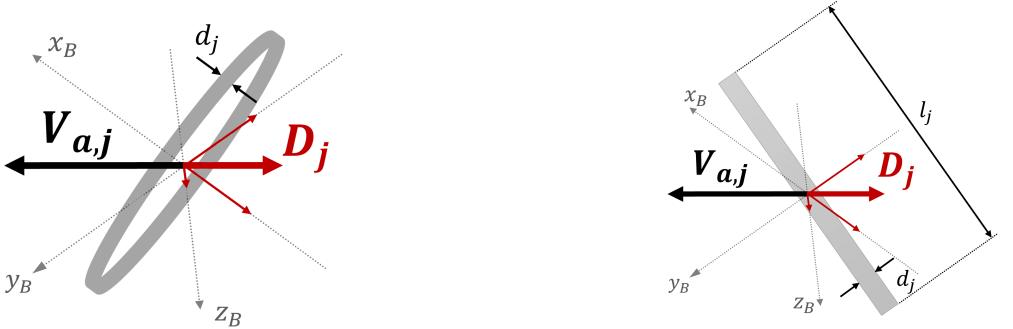


Figure 5: Rod segments in a wind field $V_{a,j}$ producing a drag force D_j . Propeller guard segment on the left and landing gear segment on the right.

depending on its velocity vector direction. This velocity is given by:

$$\mathbf{v}_{I,k} = \mathbf{R}(\mathbf{q})(\mathbf{v}_B + \boldsymbol{\omega}_B \times \mathbf{r}_k) \quad (22)$$

where \mathbf{r}_k is the point's location in the body frame \mathbb{F}_B . That said, the contact force $\mathbf{F}_{I,k}$ produced at each respective point location is modeled as:

$$\mathbf{F}_{I,k} = [0, 0, -m k_p d_k]^T - m k_v \mathbf{v}_{I,k} \quad (23)$$

In this model, $k_p = 400$ [$1/s^2$] and $k_v = 3.6$ [$1/s$] provide a realistic stopping time when the aircraft reaches the ground. Note that, as a ground contact force, it should only appear when d_k is lower than zero. Finally, the inertial forces are then translated into the body frame \mathbb{F}_B and summed to generate the total contact force \mathbf{F}_c and contact moment \mathbf{M}_c :

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_c &= \sum (\mathbf{R}(\mathbf{q})^T \mathbf{F}_{I,k}) \\ \mathbf{M}_c &= \sum (\mathbf{r}_k \times \mathbf{R}(\mathbf{q})^T \mathbf{F}_{I,k}) \end{aligned} \quad (24)$$

4 Model Characterization

The nonlinear system presented in the previous section can be described by the following dynamic system equation:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{D}) \quad (25)$$

where, \mathbf{X} is the actual full state vector, \mathbf{U} is the input vector, and \mathbf{D} is the disturbances vector:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [u, v, w, p, q, r, p_N, p_E, p_D, q_0, q_1, q_2, q_3]^T \\ \mathbf{U} &= [\delta_l, \delta_r, \tau_l, \tau_r]^T \\ \mathbf{D} &= [w_N, w_E, w_D]^T \end{aligned} \quad (26)$$

The aim of this section is to linearize and characterize the dynamics of the tail-sitter nonlinear model, so that linear control techniques can be applied. To do so, first, a trim method based on cost function minimization was used to trim the aircraft and determine the flight envelope. The aircraft is capable to flight in a high range of attitude angles, however its trim is not possible for transition conditions such as the ones necessary to change between vertical and horizontal flight. Therefore, the flight envelope is defined for these two flight conditions. In vertical flight, $\theta = 90^\circ$, the system was able to trim between -3 and 3 m/s. In horizontal level flight, the system was able to trim between 8 and 11 m/s.

For analysis and control design purposes, three operating points were chosen within the flight envelope. For vertical flight, it was considered hover flight, i.e. $u_0 = 0$ m/s. For transition, it was considered vertical flight with a climb velocity of $u_0 = 1$ m/s. For the horizontal flight, it was considered a level flight at $u_0 = 9$ m/s. The system was linearized around these three operating points based on a small disturbance method implemented about the points of interest, resulting in the following linear system form:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{AX} + \mathbf{BU} \quad (27)$$

To apply this method of the input disturbances, first the actuators variables were translated to the conventional representation presented in (1), and then a particular attention was given to the attitude states. Since a linear increase in a quaternion state does not represent a linear deviation in space, two coordinate transformations need to be employed. First, the equilibrium quaternion states are converted to the Euler equilibrium angles, and the specific perturbation, in radians, is applied. Then, the perturbed Euler states are back converted to quaternion representation, and the state derivatives are obtained. Additionally, note that the attitude state derivatives resulting from the system dynamics are also in a quaternion form. However, in order to obtain a linearized set of Euler angles in A and B matrices, the quaternion derivatives need to be converted to Euler angles derivatives. These conversions are explained in Sola (2017).

The benefit of Euler angles is that the resulting mathematical model makes easy to decouple the longitudinal from the lateral dynamics since each angle only describes movement on a single plane. Once this thesis is focused on the development of a longitudinal controller, and the models decoupling is feasible, only the longitudinal states and input variables are considered:

$$\mathbf{X}_{lon} = [u, w, q, \theta, h]^T, \quad \mathbf{U}_{lon} = [\delta_E, \delta_T]^T \quad (28)$$

where $h = -p_D$ represents the altitude. The longitudinal dynamic and input matrices for each operating point linear system are then presented. The hover, transition and level operating points are denoted as subscript H , X , L , respectively.

$$\mathbf{A}_H = \begin{bmatrix} -0.401 & 0 & 0 & 0.005 & 0.001 \\ 0 & -315.1 & -6.349 & -9.799 & 0 \\ 0 & -6.928 & 0.134 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1.000 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_H = \begin{bmatrix} 0 & 21.21 \\ -1.286 & 0 \\ -22.29 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{A}_X = \begin{bmatrix} -0.535 & 0 & 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & -16.78 & 0.606 & -9.799 & 0 \\ 0 & -10.56 & -2.083 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1.000 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_X = \begin{bmatrix} 0 & 21.25 \\ -1.367 & 0 \\ -23.69 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{A}_L = \begin{bmatrix} -1.167 & 2.211 & -1.161 & -9.657 & 0.001 \\ -0.735 & -6.916 & 6.529 & -1.666 & -0.001 \\ 6.266 & -41.24 & -20.79 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.169 & 0.986 & 0 & -9.132 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_L = \begin{bmatrix} 1.738 & 14.96 \\ -4.978 & -2.872 \\ -111.8 & 10.71 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

5 Flight Control Design

The focus of this work is the development of the longitudinal control, therefore the lateral motion is assumed to be non-existent, which constitutes a reasonable approximation of an additional lateral stabilization.

To design a full pitch angle range controller, i.e., which included vertical, transitions and horizontal flight, a gain scheduling control methodology was implemented. For each flight mode a Linear Quadratic Regulator (LQR) to control the aircraft is used Anderson and Moore (1989). To change the flight mode, which select the corresponding LQR gains, a supervisory controller is implemented Kriel (2008).

The block diagram of the controller is shown in Fig. 6 and each block is explained in the following subsections.

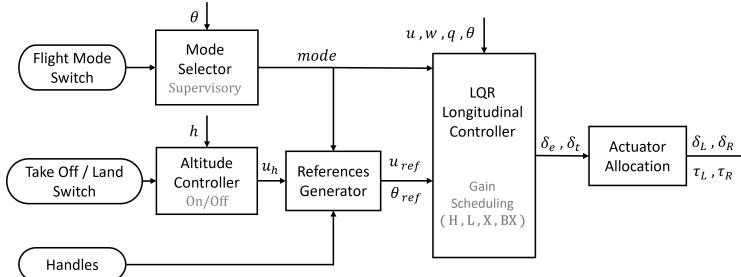


Figure 6: Controller Structure.

In these sections, u_H , u_L , θ_H , θ_L represent the trim values of velocity and pitch angle obtained for hover and level flight at 9 m/s, respectively.

5.1 Controller Inputs

This controller is designed to be operated with four different inputs: two switches and two handles. The switches have two positions indicated as position 0 and 1. The Flight Mode Switch indicate the desired flight mode: 0 to vertical flight (**H**: Hover) and 1 to horizontal flight (**L**: Level). The Take-Off/Land Switch activate or inactivate the altitude controller in order to perform autonomous take-off (position 1) or landing (position 0). Both switches must be initialized at position 0, which means "vertical flight" and "landing mode", then the Take-Off/Land Switch must be changed to position 1 to take-off to a specific altitude. When the landing is desired, the aircraft must be at "vertical flight" and the Take-Off/Land Switch must be switched back to position 0.

The handles can vary between -1 and 1 and are processed in the References Generator block to enable some variations in each flight mode around its operating point, see Fig.7.

5.2 Mode Selector

This block detects when there is a variation in the desired mode and outputs the corresponding transition until its specific ending condition is achieved. If switch changes from **H** to **L**, the Mode Selector outputs **X**: Transition until $\theta < \theta_L$. If switch changes from **L** to **H**, the Mode Selector outputs **BX**: Back Transition until $\theta > \theta_H$.

	Handle 1	Handle 2
Vertical Flight Mode	 Climb and Descend (u_{ref})	 Forward and Backward (θ_{ref})
Horizontal Flight Mode	 Climb and Descend (θ_{ref})	 Faster and Slower (u_{ref})

Figure 7: Handles inputs explanation.

5.3 References Generator

Depending on the flight mode printed by the previous block, this module manages the controller inputs in different ways in order to output the reference states u_{ref} and θ_{ref} that follow to the LQR controller.

Hover:

$$\begin{aligned} u_{ref} &= 3 \times \text{handle}_2 \\ \theta_{ref} &= \theta_H - 0.436 \times \text{handle}_1 \end{aligned} \quad (32)$$

Level:

$$\begin{aligned} u_{ref} &= u_L + 1 \times \text{handle}_1 \\ \theta_{ref} &= \theta_L + \frac{\theta_H - \theta_L}{2} \times \text{handle}_2 \end{aligned} \quad (33)$$

Transition:

$$\begin{aligned} u_{ref} &= u_H + \frac{u_L - u_H}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{T} \right) \\ \theta_{ref} &= \theta_L - \frac{\theta_L - \theta_H}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi t}{T} \right) \end{aligned} \quad (34)$$

Back Transition:

$$\begin{aligned} u_{ref} &= u_L \\ \theta_{ref} &= \theta_H \end{aligned} \quad (35)$$

When the Take-Off/Land Switch is used and the altitude controller is activated, u_{ref} is bypassed by the u_h from the Altitude Controller block, and just the θ_{ref} , from the Hover references equations, is used to guarantee stability.

5.4 Altitude Controller

The altitude tracking of $h_{ref} = 1$ m for take-off or $h_{ref} = 0.2$ m for landing is achieved by generating the longitudinal reference velocity u_h from the altitude error signal h_{error} . In order to guarantee null steady-state error with no overshooting, a PID (Proportional Integral Differential) classic controller was used Azinheira (2020), see Fig. 8. The proportional, integral and derivative gains used to obtain a suitable response were $K_{ph} = 1 \text{ s}^{-1}$, $K_{ih} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ and $K_{dh} = 2 \text{ s}^{-1}$.

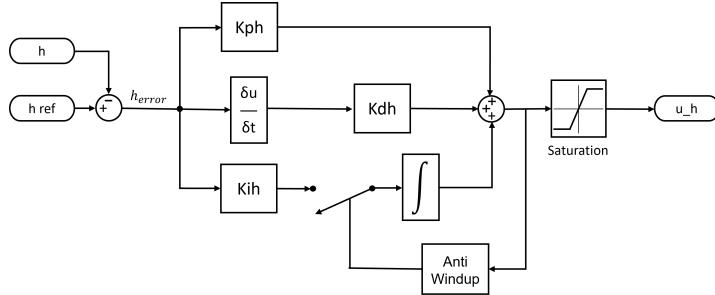


Figure 8: Altitude PID Controller Diagram.

With the possibility of higher initial altitude errors, specially when the landing is commanded, the actuators will saturate and the aircraft will take long periods of time to reach the reference altitude. This will cause the integrator to windup and significantly deteriorate the closed-loop performance by creating excessive overshooting and long settling time which may cause the instability of the system. In order to avoid this behaviour, the controller integral term is kept constant during periods while the control action is saturated Visioli (2006). This is implemented using a switch before the integrative action controlled by a saturation flag, as illustrated in Fig. 8. The saturation block limits the reference velocity u_h between -3 and 3 m/s, which are the limits of the vertical flight envelope.

5.5 LQR Controller

The state variables controlled by the LQR controller to stabilize the aircraft are u , w , q and θ . In order to perform the desired maneuvers the controller should be able to follow the u_{ref} and θ_{ref} . However, these variables can not be both tracked at a time as they are not independent in the aircraft dynamics. Since the pitch angle θ is the variable that indicates the actual flight mode, this was chosen to be precisely tracked by integrating the variable error. In control theory Azinheira (2020), this is implemented by adding the an integrative state θ_i . The velocity u will be controlled using the servomechanism method.

Mathematically, the LQR design is performed by minimising a quadratic cost function which is constructed by assigning a certain weighting to each state and input corresponding to their relative importance Slotine and Li (1991). The quadratic cost function is described as followed:

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}] dt \quad (36)$$

where \mathbf{Q} and \mathbf{R} represent the state and input control weighting matrices, respectively:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \text{diag} [Q_u \quad Q_w \quad Q_q \quad Q_\theta \quad Q_{\theta_i}] \\ \mathbf{R} &= \text{diag} [Q_{\delta_E} \quad Q_{\delta_T}] \end{aligned} \quad (37)$$

The first estimation for these weightings coefficients can be given by Bryson's rule:

$$Q_i = \Delta x_{i_{\max}}^{-2}, \quad R_i = \Delta u_{j_{\max}}^{-2} \quad (38)$$

where $\Delta x_{i_{\max}}$ represents the i^{th} state maximum expected deviation from the state equilibrium, and $\Delta u_{j_{\max}}$ represents the j^{th} input maximum expected deviation from the input equilibrium.

Each operating mode has a different operating point and specifications which require distinct weightings. The considered maximum deviations from equilibrium states for each operating mode, applied in Bryson's method, are listed in Tab. 1.

The solution to the cost function minimization takes the form of a linear full state control feedback:

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K} \mathbf{X} \quad (39)$$

Table 1: Maximum state and input deviations.

	u	w	q	θ	θ_i	δ_E	δ_T
H	0.1	1	0.1	0.001	0.0001	0.001	0.01
L	10	1	1	0.01	0.001	0.01	0.01
X	10	10	1	0.01	0.001	0.001	0.01
BX	0.1	10	1	0.01	0.001	0.001	0.01

where K is a $m \times n$ matrix obtain using the *Matlab* command $lqr(A, B, Q, R)$, n is the number of state variables and m is the number of input control variables. The A and B matrices used for the Hover controller are (29), for the Level controller are (31), and for Transition and Back Transition are (30). The complete gain matrices obtained for each operating mode are presented in Tab. 2.

 Table 2: LQR gain matrix K for each operating mode.

	u	w	q	θ	θ_i	
H	δ_E	0.000	0.020	-0.965	-10.10	-1.000
	δ_T	0.087	0.000	-0.000	0.000	0.000
L	δ_E	-0.049	0.188	-0.082	-2.838	-9.853
	δ_T	0.052	-0.096	0.026	1.216	1.709
X	δ_E	0.000	0.118	-0.218	-1.062	-1.000
	δ_T	0.076	0.000	-0.000	-0.000	0.000
BX	δ_E	0.000	0.118	-0.217	-1.062	-1.000
	δ_T	0.116	0.000	-0.000	-0.000	0.000
		K_c		K_p		K_i

Knowing that the velocity u is controlled in servomechanism and that the pitch angle θ is controlled by integrating its error, this implementation is made by dividing the full state gain matrix K in K_c , K_p and K_i , and applying them in the following actuation signal expression:

$$U = K_c(u_{ref} - u) - K_p \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + K_i \int_0^t (\theta_{ref} - \theta) dt \quad (40)$$

The structure of the LQR controller block is illustrated in Fig. 9. Note that, as in the altitude controller, an Anti-Windup mechanism is applied. Because LQR is a linear control technique, this is used to control around an equilibrium operating point. Therefore, the gain matrix K_p is not applied to the actual states, but to their deviations from the equilibrium points w_0 , q_0 and θ_0 , represented by **X0** in Fig. 9. Similarly, the values of U obtained from the sum of the three terms are also deviations from δ_{E0} and δ_{T0} , represented by **U0** in Fig. 9, and so these values must be added to determine the final actuation signal.

The values of the equilibrium states and inputs vectors, **X0** and **U0**, and the gain matrices, K_c , K_p , K_i , change depending on the output of the Mode Selector block as they vary with the actual operating mode. This technique of controlling nonlinear systems with dynamics changing from one operating condition to another is commonly called *Gain Scheduling*. In Fig. 9, the changing vectors and matrices are colored in pink.

Finally, the saturation block is implemented to keep the simulation within the real limits of the aircraft actuators.

5.6 Actuator Allocation

This last module translates the desired conventional control signals δ_E , δ_A , δ_R and δ_T into the real actuator signals, namely the left and right elevons deflections δ_l , δ_r , and the left and right throttle signals τ_l , τ_r , by inverting the equations in (1). Note that, once only longitudinal dynamics are being controlled, δ_A and δ_R are null. Therefore, the left and right signals (both in elevon's deflection and throttle) are always equal.

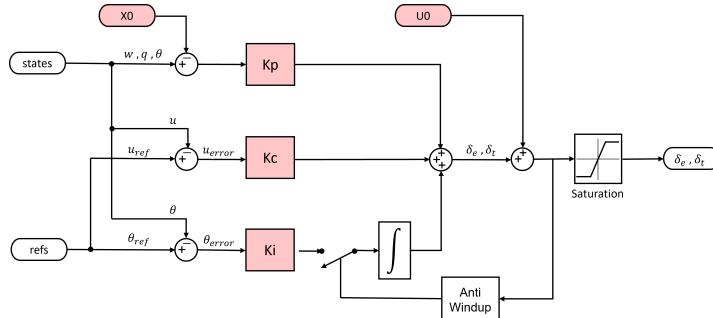


Figure 9: LQR Controller Diagram where pink boxes indicate variable flight conditions and corresponding gain matrices.

6 Conclusions

This work detailed the design and simulation of the flight control system capable of performing autonomous take-off, landing and transition between vertical and aerodynamic flight modes of a particular tail-sitter UAV. To test the designed controller, a minimum VTOL flight mission was successfully completed in simulation. It proved not only that each individual mode controller worked properly but also that the overall controller structure was able to change smoothly between flight phases.

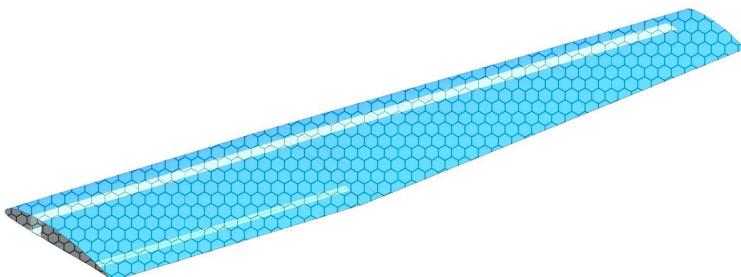
Future work should include the model validation estimation with real world testing. In addition, the selected sensors should also be modelled and included in the aircraft simulator. To add realism to simulations, a wind model could also be added, and controller analysis should be done in the presence of wind disturbances.

References

- Anderson, B. D. O., & Moore, J. B. (1989). *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. Prentice-Hall International, Inc.
- Azinheira, J. (2020, February). *Controlo de Voo*. (Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa)
- Carlos, J., & Parreira, L. (2019). *Modelling, Simulation, Analysis and Stabilization of a Flying Wing* (Unpublished master's thesis). Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa.
- Casau, P. (2011). *Autonomous Transition Flight for a Vertical Take-Off and Landing aircraft* (Master's thesis, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa). doi: 10.1109/CDC.2011.6160819
- Chiappinelli, R. (2018). *Modeling and Control of a Tailsitter UAV* (Master's thesis, McGill University, Montreal, Canada). doi: 10.1109/ICUAS.2018.8453301
- Department of Aerospace Engineering of University of Illinois at Urbana-Champaign. (2022). *UIUC Propeller Data Site*. Retrieved from <https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html> (Accessed: 2022-05-4)
- Eye In The Sky. (2020). *Using High-Altitude Balloons for Decision Support in Wildfire Operations*. Retrieved from <https://adai.pt/eyeintheky/> (Accessed: 2022-03-21)
- Kriel, S. C. (2008). *A Comparison of Control Systems for the Flight Transition of VTOL Unmanned Aerial Vehicles* (Unpublished master's thesis). University of Stellenbosch, Matieland, South Africa.
- Leishman, J. (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge Aerospace Series.
- McCormick, B. W. (1994). *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics*. John Wiley & Sons Inc. doi: 10.1177/09544100972110012
- Moutinho, A., & Azinheira, J. (2018). *Drone-X Simulacao e Controlo de Drones*. Instituto Superior Tecnico.
- Myrand-Lapierre, V., Desbiens, A., Gagnon, E., Wong, F., & Poulin, É. (2010, June). Transitions between level flight and hovering for a fixed-wing mini aerial vehicle. *Proceedings of the 2010 American Control Conference, ACC 2010*. doi: 10.1109/acc.2010.5530875

- Randal W. Beard, T. W. M. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
- Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall International, Inc.
- Sola, J. (2017, November). *Quaternion kinematics for the error-state Kalman filter*.
- Visioli, A. (2006). *Practical PID Control*. Springer. doi: 10.1007/1-84628-586-0

Graphene-Based Epoxy Resin Application on Laminated Composite Materials for Aeronautical Structures



Author: ALFAL/ENGAER 139925-L António Luís Monteiro Oliveira
Master of Science Degree in Military and Aeronautical Sciences – Aeronautical Engineering
Academia da Força Aérea, Sintra

Supervisor: TCOR/ENGAER 129905-A Luís Filipe da Silva Félix
Centro de Investigação da Academia da Força Aérea
Academia da Força Aérea, Sintra

Co-Supervisor: Rui P.F.F. da Silva
MSc in Chemical Engineering
CTO @ Graphenest S.A., Sever do Vouga

Abstract

Graphene is a recent material whose properties allow it to replace or complement other materials in various applications. Given its high rigidity, it opens the door for its use in aeronautical structures, which apart from having their mechanical properties improved, it also allows for weight reduction of such structures.

The main objective of this work is to characterize laminated composite materials made of three different matrices, in order to evaluate the impact that graphene has on the mechanical properties of laminates. The implementation of graphene in aeronautical structures is also studied, specifically, in the design of a wing structure for a class I unmanned aerial vehicle (< 25 kg).

Initially, tensile and bending tests were carried out with specimens manufactured with three different matrices: the matrix used at the *Centro de Investigação da Academia da Força Aérea*; the graphene-based matrix produced by Graphenest, S.A.; and the base matrix used in the production of the previous one, but without graphene. Tests were carried out with bidirectional and unidirectional carbon fibers until material failure occurred. Improvements of 6.2% in the modulus of elasticity between the graphene matrix and the first one were obtained.

Finally, the obtained properties were implemented on the wing design, using finite element analysis. Linear static and linear buckling analyses were performed, and decreases of 0.6% to 6.2% in stress and 6.1% in displacement were obtained, when comparing the graphene-based matrix with the first one.

Keywords: graphene, laminated composite materials, experimental testing, finite element, unmanned aerial vehicle.

1 Introduction

1.1 Motivation and Topic Overview

With less than two decades of being discovered, graphene is a material that can provide great properties enhancements in several fields of science and engineering. Its excellent electric and thermal conductive properties, as well as mechanical properties, are some examples that can be highlighted. Furthermore, it is the strongest material, making it a hundred to three hundred times stronger than most of the common steels. The Graphene Council (n.d.) states that combining graphene with other materials to form new hybrid ones has great benefits.

Graphene is a carbon-based material arranged in a two-dimensional honeycomb lattice (hexagonal) as can be seen in Figure 1. Its basic form naturally derives from graphite's delamination, and it consists of a thickness of one or a few several layers, which means a nanoscale dimension. Monolayer graphene represents one layer, and if more are stacked one obtains few-layer graphene for two to five layers. From six to ten layers one has multilayer graphene, and for more than ten layers it is called graphene nanoplatelets (Kumar, Kumar, Lee, & Park, 2021).

Considering its properties, graphene has great potential for application on aircraft structures. Nonetheless, there are still challenges to overcome before graphene can become a go-to solution. Papageorgiou, Kinloch, and Young (2017) allege

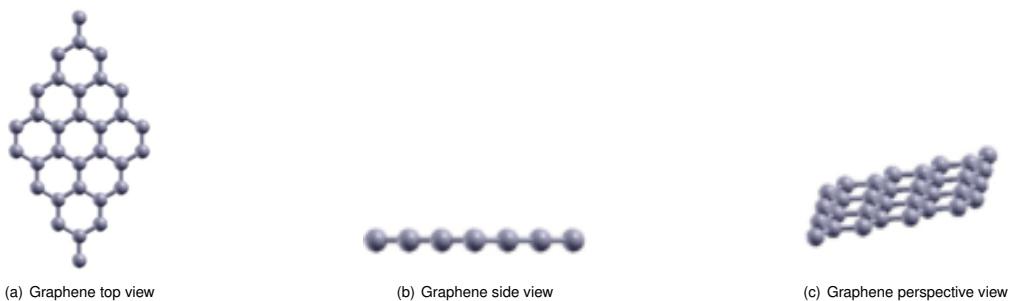


Figure 1: Graphene layer views. Retrieved from ISO/TS 80004-13:2017 (2017).

that high-quality and well-defined graphene production on a large scale is still a difficult task to perform. Besides that, they also state the challenge to obtain graphene's great properties while producing adequate dispersions. Graphene can be used in different forms. In this work, graphene is manufactured and incorporated in an epoxy matrix, HexaMatrix by Graphenest, S.A., a Portuguese graphene-based solutions provider.

In order to study the effect of incorporating graphene on the composite matrix, extensive experimental work will be performed. This study will determine the stress values and mechanical properties of several specimens subjected to tensile and flexural tests. In order to compare with conventional composites, HexaMatrix will be compared with SR8200, which is the epoxy matrix currently used in the *Centro de Investigação da Academia da Força Aérea* (CIAFA), and with HexaMatrix neat resin (without graphene). All specimens will be manufactured with carbon fibers (CF) used in CIAFA by hand layup.

Once the mechanical properties have been investigated, a comparative study will be conducted to determine the impact of different resins on several aircraft structures. To achieve this goal, the wing structure and its main spar from Alves et al. (2021) Class I electric vertical take-off and landing (eVTOL) unmanned aerial vehicle (UAV), with a maximum take-off weight of 25 kg, will be designed using SR8200 and HexaMatrix resins.

1.2 Objectives

The main goal of this report is to evaluate the impact of graphene-based resin incorporation in the matrix of the laminated composite with carbon fibers. The study will have two main purposes:

- Evaluate the mechanical properties of laminated carbon composite specimens:
 - Build specimens containing three different resins by the hand layup method. SR8200 (currently in use in CIAFA), HexaMatrix neat resin, and HexaMatrix (with graphene);
 - Perform tensile and flexural tests using ISO standards;
 - Analyse the obtained results and conclude the final approximate mechanical properties of each laminated type;
 - Infer on the improvement of the mechanical properties due to the addition of graphene on the epoxy matrix.
- Study the impact of graphene on aircraft structure design:
 - Structural design of a UAV Class I main spar and wing, using the three resins;
 - Comparison of results and discussion of the impact graphene had on the structures.

The development of this study will be aided by some software. Either the design and the finite element analysis from the computational design of the wing will be held on Siemens NX. While the analysis of data and further calculations will be made in Excel spreadsheets.

2 Fundamental Concepts and State-of-the-Art

2.1 Graphene, a New Material

Graphene was first unambiguously produced and identified in 2004, by the group of Andre Geim and Konstantin Novoselov, though they credited Hanns-Peter Boehm and his co-workers for the experimental discovery of graphene in 1962, where Boehm introduced for the first time the term graphene in 1986 (Geim, 2012).

Professor Andre Geim and Konstantin Novoselov, at the time researchers at the University of Manchester, in the United Kingdom, applied a simple graphite peeling method. This was all achieved by just using simple adhesive tape, commonly known as the "Scotch Tape" technique, which is a micromechanical cleavage process. This method had to be applied repeatedly to get one atom thick layers and finally obtain isolated graphene ("This Month in Physics History: October 22, 2004: Discovery of Graphene", 2009). With this discovery, six years later, they were awarded the Nobel Prize in the field of physics.

There are several methods to synthesize graphene that can be divided into two groups. The first is top-down where macro components, such as graphite, can be reduced into smaller elements. The second is bottom-up where smaller

elements are built up until graphene is obtained. While the first can cost-effectively make greater amounts of graphene, the second group can only produce smaller quantities of higher-quality graphene with higher costs (Zhang, Fraser, Ye, Merle, & Barralet, 2019). Examples of techniques from the first group are mechanical exfoliation (used by Geim and Novoselov in the discovery of the material), liquid-phase exfoliation, and chemical oxidation-reduction. From the second group, one can highlight the chemical vapor deposition and the epitaxial growth.

In its structure, monolayer graphene is composed of just one single layer of carbon atoms, where each of them connects to three others through *sigma* bonds, which are the strongest of all covalent bonds. Several techniques are used for characterizing graphene and identifying functional groups and/or morphological modifications on the graphene sheets, where one can highlight the Raman spectroscopy and both transmission electron and atomic force microscopies as some of them (Fraga, Sobrinho, Carvalho, & Ghislandi, 2020).

Graphene's exceptional mechanical properties are due to the structure bonds' stability which withstands in-plane deformations (Papageorgiou et al., 2017). Stiffness and strength depend on several factors, such as if it is mono, few, or multilayer, its lateral size, crystallinity, and oxide reduction level. According to Lee, Wei, Kysar, and Hone (2008), graphene's elastic response to the uniaxial extension test led to a Young's modulus value (E) of 1.0 ± 0.1 TPa, and an intrinsic breaking strength value (σ_{int}) of 130 ± 10 GPa at a strain (ε_{int}) of 0.25.

Regarding graphene applications in aeronautical structures, it can be applied in two different ways. The first comprises the addition of graphene to the epoxy resin to improve the resin's mechanical properties. The second is graphene-reinforced carbon fibers, where strength and stiffness can both be enhanced compared to traditional carbon fibers (Rafiee, Nitzsche, Laliberte, Thibault, & Labrosse, 2019). In both methods, graphene allows the decrease of the structural weight.

Adding graphene to structures could also enable electrical signals to propagate through it, leading to the concept of smart structures. These could carry data signals while stress and strain could be measured during the flight due to this multifunctional properties of graphene. Besides graphene being incorporated in structural materials, it can also be present as an aircraft paint coating. Due to graphene's electrical properties, special coatings have been developed to bridge radar detection, decreasing aircraft radar cross-section and making it more stealth to enemy radars. They can reduce drag, be used in de-icing systems and provide lightning strike protection (Aerospace Technology Institute & The University of Manchester, 2018).

2.2 Laminated Composite Materials

A composite material comprises two or more materials to create one new material (Dorworth, Gardiner, & Mellema, 2009). Laminated composites are fiber reinforcements bonded together by a matrix material to form a stack of plies. The three most common types of fibers used on laminated composites are carbon, glass, and aramid fibers. Table 1 shows a summary of the material that will be used to manufacture the laminated composite specimens.

Table 1: Composites for the production of laminates.

Fibers	Bidirectional Carbon Fabric, 3K, High Strength (HS), Plain Weave, 160 g/m ² Unidirectional Carbon Tape, 6K, High Resistance (HR), 215 g/m ²
Resin 1	Sicomin SR 8200 + Hardener: SD 7206
Resin 2	Graphenest pristine HexaMatrix (no graphene)
Resin 3	Graphenest HexaMatrix

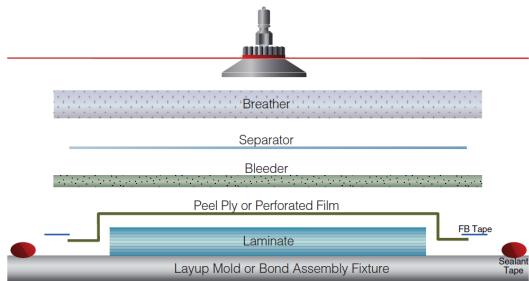
Several methods and techniques can be employed to manufacture laminated composites. Wet layup molding is the method chosen for the preparation of the specimens. Usually, the resin is impregnated into the fibers using a roller or a squeegee (see Figure 2(a)). The use of vacuum bagging enhances the quality of the final product by aiding the impregnation process and removing the epoxy resin excess from the produced composite laminates (see Figure 2(b)).

Through thorough testing based on ISO standards, specimens will be subjected to tensile and bending tests carried out at the laboratory in order to determine their mechanical properties.

For tensile specimens to be produced and tested, bidirectional and unidirectional carbon fiber specimens followed the ISO/DIS 527-4 (2020a) and ISO/DIS 527-5 (2020b) standards, respectively. Adding that glass fiber tabs will be bonded to the



(a) Hand layup - Wet layup



(b) Vacuum bagging

Figure 2: Production method. Retrieved from Dorworth et al. (2009).

specimen's ends, on both sides, to prevent specimens from breaking due to the pressure of the clamps. Flexural specimens will adopt ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011 (2011) for both types of carbon fibers used. Every standard recommends a minimum of five specimens per test condition. In order to obtain higher precision, a minimum of ten specimens per test condition are to be produced. Figure 3 presents the tensile test, and its respective tensile specimen, and the three-point flexural test.

Regarding the tensile test, through eq. (1) one can calculate de Young's modulus, where σ is the axial stress and ε is the specimen's strain due to the applied stress. Both can be obtained from eqs. (2) and (3), respectively, where F is the applied force, A is the specimen's cross-section area, and L_0 is the specimen's gauge length. Δ represents the variables variation due to the applied load.

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

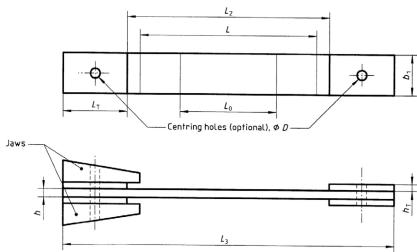
$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (3)$$

Concerning the flexural test, through eq. (4) one can calculate the flexural modulus (E_f), through the specimen's dimensions and the deflections (s) for flexural strains $\varepsilon_f = 0.0005$ and $\varepsilon_f = 0.0025$, and the corresponding applied force, directly obtained from the test results. L represents the specimen's test span, b_1 its width, and h the thickness. Flexural stress (σ_f) and flexural strain (ε_f) can be obtained from eqs. (5) and (6), respectively.

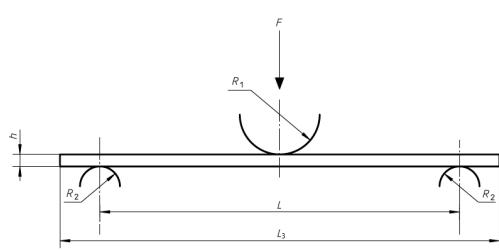
$$E_f = \frac{L^3}{4b_1h^3} \frac{\Delta F}{\Delta s} \quad (4)$$

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2b_1h^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad (6)$$



(a) Tension test specimen. Retrieved from ISO/DIS 527-4.



(b) Three-point flexural test. Retrieved from ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011.

Figure 3: Experimental tests diagrams.

2.3 Structural Analysis

Solid materials' mechanical properties follow stress-strain relations, which are called constitutive equations or constitutive relations. These equations characterize the applied load reaction of an individual material (Reddy, 2004). Furthermore, these equations are only applied to the material's elastic regime.

All the materials to be used in this work are orthotropic. Therefore, its constitutive relation is given by eq. (7), where E , G , and ν , included in the compliance matrix, are the Young's modulus, shear modulus, and the Poisson's ratio, respectively, for the direction/plane denoted by their subscript. Due to the symmetry in the compliance matrix, eq. (7) can be simplified by replacing the following entries from eq. (8) with their equal. Thereby, an orthotropic material only has nine independent components, which are the ones given by eq. (9).

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{cccccc} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1}, \frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1}, \frac{\nu_{32}}{E_3} = \frac{\nu_{23}}{E_2} \quad (8)$$

$$E_1, E_2, E_3, G_{23}, G_{13}, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23} \quad (9)$$

In order to simplify the wing model analysis, instead of producing the structure and performing tests on it, one can previously design it using Computer-Aided Design (CAD) software and then simulate the applied loads to obtain the results. The Finite Element Method (FEM) is one of the numerical simulation methods that allow one to obtain approximate solutions of the real structure's response.

For the case of laminates, shell elements, which represent the 2D surface of the structure were chosen for the structure's mesh. Meshes are mainly composed of quadrilateral elements since greater accuracy can be achieved, while triangular elements have low usage.

Two different analyses will be performed on the UAV main spar and wing structures. The first will be a linear static analysis and the second a linear buckling analysis.

Linear Static Analysis In order to obtain stress and strain values due to an applied load, one can perform a linear static analysis. This assumes the geometric linearity hypothesis, where obtained results are linearly proportional to the applied loads. One can also obtain from this analysis the nodal displacements and rotations, and the constraint reaction's force and moment. A linear analysis is performed since only the elastic range of the materials is analysed and deformation is assumed to be small.

Linear Buckling Analysis This type of analysis is associated with compressive loads that lead to instability phenomena and consequential deformations. Linear buckling analysis does not assume a geometric linearity hypothesis. It allows to obtain the relative buckling loads. This parameter can be multiplied by all applied loads in the structure to obtain the buckling loads that lead to the structure's instability. For a relative buckling load lower than one, the structure will suffer from buckling effects. Different buckling deflection patterns can be obtained. This corresponds to the buckling modes of the structure, which are the eigenfunctions. Each buckling mode is induced by a specific buckling load, which are the eigenvalues of the problem (Simitses & Hodges, 2005). The lowest buckling load, which leads to the first buckling mode is usually called the critical buckling load.

3 Mechanical Properties - Specimen Experimental Tests

3.1 Preliminary Mass Calculations

To estimate the necessary resin, hardener and fiber mass quantities for the experimental part, initial calculations had to be performed based on theoretical equations from the laminates' rule of mixtures.

Carbon fiber mass density (ρ) was considered to be $1.80 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ defined by (Toray Composite Materials America, 2018) for the T700G carbon fiber, a similar material to the one used in the experiment. The epoxy resin and hardener densities are listed in Table 2. From now on, each matrix will be referred to as Resin 1, 2, and 3, as presented in Table

1. The fiber and matrix volume ratios were 60/40%. As for the matrix mixture between the resin and the corresponding hardener, both weight and volume ratios are also presented in the Table 2.

Table 2: Epoxy resins and hardener's densities and mixing ratios.

	Resin Density [kg/m ³]	Hardener Density [kg/m ³]	Mix Weight Ratio	Mix Volume Ratio
Resin 1	1175 ± 10	1040 ± 10	100 g Res. - 37 g Hard.	100 mL Res. - 42 mL Hard.
Resin 2	1158	942	100 g Res. - 22 g Hard.	100 mL Res. - 27 mL Hard.
Resin 3	1158	942	100 g Res. - 22 g Hard.	100 mL Res. - 27 mL Hard.

Specimen sizes were extracted from the ISO standards defined in Section 2.2, and the panels to be produced were designed in accordance with the specimens' safety distances between each other and the panel's margins. The final total masses of fibers and epoxy resin and hardener are presented in Table 3.

Table 3: Theoretical total fiber, resin, and hardener mass.

Total fiber mass [g]	Total resin mass [g]	Total hardener mass [g]
Bidirectional Fibers	332.89	123.75
Unidirectional Fibers	192.57	42.30
Glass Fibers	192.57	42.30

3.2 Laminate Specimen Manufacturing Process

During the production of the laminated panels, a matrix excess is necessary to compensate for its waste and to guarantee a good impregnation of the fibers. A CIAFA's experimental technique is to increase the mass of fiber by 10%. Then the obtained value will be multiplied by 1.5 to obtain the total matrix mass, leading to higher values of resin and hardener than the ones obtained in Table 3.

ISO standards mentioned in Section 2.2 requires the specimens for both flexural and bidirectional tensile to be 2 mm thick and the unidirectional tensile specimen to be 1 mm thick. After performing some preliminary testing, it was determined that ten plies were necessary to get a 2 mm bidirectional carbon laminate. As for the unidirectional carbon laminate, eight and four plies were required for the construction of flexural and tensile panels, respectively.

Epoxy matrix was applied to the dry fibers via the hand layup method (see Figure 4(a)). In the end, several films were added on top of the last ply, according to Figure 2(b), and the vacuum bag was closed for the curing process (see Figure 4(b)). After this process ends, post-curing was performed according to each matrix datasheet. Resin 1 post-cure process lasted for 10 days at room temperature (RT) of 23 °C, while resins 2 and 3 took 24 hours at 40 °C. Last, panels had to be cut on a Computer Numerical Control (CNC) Milling Machine in order to get each individual specimen (see Figure 4(c)). These were then sanded so that they were ready to be measured and then tested (see Figure 4(d)).

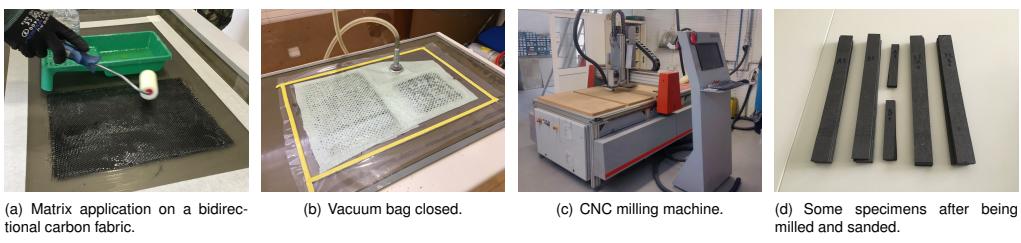


Figure 4: Laminates production phases.

3.3 Testing

First of all, each specimen's length, width, thickness, and weight were measured to obtain their fiber/matrix volume ratios. These ratios were important to compare if the production of the different materials was similar. Otherwise, another variable was being added to the study.

Tensile tests were run on the CIAFA's MTS Systems model 810 tensile testing machine with a 100 kN load cell. The test was configured and executed using the software TestWorks 4. This test was run at a strain rate of 2 mm/min.

It is worth mentioning that all bidirectional specimens broke in the center region (see Figure 5(a)). However, some also broke at the top and/or bottom, near the end tabs. This was due to the specimen's stress decompression after the first breakage. As for the unidirectional specimens, because transversal fibers are being connected with very thin glass fiber, these had a more aggressive breaking. Some of them totally shattered across a region. Others had groups of fibers breaking in different regions (see Figure 5(b)).

For flexural testing was estimated that a point load of magnitude of approximately 400 N was sufficient to break the specimen. Since the MTS 810 at CIAFA's facilities is equipped with a 100 kN load cell, sensitivity would have been very low, leading to an increased difficulty to obtain precise stress and strain values at break. Therefore, the flexural testing was performed at the IST's Mechanical Engineering Department, in Lisbon, using an Instron model 5566 testing equipment with a 500N load cell. A rate of displacement of 5 mm/min was set and the displacement and the applied force were obtained with a frequency of 50Hz.

In resemblance to the tensile test, the bidirectional specimens also broke at the center (see Figure 5(c)). As for the unidirectional, almost none had completely been broken into two pieces. The majority only broke several outer plies (see Figure 5(d)).

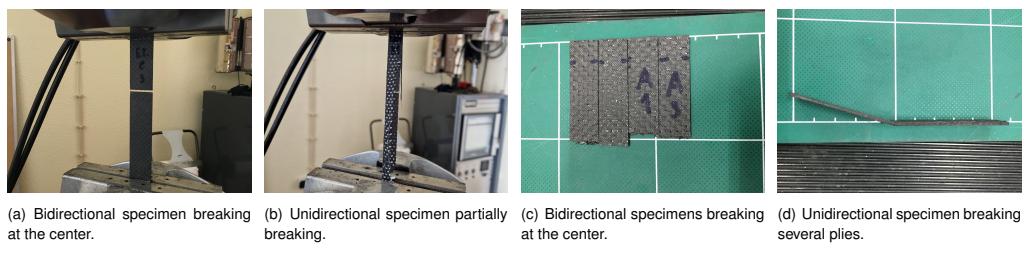


Figure 5: Specimens after being tested.

3.4 Results Analysis and Discussion

During the production and testing phases, several issues occurred: some panels had a low matrix volume ratio; the CNC milling machine cut some specimens out of the determined limits; and also, one end tab slipped out during the tensile test. All of these issues led to outliers. In order to eliminate undetected problems, an interquartile range method was applied to the mechanical properties, and to the obtained stress and strain values.

This interquartile range method seeks to calculate lower (LBound) and upper (UBound) boundaries for the specimens' results through eqs. (10) and (11). Primarily, the first (Q1) and third (Q3) quartiles were obtained for each test condition sample. Then, the interquartile range (IQR), which is the difference between these two values, was calculated.

$$L\text{Bound} = Q1 - 1.5 \cdot IQR \quad (10) \qquad U\text{Bound} = Q3 + 1.5 \cdot IQR \quad (11)$$

A total of 11 outliers out of the original 57 specimens were excluded from the tensile test, and another 12 were excluded from the flexural test due to these production issues.

According to the classical laminate theory, since the specimen's stacking is equal for each test specimen and all the plies are oriented at zero degrees, the Young's modulus should be the same as the flexural modulus. This statement is independent of the number of plies stacked. Table 4 show the modulus differences between Young's and flexural modulus results for bidirectional and unidirectional carbon fibers. The differences between the same modulus for different resins are shown in the last three columns of each table.

Table 4: Differences between Young's and flexural modulus results for bidirectional and unidirectional carbon fibers.

		Resin 1			Resins Differences [%]		
		Resin 1	Resin 2	Resin 3	1 vs 2	2 vs 3	1 vs 3
Bidirectional Carbon Fibers	Young's Modulus [GPa]	38.776	38.746	38.506	-0.1	-0.6	-0.7
	Flexural Modulus [GPa]	35.887	36.918	38.124	2.9	3.3	6.2
	Modulus Difference [%]	-7.4	-4.7	-1.0	-	-	-
Unidirectional Carbon Fibers	Young's Modulus [GPa]	83.664	82.204	82.227	-1.7	0.0	-1.7
	Flexural Modulus [GPa]	87.430	49.677	73.394	-43.2	47.7	-16.0
	Modulus Difference [%]	4.5	-39.6	-10.7	-	-	-

For the following part of this work, the numerical software requires the elastic modulus from each material to be considered as the Young's modulus. Since the test case was a wing structure, the loads applied to these structures are mainly of the flexural type. As such, flexural test loads were used as they were the ones that most closely matches the aerodynamic loads, and the flexural modulus was the one to be considered in the numerical part.

Due to the problems found on unidirectional flexural specimens from resin 2 and 3, an estimation for flexural modulus, thickness, and peak stress was performed following eq. (12). This way, unidirectional flexural modulus resins difference values from Table 4 will now be the same as the bidirectional ones. Due to time constriction, more tests could not be performed on these materials in order to increase available data and results accuracy. Table 5 shows the final results for each resin.

$$\text{Estimated Value for Resin } X = \frac{\text{Bidirectional Resin } X}{\text{Bidirectional Resin 1}} \times \text{Unidirectional Resin 1} \quad (12)$$

Table 5: Final material results to be used in the numerical solution.

	Resin 1		Resin 2		Resin 3	
	Bidirectional	Unidirectional	Bidirectional	Unidirectional	Bidirectional	Unidirectional
Ply Thickness [mm]	0.178	0.246	0.181	0.250*	0.183	0.252*
Mass Density [kg/m³]	1518.7	1515.5	1492.1	1492.1	1493.5	1493.5
Area Density [g/m²]	270.79	372.37	270.66	372.87	272.72	375.77
Young's Modulus [GPa]	E ₁	35.887	87.430	36.918	89.943*	38.124
	E ₂	35.887	-	36.918	-	38.124
Ult. Tens. Streng. [MPa]	UT ₁	664.82	926.54	661.54	921.98*	645.36
	UT ₂	664.82	-	661.54	-	645.36

* Estimated values using eq. (12)

4 UAV Wing Design

4.1 Baseline Design

In this section is addressed the design of a UAV wing using the materials characterized in the previous section. The wing baseline design that will be analysed is the main wing of the conceptual design of an eVTOL Class I UAV (Alves et al., 2021), represented in Figure 6. The UAV conceptual design resulted in a fixed-wing with an inverted V-tail configuration with a maximum take-off weight of 21.7 kg. For take-off and landing, four propeller electric engines are installed in two booms which connect the wing to the V-tail. An additional propeller electric engine is installed at the fuselage back end for fixed-wing flight. Sá (2021) has done the preliminary design of the main wing for this UAV, which is used as the baseline design to study the impact of including graphene in the composite matrix for aeronautical structures.



Figure 6: UAV conceptual design CAD model. Retrieved from Alves et al. (2021).

Figure 7 shows the CAD rendered image of the wing's baseline model design.



(a) Internal structure.

(b) External structure.

Figure 7: Wing's CAD model. Retrieved from Sá (2021).

The main spar has a rectangular cross-section with the dimensions presented in Table 6. To define the spar laminate, the spar's caps and webs were divided into nineteen 100 mm long sections. The spar design achieved by Sá (2021) is presented in Table 7. The base value represents the number of plies, and the exponent the number of sections having that number of plies. Caps were composed of unidirectional carbon fibers composite aligned with the span direction. Webs were composed of bidirectional carbon fibers at a 45° arrangement, where 0° is the span-wise direction. Both tables were retrieved from Sá (2021).

Table 6: Baseline spar dimensions.

Width	40 mm
Root Height	38 mm
Tip Height	20 mm
Span	1900 mm

Table 7: Baseline spar laminate distribution.

	Top Cap	Lower Cap	Webs
	$5^1 / 4^3 / 3^3 / 2^4 / 1^8$	$5^1 / 4^2 / 3^3 / 2^4 / 1^9$	$2^5 / 1^{14}$

Sá (2021) applied a distributed load along the spar's caps equal to the wing load for the ultimate load factor considered.

Concerning the wing, the main spar is at 33.5% of the wing's chord, where the airfoil thickness is maximum. The secondary spar is at 85% of the chord and it has a 750 mm length. Instead of a rectangular cross-section shape, it has an I shape, with a 20 mm cap width. The caps are composed of a unidirectional carbon fiber composite, with a laminate of two plies aligned with the span direction. The web is composed of a sandwich panel made of two bidirectional plies at a 45° arrangement with a core of 3 mm Airex C70.75 foam.

A total of seven ribs give the airfoil shape to the wing. Ribs 1 to 4 are composed of four bidirectional plies at a 45° arrangement with the chord-wise direction, and one unidirectional in the middle, perpendicular to the chord-wise. Ribs 5 to 7 have two bidirectional plies and one unidirectional in between, with the same respective alignment directions as the ribs previously mentioned. The wing tip has the same stacking. Finally, the skin is composed of two bidirectional plies at a 45° arrangement, where 0° is the span-wise direction.

A pressure load, equivalent to the aerodynamic load corresponding to the ultimate load factor, was applied to the wing skin.

4.2 Main Spar Design

The finite element analysis software requires the following material properties, in order to characterize an orthotropic material: mass density; Young's modulus in all three directions; Poisson's ratio in all three directions; and shear modulus in all three directions.

In Chapter 3, it was obtained the Young's modulus and ultimate strength of the 3 resins considered in the study. Therefore, it was necessary to use standard values for carbon fiber composites to fill in the materials' properties required by the software. The properties list was completed with data retrieved from a study done by Silva (2017). Table 8 presents the materials' properties used in the wing design.

Table 8: Material properties data set used in FEM analysis.

	Resin 1		Resin 2		Resin 3		
	Bi-Carbon	Uni-Carbon	Bi-Carbon	Uni-Carbon	Bi-Carbon	Uni-Carbon	Airex + Epoxy
Ply Thickness [mm]	0.178	0.246	0.181	0.250	0.183	0.252	3.000*
Mass Density [kg/m ³]	1518.7	1515.5	1492.1	1492.1	1493.5	1493.5	422.0*
E ₁ [GPa]	35.887	87.430	36.918	89.943	38.124	92.881	0.066*
E ₂ [GPa]	35.887	9.173*	36.918	9.173*	38.124	9.173*	0.066*
E ₃ [GPa]	9.173*	9.173*	9.173*	9.173*	9.173*	9.173*	0.066*
ν_{12}	0.060*	0.262*	0.060*	0.262*	0.060*	0.262*	0.300*
ν_{13}	0.388*	0.262*	0.388*	0.262*	0.388*	0.262*	0.300*
ν_{23}	0.388*	0.396*	0.388*	0.396*	0.388*	0.396*	0.300*
G ₁₂ [GPa]	5.000*	5.000*	5.000*	5.000*	5.000*	5.000*	0.030*
G ₁₃ [GPa]	2.889*	5.000*	2.889*	5.000*	2.889*	5.000*	0.030*
G ₂₃ [GPa]	2.889*	3.470*	2.889*	3.470*	2.889*	3.470*	0.030*
UT ₁ [MPa]	332.41	463.27	330.77	460.99	322.68	449.72	1.00*
UT ₂ [MPa]	332.41	-	330.77	-	322.68	-	1.00*

* Values retrieved from Silva (2017)

The used methodology, either for the main spar analysis or the wing analysis, was to first perform, for both static and buckling analysis, a mesh refinement analysis. Then, after the converged mesh was chosen, results were analysed and verified if they agreed with the production and design safety parameters. If not, structural modifications were performed until a final design was met.

The main spar static analysis found two problems related to stress values in the spar's root corners and at the caps layer drop-offs. The first was stress singularities created due to the spar's fixed constraint that led to infinite stress as the mesh was refined. The second saw an unexpected stress increase on the caps plies decrease transition. Both problems did not affect the stress analysis, in order for it to comply with the materials' stress limits.

Regarding the main spar's results, static analysis proved that Sá's original design fulfilled the design requirements, while the buckling analysis revealed buckling phenomena on the top cap and webs. Thus, it had to be reinforced with more plies, keeping up with the drop-off scheme. A complete ply, from root to tip, was also added due to the difficulty to produce one-ply laminates and the increased probability of buckling to occur. Adding that the webs were replaced with a sandwich panel with a core of 3mm Airex sheet plus two bidirectional outer plies since this was a lighter solution than the original one. Table 9 presents the laminate configuration of the lower and upper cap along the wingspan.

Table 9: Spar's model 2 laminate distribution after buckling analysis.

Top Cap	Lower Cap
7 ³ / 6 ³ / 5 ⁴ / 4 ³ / 3 ³ / 2 ³	6 ¹ / 5 ² / 4 ³ / 3 ⁴ / 2 ⁹

Table 10 presents the final static and buckling analysis results for the three resins used and the corresponding difference between the value and the one from the resin 1 design. It is also presented the displacement relative percentage to the wingspan (2000 mm). Worst principal stresses were extracted to be compared with ultimate strength for failure purposes.

Since it was not possible to implement any failure criteria on the software, this parameter is the most conservative regarding the stacking directions. It does not take into account failure due to shear stress.

Table 10: Final main spar's maximum displacement, stress and relative buckling load results comparison.

	Maximum Displacement			Lower Cap Max. Stress		Back Web Max. Stress		Mode 1	
	Displ. [mm]	Diff. [%]	Wingspan [%]	σ_{WP} [MPa]	Diff. [%]	σ_{WP} [MPa]	Diff. [%]	Relative Buck. Load	Diff. [%]
Resin 1	165.5	-	8.3	311.69	-	157.42	-	1.087	-
Resin 2	158.4	-4.2	7.9	306.89	-1.5	154.47	-1.9	1.154	6.2
Resin 3	152.6	-7.8	7.6	305.17	-2.1	153.10	-2.8	1.193	9.8

4.3 Wing Design

In this section, three main designs were obtained that henceforward will be named initial design, static design, and buckling design. The final design's, buckling design, performance is compared for the 3 matrix systems used in this work. Due to the results of the comparative study, two new designs are considered: first, it is proposed a wing structure configuration using components manufactured with resins 1 and 3; second, using these two resins in the manufacturing of the composite laminates, it is proposed a lighter design while fulfilling all requirements. For future reference, these designs will be named resin mix design and light design, respectively.

Initial Wing Design

As a first approach to the wing design, it was considered to include the spar model obtained in Section 4.2 in the wing baseline design (see Section 4.1). Linear static analysis shows that maximum stress is 41.5% lower than the ultimate design strength value given in Table 8. Buckling occurs in the wing skin as expected. However, the buckling load is 0.239, which means that the skin must be reinforced.

Although the wing structure fulfills all static requirements, the structure is oversized because the main spar's maximum stress is much lower than the allowed values. Therefore, this design is rejected and it is used Sá's wing design as the initial design for the static and buckling analysis. Sá's wing design has been validated for linear static load but it was not designed for buckling load.

Static and Buckling Designs

These designs will consider the final structure design at the end of each analysis. The buckling design will consider data from the static analysis and respective design.

The linear static analysis showed that the baseline design from Sá was in accordance with the requirements. Still, the skin panels close to rib 2 revealed convex deformations on the top skin and concave deformations on the bottom skin. These were then reinforced with plies keeping with the layer drop-off scheme. Stress singularities and discontinuities were once again found, but their results did not affect the structural integrity related to the laminate failure.

The linear buckling analysis showed deformations on the main spar's webs and on the top side skin panel between spars. These were both reinforced with a drop-off scheme until the relative buckling factor was higher than one. The top-side skin panel lay-up scheme is indicated in Table 11. As for the webs from both spars, these were tested with the layer drop-off and with the sandwich foam core, where the first showed to be the most effective and the lightest of both. Spar's caps and ribs were kept unchanged from the baseline design from Sá.

Table 11: Buckling design - lay-up scheme.

Number of Plies	8	7	6	5	4	3	2
y-axis Position [mm]	0 - 100	100 - 500	500 - 750	750 - 1250	1250 - 1500	1500 - 1750	1750 - 2000

Resin Mix and Light Designs

In order to reduce the relative buckling load to 1 while keeping maximum stress lower than the allowed values, the first modification performed was to mix resin 1 and 3 in the same model. To that end, it is identified the components that had

lower stress values with resin 1. It was decided to use resin 3 in the wing structure with the exception of the ribs and the wing tip which will be made of resin 1. This new design is called resin mix design henceforward.

The light design has the resin mixture from the resin mix design, while some plies are removed. The main goal is to reduce the number of plies from parts subjected to buckling because the behavior of the structure to buckling improved with the use of resin 3. Therefore, there is room to get a lighter structure while fulfilling the buckling criteria. The structural components considered in the study were the top skin panel, between the main and secondary spar, and the main spar top cap. There will be a trade-off between the relative buckling load decrease and the increase of the displacement.

An iterative process was performed to obtain a new ply configuration. The best solution achieved had some plies removed from the skin panels. It was not possible to remove material from the main spar top cap. The new configuration for the skin panel between spars laminate zones is presented in Table 12. The structural weight is estimated to reduce 43.3 g. Besides that, the manufacturing cost of the wing is also reduced because it requires less resin and fibers.

Table 12: Light design - lay-up scheme.

Number of Plies	7	6	5	4	3	2
y-axis Position [mm]	0 - 500	500 - 750	750 - 1000	1000 - 1250	1250 - 1500	1500 - 2000

Table 13 presents the main results for the buckling (resin 1, 2, and 3), resin mix, and light designs. The resin mix and light designs comparative values are relative to the buckling design with resin 3 values while buckling design with resin 2 and 3 are compared with the same design with resin 1. The bidirectional ply laminate's maximum stress was achieved for the outer ply from the top side skin panel between spars, close to the main spar root. The unidirectional maximum stress occurred for the adjacent point from the bidirectional maximum stress, corresponding to the unidirectional outermost ply.

Table 13: Final wing's maximum displacement, stress and relative buckling load results comparison.

Model	Maximum Displacement			Bidirectional Max. Stress		Unidirectional Max. Stress		Mode 1	
	Displ. [mm]	Diff. [%]	Wingspan [%]	σ_{WP} [MPa]	Diff. [%]	σ_{WP} [MPa]	Diff. [%]	Relative Buck. Load	Diff. [%]
Resin 1	112.1	-	5.6	-199.85	-	-431.22	-	1.014	-
Resin 2	108.2	-3.5	5.4	-194.88	-2.5	-423.80	-1.7	1.083	6.8
Resin 3	105.3	-6.1	5.3	-191.94	-4.0	-420.78	-2.4	1.126	11.1
Mix	105.3	0.0	5.3	-192.85	0.5	-420.63	-0.0	1.125	-0.1
Light	106.6	1.2	5.3	-190.41	-0.8	-407.95	-3.0	1.054	-6.4

To conclude, the light model is to be chosen as the final UAV wing model. It uses both resins in order to reduce weight and costs. The reduced number of plies from this model also allowed for a considerable weight decrease, considering it was only derived from changing the epoxy matrix, from resin 1 to resin 3, in almost all the structure.

The final wing design is comprised of: main and secondary spars made of resin 3 with the baseline configuration for the caps, and webs being made of four bidirectional plies; a top side skin panel between spars with a monolithic resin 3 laminate of bidirectional carbon fiber plies at 45° with a drop-off scheme as depicted in Table 12; the original ribs from the baseline design made of resin 1.

5 Conclusions

This work aimed to achieve two main objectives. The first was to characterize laminated composite materials made of three distinct matrices, through experimental tensile and flexural tests, in order to evaluate the impact of graphene on the mechanical properties of laminates. The second was to analyse the impact of graphene on the mechanical performance of two aeronautical structures by applying the properties obtained in the first part. The aeronautical structures were subjected to static and buckling analyses and structural modifications were applied to meet the design requirements determined by standards.

Carbon fibers were the only common component in the laminated composite materials. The aim of the comparison study stood around the epoxy matrices which were different. Graphene nanoplatelets at a 2 wt% were incorporated in HexaMatrix

produced by Graphenest S.A.. The other two were neat HexaMatrix and Sicomin SR 8200 with hardener SD 7206, currently used by CIAFA.

The experimental part of the work revealed the importance of composite laminate production on its mechanical properties. The amount of matrix applied to the fibers led to production issues, as was noticed for the unidirectional flexural resin 2 and 3 specimens. The tests results showed that graphene did not affect the specimen's tensile properties, since the results differences between the 3 resins for the two types of fibers were not significant.

As for the flexural modulus, bidirectional specimens presented a 3.3% increase between resin 1 and 2. For the graphene resin, this property improved by 6.2%. Due to the unidirectional issues above mentioned, their variations were tremendous when compared to the bidirectional specimens. These results were not coherent with the bidirectional ones, thus being eliminated from this study. Mechanical properties for the defective unidirectional specimens were estimated by having the same variations between matrices of bidirectional specimens. These were the ones mentioned at the beginning of the paragraph.

In the numerical simulation, the mechanical properties obtained in tensile and bending tests were complemented with mechanical properties values from previous tests of similar materials and from literature (Silva, 2017).

As a starting point for the numerical simulation, it was used the wing structure design obtained by Sá (2021), as the baseline design. The above-mentioned analyses were first performed on the main spar, and several structural modifications were performed after the original suffered from buckling deformations on the top cap and webs.

The use of HexaMatrix in the design of the main spar in spite of epoxy system SR8200 with hardener SD7206 allowed the following improvements:

- displacement decrease of 7.8%;
- critical buckling load increase of 9.8%;
- stress decrease between 2.1% and 2.8%.

The same analyses were made to the wing structure, which led to modifications in the spar's webs and on the skin panels. An initial wing design, including the final main spar design model, was oversized because the main spar's maximum stress was much lower than the allowed values. Therefore, this design is rejected and it was used Sá's wing design as the initial design for the static and buckling analysis, where structural modifications were performed to the main spar's webs and to the top side skin panel between spars.

The wing model presented similar improvements to the main spar when comparing the same two epoxy systems:

- displacement decrease of 6.1%;
- critical buckling load increase of 11.1%;
- stress decrease between 2.4% (unidirectional max. stress) and 4.0% (bidirectional max. stress).

To take advantage of the graphene properties, two different wing structures were designed. The first was called the resin mix design and it mixed components manufactured using both resin 1 and 3. The second was built upon the resin mix design and sought a decrease in the wing weight by decreasing the number of plies used in the top side skin panel while fulfilling static and buckling requirements. It was called light design and was considered the final wing model design of this work. A trade-off between the displacement increase and the weight and buckling load decrease was analysed to guarantee that design safety requirements continued to be fulfilled.

Comparing results from the light design with the ones from the resin 3 buckling design, there was a:

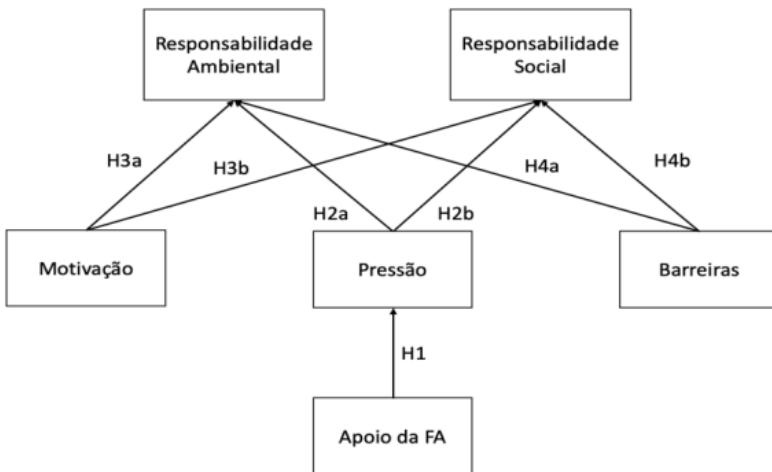
- displacement increase of 1.2%;
- critical buckling load decrease of 6.4% and weight decrease of 43.3 g;
- stress decrease between 0.8% (bidirectional max. stress) and 3.0% (unidirectional max. stress).

In the end, using graphene-based epoxy resin, it was possible to obtain a thinner wing structure, with fewer layers in the composition of the composite material, when compared to the structure made of resin used in CIAFA. This was obtained while guaranteeing the maximum admissible stress values for the materials. Therefore, there was a reduction in the amount of material used, which in turn reduces the mass of the wing.

References

- Aerospace Technology Institute, & The University of Manchester. (2018). Graphene exploitation material applications in aerospace. *INSIGHT papers*(Issue 6).
- Alves, B., Coelho, V., Silva, P., Marta, A., Afonso, F., Sá, P., & Caetano, J. (2021). Design of a hydrogen powered small electric fixed-wing uav with vtol capability. In *International conference on multidisciplinary design optimization of aerospace systems* (pp. 290–304).
- Dorworth, L. C., Gardiner, G. L., & Mellema, G. M. (2009). *Essentials of advanced composite fabrication & repair*, washington: Aviation supplies & academics. Inc.
- Fraga, T. J., Sobrinho, M. A. d. M., Carvalho, M. N., & Ghislandi, M. G. (2020). State of the art: Synthesis and characterization of functionalized graphene nanomaterials. *Nano Express*, 1(2), 022002. doi: 10.1088/2632-959x/abb921
- Geim, A. K. (2012). Graphene prehistory. *Physica Scripta*, T146, 014003. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2012/t146/014003> doi: 10.1088/0031-8949/2012/t146/014003
- International Organization for Standardization. (2011). Iso 14125:1998 + ac:2002 + a1:2011 - fibre-reinforced plastic composites — determination of flexural properties [Computer software manual].
- International Organization for Standardization. (2017). ISO/TS 80004-13:2017(en) Nanotechnologies — Vocabulary — Part 13: Graphene and related two-dimensional (2D) materials. *Online Browsing Platform (OBP) - ISO*. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-13:ed-1:v1:en>
- International Organization for Standardization. (2020a). Iso/dis 527-4 - plastics - determination of tensile properties - part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites [Computer software manual].
- International Organization for Standardization. (2020b). Iso/dis 527-5 - plastics - determination of tensile properties - part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites [Computer software manual].
- Kumar, V., Kumar, A., Lee, D.-J., & Park, S.-S. (2021). Estimation of number of graphene layers using different methods: A focused review. *Materials*, 14(16). Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4590> doi: <https://doi.org/10.3390/ma14164590>
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385-388. Retrieved from <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1157996> doi: 10.1126/science.1157996
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 90, 75-127. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517300968> doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>
- Rafiee, M., Nitzsche, F., Laliberte, J., Thibault, J., & Labrosse, M. R. (2019). Simultaneous reinforcement of matrix and fibers for enhancement of mechanical properties of graphene-modified laminated composites. *Polymer Composites*, 40(S2), E1732-E1745. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.25137> doi: <https://doi.org/10.1002/pc.25137>
- Reddy, J. N. (2004). *Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis*. CRC Press.
- Sá, P. (2021). *Projeto estrutural de um veículo aéreo não tripulado com uma célula de combustível de hidrogênio* (Unpublished master's thesis). Academia da Força Aérea.
- Silva, J. (2017). *Design and optimization of a wing structure for a uas class i 145 kg* (Unpublished master's thesis). Portuguese Air Force Academy.
- Simitses, G. J., & Hodges, D. H. (2005). *Fundamentals of structural stability*. Elsevier.
- The Graphene Council. (n.d.). *What is graphene?* Retrieved from <https://www.thegrapheneouncil.org/page/WhatIsGraphene>
- This Month in Physics History: October 22, 2004: Discovery of Graphene. (2009). *APS NEWS*, 18(9), 2.
- Toray Composite Materials America, I. (2018). T700g standard modulus carbon fiber (5th ed.) [Computer software manual].
- Zhang, Z., Fraser, A., Ye, S., Merle, G., & Barralet, J. (2019). Top-down bottom-up graphene synthesis. *Nano Futures*, 3(4), 042003. Retrieved from <https://dx.doi.org/10.1088/2399-1984/ab4eff> doi: 10.1088/2399-1984/ab4eff

DETERMINANTES DA ADOÇÃO DE PRÁTICAS DE SUSTENTABILIDADE DOS FORNECEDORES DA FORÇA AÉREA PORTUGUESA



Fonte: Modelo conceptual (autoria própria)

Autor: Luís Manuel Pinto Oliveira
Alferes - Mestrado Integrado em Aeronáutica Militar na especialidade de Administração
Aeronáutica
Academia da Força Aérea, Sintra

Orientador: Professor Doutor Alcino Tiago Cruz Gonçalves
Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade de Lisboa

Coorientadora: CAP/ADMAER/136844-D Raquel Alexandra Esteves Rosa

Resumo: O estudo analisa a percepção dos fornecedores da Força Aérea Portuguesa (FA) sobre os determinantes da adoção das práticas de Responsabilidade Social e Responsabilidade Ambiental, considerando a Pressão dos *stakeholders*, a Motivação, as Barreiras e o Apoio da FA como fatores influenciadores da adoção das mesmas.

Criou-se um questionário por inquérito como método de recolha de dados, obtendo-se 584 respostas válidas, representativas do tecido empresarial dos fornecedores da Força Aérea. Para a análise de dados e teste das hipóteses formuladas, utilizou-se o método dos mínimos quadrados parciais através do modelo de equações estruturais. Realizaram-se ainda entrevistas semiestruturadas a dois fornecedores, como forma de análise de robustez.

Os resultados demonstram que o apoio da FA influencia positivamente a pressão dos *stakeholders*, assim como a adoção de práticas sociais e ambientais. A Pressão dos *stakeholders* e a Motivação influenciam positivamente a adoção destas, no entanto as Barreiras não têm um efeito significativo neste âmbito.

O estudo contribui para a elaboração de políticas de implementação de comportamentos de responsabilidade social empresarial nos fornecedores do setor público português, assim como, para a melhor compreensão dos fatores que influenciam a adoção de práticas de sustentabilidade.

Palavras-chave: Responsabilidade Social Empresarial; Práticas de Responsabilidade Social Empresarial; Força Aérea Portuguesa

1. Introdução

As alterações climáticas e a crescente consciencialização sobre a sustentabilidade levaram a mudanças no modelo de gestão de empresas (Chan et al., 2017). Os clientes procuram cada vez mais produtos sustentáveis, por isso é também da responsabilidade das empresas alertar os consumidores em geral para os benefícios da aquisição dos mesmos (Akehurst et al., 2012). As empresas alteram o ambiente e o estilo de vida de uma sociedade e são capazes de afetar as políticas atuais e futuras (Madime & Gonçalves, 2022a). A adoção de comportamentos de Responsabilidade Social Empresarial (RSE) por parte das empresas contribui para a promoção de um desenvolvimento sustentável (Barbieri & Cajazeira, 2009). É assim preponderante analisar os determinantes da adoção de comportamentos de RSE, de forma a melhor desenvolver estratégias de promoção de comportamentos socialmente responsáveis. Embora exista um crescente interesse na investigação dos determinantes e das consequências da adoção de comportamentos sustentáveis por parte das empresas (Gaio & Gonçalves, 2022; Barros et al., 2022; Gaio et al., 2022; Gonçalves et al., 2020, 2021, 2022; Medeiros et al., 2022; Pereira et al., 2021; Silva et al., 2021), os determinantes de adoção de práticas de sustentabilidade nas Forças Armadas Portuguesas (FAA), no melhor do nosso conhecimento, têm sido escassamente investigados (Valério, 2021).

A questão de investigação (QI) do estudo é “Quais são os principais fatores que influenciam a adoção de práticas sociais e ambientais nos *stakeholders* da Força Aérea Portuguesa (FA)?”. De forma a responder à QI, foram analisadas as percepções dos fornecedores da FA, recolhidas através de inquérito por questionário e por entrevista, sobre as barreiras, pressão e motivações que enfrentam na adoção de práticas sustentáveis.

2. Revisão de Literatura

2.1 Responsabilidade Social Empresarial

A Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Económico (OCDE), em 2011, define como conduta empresarial responsável quando esta contribui positivamente para o

progresso económico, ambiental e social com vista a alcançar o desenvolvimento sustentável. Esta definição, indica uma estrutura de 3 dimensões que embora sejam distintas, não são mutuamente exclusivas e não têm nenhuma prioridade de uma sobre outra, devendo assim, serem consideradas de forma integrada a fim de se alcançar a sustentabilidade (Bansal, 2005; Henriques & Richardson, 2004).

A sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável são conceitos contestáveis e com inúmeras definições ao longo dos tempos (Falkner, 2013). Segundo Diesendorf (2000), a sustentabilidade é o objetivo do processo de desenvolvimento sustentável. Em 1987, a Comissão Mundial para o Ambiente e Desenvolvimento, no relatório Brundtland, define desenvolvimento sustentável como o que “satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades”.

A teoria dos *stakeholders* é considerada a base da RSE (Donaldson & Preston, 1995; Tench et al., 2007). As iniciativas de RSE realizadas pelas empresas estão sujeitas a um julgamento ético por parte dos seus *stakeholders* (Clarkson, 1995; Goodpaster, 1991) e têm um impacto positivo tanto na reputação como na performance financeira das empresas (Allouche & Laroche, 2005). Desta forma, as empresas devem procurar ter sempre uma conduta correta para alcançar o bem global da sociedade (Garriga & Melé, 2004). A imagem e a percepção de RSE influenciam diretamente a lealdade dos *stakeholders* (Du et al., 2007) e a atribuição de culpa face a crises ocorrentes nas empresas (Klein & Dawar, 2004). As empresas devem manter uma boa imagem de responsabilidade social perante os seus *stakeholders*, visto que estes têm um papel fundamental e podem afetar o desempenho da empresa (Atkinson et al., 1997; Jones, 1995).

2.2 Promoção de políticas de sustentabilidade no setor público

As comunidades enfrentam desafios significativos relacionados com as alterações climáticas e as disparidades socioeconómicas (Laurian & Crawford, 2016). As organizações governamentais são responsáveis pelo bem-estar das suas comunidades. Estas organizações desempenham um papel fundamental na resposta às exigências, necessidades e problemas da comunidade (Wang et al., 2016). A sustentabilidade é um esforço conjunto entre o governo e os cidadãos, para beneficiar o interesse público (Leuenberger & Wakin, 2007). Os grupos de cidadãos alertam os decisores políticos para os problemas que afetam a comunidade, que podem iniciar esforços de sustentabilidade (Wang et al., 2016). Na tentativa de resolver estas questões, os governos locais incorporaram lentamente os princípios de sustentabilidade na sua elaboração de políticas (Laurian & Crawford, 2016).

A economia circular é uma ferramenta de desenvolvimento sustentável para satisfazer os interesses da sociedade a um nível macro (Geng & Doberstein, 2008; Sauvé et al., 2016). Esta é vista como uma mentalidade que procura a utilização sustentável dos recursos naturais (McDowall et al., 2017). É necessário mudar a mentalidade de utilizar e deitar fora para o modelo circular de “reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar, refabricar e redesenhar” entre muitos outros R's (Jabbour et al., 2020).

A contratação pública é o processo pelo qual uma organização pública obtém bens e serviços para satisfazer as suas necessidades organizacionais e objetivos políticos (Prier & McCue, 2009). Esta, é um dos mais poderosos instrumentos de política que o Estado tem ao seu dispor para promover a mudança social, económica e ambiental, pois envolve, direta ou indiretamente, diferentes intervenientes em toda a cadeia de valor (Morgan & Sonnino, 2013). Assim, o impacto desta ferramenta de política pública pode assumir um papel estratégico, impulsionando mudanças substanciais que estimulem tendências sustentáveis tanto na produção como no consumo (Stein, 2019).

Em 2016, a consultora e auditora PWC afirma que a contratação pública verde e a contratação pública sustentável são os quadros mais proeminentes na agenda europeia das políticas de aquisição pública. Em 2008, a contratação pública verde é definida pela CE como um instrumento através do qual as organizações públicas procuram adquirir bens, serviços e obras com um impacto ambiental reduzido ao longo do seu ciclo de vida. Já em 2019, a contratação pública sustentável é definida pela CE como o processo através do qual as organizações públicas procuram alcançar o equilíbrio adequado entre os três pilares do desenvolvimento sustentável, económico, social e ambiental na aquisição de bens, serviços ou empreitadas de obras públicas, em todas as fases do projeto.

A contratação pública desempenha um papel fundamental contribuindo para uma estratégia e crescimento inteligente, sustentável e inclusivo. Esta utilização estratégica de contratos públicos permite alcançar objetivos sociais mais amplos (Clement et al., 2016). A Diretiva 2014/24/EU sobre a contratação pública mudou significativamente o paradigma no processo de aquisição alterando o critério de adjudicação de preço mais baixo para o de proposta economicamente mais vantajosa, garantindo uma maior presença de objetivos sociais no processo de contratação (Smith et al., 2016).

A partir da análise da literatura foi criada a seguinte hipótese:

H1: O Apoio da FA aos seus fornecedores afeta positivamente a pressão exercida pelos *stakeholders* na adoção de práticas sustentáveis.

2.3 Determinantes na adoção e implementação de RSE

A implementação da RSE na estratégia de uma organização depende de vários fatores. Estes podem impulsionar ou criar barreiras na adoção de comportamentos de RSE.

A adoção de práticas de RSE pode ser causada por pressões, quer sejam internas ou externas, assim como por motivações, sejam de expectativa ou de forma instrumental (Aguinis & Glavas, 2012; Arli & Cadeaux, 2014; Chkanikova & Mont, 2015; Ditlev-Simonsen & Midttun, 2011; Laudal, 2011; Lozano, 2015; Madime & Gonçalves, 2022b; Pintol & Allui, 2020; Sendlhofer, 2020). De forma oposta, a adoção de práticas de RSE pode ser afetada negativamente por barreiras, a nível individual, organizacional e institucional (Alotaibi et al., 2019; Bagur-Femenias et al., 2013; Gray, 2013; Latapi et al., 2021; Madime & Gonçalves, 2022b; Porter & Kramer, 2017).

Segundo Aguinis e Glavas (2012), grande parte das empresas adotam práticas de RSE devido a pressões institucionais e exercidas pelos seus *stakeholders*. A contratação pública influencia os fornecedores de organizações governamentais a adotar comportamentos verdes (Amann et al., 2014). Chkanikova e Mont (2015) afirmam que as exigências dos *stakeholders* e as pressões exercidas pelo governo e pela UE têm um impacto positivo na adoção de políticas sustentáveis.

Assim, com base na literatura surgem as seguintes hipóteses de investigação:

H2a: A percepção da Pressão exercida pelos *stakeholders* está positivamente relacionada com as práticas ambientais dos fornecedores da FA.

H2b: A percepção da Pressão exercida pelos *stakeholders* está positivamente relacionada com as práticas sociais dos fornecedores da FA.

Bagur-Femenias et al. (2013) afirma que a pressão exercida pelos *stakeholders* afeta a implementação de práticas ambientais. No entanto, a razão principal para a adoção provém da proatividade da empresa, o que sugere que existem motivações da empresa para a adoção deste tipo de comportamento. Segundo vários autores, uma empresa pode adotar políticas de RSE, pois acredita que a sua adoção fará com que a empresa obtenha algum benefício ou vantagem competitiva. Estes benefícios podem ser ou não de natureza financeira, materializando-se em participações em fundos sustentáveis ou até mesmo num aumento do relacionamento com os

consumidores (Lisi, 2015; Tenório, 2006). Figgi e Hahn (2013) afirmam que as atividades de RSE podem ser motivadas por questões de ética, valores e princípios da cultura organizacional. Neste sentido, foram elaboradas as seguintes hipóteses de investigação:

H3a: As percepções das Motivações que podem influenciar a adesão da RSE estão positivamente relacionadas com as práticas ambientais dos fornecedores da FA.

H3b: As percepções das Motivações que podem influenciar a adesão da RSE estão positivamente relacionadas com as práticas sociais dos fornecedores da FA.

Vários autores defendem que existem barreiras na adoção de comportamentos de RSE, e que para a adoção destes, é necessário que as empresas tenham uma determinada liberdade financeira, assim como, a disponibilidade de dedicar tempo, conhecimento e instalações, por exemplo. De salientar, que nesta área não se pode esperar um retorno no imediato (Laudal, 2011). Para Kolk e Pinske (2008) existem barreiras económicas, tecnológicas e institucionais na adoção de comportamentos sustentáveis. Latapí et al. (2021) defendem que existem barreiras à implementação de políticas de RSE a nível organizacional, como a falta de flexibilidade e adaptabilidade, falta de confiança organizacional, falta de compreensão do contexto, acesso limitado a recursos, desenquadramento com a cultura organizacional e uma estrutura organizacional inadequada. Com base na literatura existente, formularam-se as seguintes hipóteses:

H4a: As percepções das Barreiras que podem enfrentar os fornecedores da FA estão negativamente relacionadas com as práticas ambientais dos fornecedores da FA.

H4b: As percepções das Barreiras que podem enfrentar os fornecedores da FA estão negativamente relacionadas com as práticas sociais dos fornecedores da FA.

3. Contexto de Investigação

A missão da FA está definida no artigo 2.º da Lei Orgânica da Força Aérea (LOFA), sendo a missão primária: assegurar a defesa do território nacional. No mesmo artigo, na alínea e), ponto 2, a FA também tem por incumbência “colaborar em missões de proteção civil e em tarefas relacionadas com a satisfação das necessidades básicas e a melhoria da qualidade de vida das populações”. Estas missões encontram-se envolvidas na proteção ambiental e sendo o setor da aviação um dos mais poluentes, a investigação nesta área torna-se preponderante.

A FA pretende ser uma instituição/organização de referência, inovadora e sustentável. De acordo com a atual Diretiva Estratégica da FA 2022-2025, deve-se garantir a sua sustentabilidade em três perspetivas: 1) Económica e organizacional, através da manutenção da sustentabilidade do seu dispositivo e das suas capacidades; 2) Social, preservando o respeito humanitário, a entreajuda e o sentido de pertença e consolidando valores, virtudes e atitudes e 3) Ambiental, por meio da diminuição da sua pegada ecológica e unindo as suas atividades e procedimentos à investigação e desenvolvimento.

Deste modo, o presente trabalho enquadra-se com a missão e visão da FA, assim como com as diretrizes nacionais e internacionais. Como consequência das suas missões, a FA, deve estar atenta às necessidades da população e proteção do ambiente. Com isso em consideração, este estudo analisa as percepções dos fornecedores da FA sobre práticas de RSE, contribuindo para o aumento do conhecimento na área. Além disso, este trabalho pretende auxiliar na elaboração de estratégias de implementação de RSE nos *stakeholders* de forma a garantir uma maior proteção do ambiente e das necessidades básicas da população.

4. Metodologia de Investigação e Amostra

4.1 Método de recolha de dados

Para o presente trabalho utilizou-se um método misto de recolha de dados. Primeiramente realizou-se um inquérito por questionário (IQ) e de seguida inquéritos por entrevista (IE). Os IQ têm como objetivo identificar, nos fornecedores da FA, as pressões, motivações e barreiras na adoção de um comportamento socialmente responsável, assim como identificar o grau de apoio da FA na adoção das mesmas. Uma das vantagens deste método prende-se com o controlo da recolha de dados, sendo possível estudar relações e criar modelos (Saunders et al., 2016), assim como verificar ou rejeitar hipóteses com a análise de dados (Carmo & Ferreira, 2015). Os questionários são instrumentos de investigação que possuem a vantagem de manter o anonimato, permitindo uma maior fiabilidade das respostas (Santos & Lima, 2019).

Todo o processo do planeamento da investigação teve em consideração a literatura disponível, filosofia e a abordagem, materializando-se na escolha da metodologia, métodos de recolha e análise de dados, assim como as questões éticas presentes em todas as fases do processo de investigação (Saunders et al., 2016). A investigação realizou-se segundo os elevados padrões de conduta ética, moral e de qualidade exigidos tanto pela Academia da Forças Aérea, como pelo Instituto Superior de Economia e Gestão, mas também pelas normas de virtude, princípios e valores de integridade académica.

A construção do IQ resultou da análise da revisão de literatura, da qual derivou a formulação de um IQ. Para a criação deste instrumento foi necessário adaptar, reformular e traduzir certas questões, sendo estas posteriormente validadas por um grupo de académicos. O IQ foi ainda traduzido para a língua inglesa devido à existência de fornecedores da FA internacionais, sendo posteriormente traduzido novamente para português, de forma a garantir a sua validade e minimizar os enviesamentos (Speklié & Widener, 2018).

A partir da análise da revisão de literatura construiu-se um IE semiestruturado dando oportunidade aos entrevistados de explicar ou desenvolver as suas respostas (Saunders et al., 2016). Realizou-se o IE direcionado a dois fornecedores da FA da área aeronáutica. O entrevistado 1 (E1) é o gestor de uma pequena e média empresa nacional e o E2 é o gestor de uma grande empresa nacional. O IE tem como objetivo reforçar os resultados encontrados através da aplicação do IQ, o IE deve ser considerado como uma análise de robustez.

Para a concretização do IQ foi utilizada a plataforma online Qualtrics, sendo realizado um pré-teste com militares da FA de forma a melhorar, adaptar e testar o IQ para garantir a sua aplicabilidade (Carmo & Ferreira, 2015). A distribuição do questionário foi realizada através dos e-mails recolhidos internamente da base de dados mestre da FA. Com vista à obtenção de uma maior taxa de resposta, enviaram-se lembretes para o preenchimento do questionário aos fornecedores (Hiebl & Richter, 2018).

4.2 Método de análise de dados

Efetuou-se a análise descritiva das variáveis, o resumo das características das empresas participantes, assim como testes de forma a validar as medições e testar as hipóteses formuladas.

O presente trabalho tem por base o estudo das várias relações das variáveis latentes através de métodos de Modelação de Equações Estruturais as quais permitem analisar a sua validade estatística. A técnica *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) permite que as relações causais entre uma ou mais variáveis independentes sejam estimadas, sem impor pressupostos distributivos, esta é uma técnica de regressão de segunda geração (Hair

et al., 2011). Com a utilização do método PLS-SEM é possível avaliar separadamente a medição e os modelos estruturais, através da combinação da análise dos componentes principais com as regressões quadráticas normais (Hair et al., 2019). A utilização deste método permite compreender melhor os modelos estruturais e de medição (Hair et al., 2011). A aplicação deste modelo pressupõe duas etapas: (1) estimativa e validade do modelo de medição, e (2) avaliação do modelo estrutural e conclusão sobre as hipóteses em estudo (Hulland, 1999).

A avaliação do modelo de medição implica examinar a fiabilidade da consistência interna, a validade convergente e a validade discriminante (Hair et al., 2017). A fiabilidade de um instrumento de medida é indicada pela sua consistência. Por conseguinte, realizou-se o teste de *Alpha de Cronbach*, *Composite Reliability* (CR) e do *rho_alpha* para todas as variáveis, de forma a testar o grau de coerência entre as respostas dos inquiridos e cada um dos indicadores que constituem o IQ. Num modelo refletivo, cada indicador é tratado como uma forma diferente de avaliar um construto, no entanto os mesmos devem convergir e explicar grande parte da variância do construto. De modo a verificar a validade convergente tornou-se necessário realizar os testes da Variância Média Extraída (AVE) e dos Outer Loadings (OL). A validade discriminante consiste no facto de uma variável latente apenas captar os efeitos pretendidos da mesma, sendo esses efeitos únicos, não sendo captados por nenhuma outra variável latente. Para avaliar a validade discriminante é necessário realizar a análise dos Cross-Loadings (CL), o critério de *Fornell-Larcker* e o rácio *Heterotrait-Monotrait* (HTMT).

A avaliação do modelo estrutural, demonstra como é que as variáveis latentes estão relacionadas entre si. O modelo estrutural deverá ser válido e robusto. De forma a garantir a sua validade serão realizadas as seguintes análises: (1) colinearidade entre as variáveis latentes; (2) significância dos coeficientes de caminho através de *bootstrapping*; (3) coeficiente de determinação normal e ajustado (R^2) para analisar o poder preditivo do modelo para as variáveis latentes dependentes; (4) o impacto da omissão de variáveis latentes independentes na validade do modelo através dos testes (F^2); e (5) a relevância preditiva (*Stone-Geisser Q²*) do modelo através de *blindfolding*, assim como para efeitos preditivos individuais.

4.3 População alvo e amostra

A população alvo do presente estudo são todos os fornecedores da FA existentes na base de dados até à data, ano de 2022. O contacto com a população alvo foi realizado através de e-mail. O tipo de amostragem realizado foi não probabilístico por conveniência.

Através da aplicação do IQ foi possível obter 661 respostas dentro da população-alvo do estudo. No entanto, foi necessário remover 71 respostas pois a taxa de valores em falta foi superior a 15%, assim como foram removidas 6 respostas por apresentarem padrões suspeitos (Hair et al., 2017). A amostra final é constituída por 584 respostas representando uma taxa de resposta de 12,08%.

5. Análise e discussão de resultados

5.1 Descrição da Amostra

Da amostra final, 29,62% dos fornecedores inquiridos realizam atividades de “Comércio por grosso e a retalho, reparação de veículos automóveis e motociclos”. Cerca de 45,38% dos fornecedores têm a sua sede localizada na Área Metropolitana de Lisboa, 24,32% na região Centro de Portugal e 5,82% fora de Portugal. O tecido empresarial de fornecedores da FA é composto maioritariamente por microempresas (52,57%), apenas 7,36% dos fornecedores são grandes empresas. Grande parte dos fornecedores da FA, cerca de 46,06%, opera há mais de 25 anos. Aproximadamente 70,72% dos fornecedores inquiridos realizaram uma transação com a FA entre 2021-2022 e 45,38% começaram a realizar transações com a FA nos últimos 5 anos,

dos quais 8,90% mantêm uma relação de parceria com a FA por mais de 25 anos. Os fornecedores da FA, aproviam maioritariamente as Bases Aéreas ou outras Unidades Operacionais (37,67%), assim como a Direção de Abastecimento e Transportes (24,14%).

5.2 Modelo de Medição

De forma a avaliar o modelo de medição realizaram-se testes à sua consistência interna, à validade convergente e à validade discriminante.

Em primeiro lugar, avaliou-se a consistência interna do modelo, obtendo-se resultados adequados. O critério tradicional para a avaliação da consistência interna é o teste do *Alpha de Cronbach*. O resultado do teste é considerado aceitável quando o valor é superior a 0,700. Todas as variáveis latentes obtiveram resultados superiores a 0,800, com um valor-p de 0,000. O teste do *Alpha de Cronbach* poderá subestimar a confiabilidade da consistência interna. Por conseguinte, é necessário realizar os testes do *rho_A* e CR, os quais apresentam valores satisfatórios.

Em segundo lugar, avaliou-se o modelo quanto à sua validade convergente, através dos OL assim como das AVE. Os valores dos OL devem ser superiores a 0,708 e os valores da AVE superiores a 0,500. Removeram-se os indicadores com OLs inferiores a 0,708. A remoção aumentou o valor da AVE da variável latente para níveis aceitáveis. O modelo apresenta indicadores com OL abaixo do limite definido ao facto de estarem muito próximos dos valores de referência definidos. É possível concluir que o modelo possui validade convergente.

Por fim, de forma a verificar a validade discriminante realizou-se a análise aos CL do modelo. Todas as variáveis apresentam OL superiores aos CL demonstrando a presença de validade discriminante. Seguidamente, recorreu-se ao critério de *Fornell-Larcker*. Em todas as variáveis latentes é possível observar que a raiz quadrada da AVE é superior às correlações com as outras variáveis latentes, demonstrando a presença de validade discriminante. No entanto, os testes realizados anteriormente não detetam de forma fiável problemas com a validade discriminante (Henseler et al., 2015). Posto isto, realizou-se o rácio HTMT das correlações. O valor de referência para a verificação de validade discriminante deve ser inferior a 0,900 (Hair et al., 2017). Todos os rácios do teste HTMT são inferiores ao valor de referência. A robustez do rácio HTMT é reforçada através do procedimento de *bootstrapping* onde se verifica que, para um intervalo de confiança de 1%, nenhuma das relações do modelo assume um valor superior a 0,900. Desta forma, afirma-se que o modelo possui validade discriminante.

5.3 Modelo Estrutural

Para avaliar a Variância do Método Comum (CMV) foi realizado o teste de fator único de *Harman*, no qual se obteve um valor de 30,7%. Este valor está abaixo da referência de 50%, concluindo-se que não existe CMV (Kock, 2020).

Examinaram-se os efeitos totais para determinar o quanto forte são as relações do modelo. Relativamente aos efeitos causados na Responsabilidade Ambiental, a Motivação e a Pressão, apresentam validade estatística ao nível de 1% e efeitos médios de 0,430 e 0,129, respetivamente. As Barreiras exibem validade estatística de 10%, com um efeito de 0,077 ($p = 0,073$). Em relação à Responsabilidade Social, a Motivação e os Pressões apresentam valores-p iguais a 0 e com efeitos médios de 0,327 e 0,223, respetivamente. Já as Barreiras, não apresentam validade estatística para um nível de significância de 10%. Indirectamente, o Apoio afeta a Responsabilidade Ambiental e Responsabilidade Social para um nível de significância de 1%, com efeitos médios de 0,047 e 0,081, respetivamente. O efeito do Apoio para a Pressão é relevante e significativo, com um efeito médio de 0,327 ($p = 0,000$).

O R^2 representa a quantidade de variância explicada dos construtos endógenos no modelo estrutural, este método avalia a precisão preditiva dos modelos estruturais. O R^2 pode

assumir valores entre 0 e 1, quanto maior for o valor melhor é a precisão preditiva. O R^2 das variáveis Responsabilidade Ambiental, Responsabilidade Social e Pressão correspondem a 0,314, 0,277 e 0,130, respetivamente, para um valor-p de 0,000, logo, podia assumir-se um efeito médio a grande para a área das ciências sociais e comportamentais (Ringle et al., 2014).

No modelo estrutural, os valores Q^2 maiores do que zero para uma variável latente exógena indicam relevância preditiva nas variáveis latentes endógenas (Hair et al., 2017). De forma a obter estes valores, realizou-se o procedimento de *blindfolding*. A Responsabilidade Ambiental obteve um valor de Q^2 de 0,188 e a Responsabilidade Social um valor de Q^2 de 0,170.

5.4 Discussão de resultados obtidos

Através da análise dos dados obtidos elaborou-se a seguinte tabela a qual responde às várias questões identificadas na Revisão de Literatura. Verificaram-se quase todas as hipóteses, exceto a **H4a** e a **H4b**.

Tabela 1: Análise Estatística das Hipóteses

Hipótese	Relação	Beta	Estatística t	Valor-p	Decisão
H1	Apoio→Pressão	0,361	8,819	0,000	Suportada
H2a	Pressão→Resp. Ambiental	0,129	2,818	0,005	Suportada
H2b	Pressão→Resp. Social	0,223	4,655	0,000	Suportada
H3a	Motivação→Resp. Ambiental	0,430	9,440	0,000	Suportada
H3b	Motivação→Resp. Social	0,327	6,332	0,000	Suportada
H4a	Barreiras→Resp. Ambiental	0,077	1,796	0,073	Não Suportada
H4b	Barreiras→Resp. Social	0,055	1,244	0,213	Não Suportada

Os resultados demonstram que o Apoio da FA tem um impacto positivo na criação de pressão, logo verifica-se a hipótese **H1**. Estes resultados demonstram que os fornecedores da FA têm a percepção que a FA se preocupa com o bem-estar da sociedade, e que conseguem influenciar os seus fornecedores a adotar políticas sustentáveis.

Relativamente à pressão exercida pelos *stakeholders*, identifica-se que a mesma tem um impacto positivo na percepção de comportamentos de Responsabilidade Social e de Responsabilidade Ambiental, conforme defende a literatura anterior (Chkanikova & Mont, 2015; Furrer & Holtbrügge, 2018; Helmig et al., 2016; Yu & Choi, 2016), verificando-se as hipóteses **H2a** e **H2b**. Atualmente, os resultados observados podem ter sido motivados pelo aumento da preocupação dos *stakeholders* com a sustentabilidade devido à crise energética decorrente do conflito entre a Rússia e a Ucrânia, o aumento generalizado dos preços dos serviços, dos bens alimentares e de primeira necessidade, e de um modo generalizado, da elevada taxa de inflação da zona Euro, entre outros fatores. Os resultados ainda sugerem que as Organizações Governamentais devem criar medidas e regulamentos bem como uma maior pressão na adoção de comportamentos de RSE (Furrer & Holtbrügge, 2018; Yu & Choi, 2016).

Realçam-se os resultados obtidos na variável Motivação, pois representam os valores mais fortes de todo o estudo. Identifica-se que a Motivação tem um impacto positivo na percepção de comportamentos de Responsabilidade Social e de Responsabilidade Ambiental, como defendem diversos autores (Lisi, 2015; Pintol & Allui, 2020; Tenório, 2006), neste sentido, confirmam-se também as hipóteses **H3a** e **H3b**.

Em relação às Barreiras, identifica-se que estas influenciam positivamente a percepção de comportamentos de Responsabilidade Social e de Responsabilidade Ambiental, por isso, são rejeitadas as hipóteses **H4a** e a **H4b**. Os resultados vão de acordo com o apresentado por Madime e Gonçalves (2022b). Estes podem ser justificados pelo facto de os fornecedores não

identificarem a existência de barreiras na adoção de comportamentos de RSE e pela existência de vários incentivos na adoção destes comportamentos.

5.5 Análises adicionais e de robustez

Realizou-se ainda o teste de PLSc, proposto por Dijkstra e Henseler (2015). Este manteve a confiabilidade, assim como a validade convergente e discriminante das variáveis latentes em estudo. Os resultados, demonstram-se semelhantes aos calculados através de PLS-SEM. Destacam-se as relações da Motivação para com a Responsabilidade Ambiental e Responsabilidade Social, que obtiveram um coeficiente de correlação comparativamente maior de 0,606 (valor-p: 0,000) e 0,426 (valor-p: 0,000), respetivamente.

Os resultados do IE reforçam as relações encontradas anteriormente. Estes demonstram que todos os determinantes afetam a adoção de comportamentos sustentáveis. O E1 defende que a base para a adoção destes comportamentos é uma boa *Corporate Governance* e uma grande consciência social por parte da gestão.

Realizou-se uma análise multigrupo do teste não paramétrico do PLS-MGA. Globalmente, não se observam diferenças significativas exceto no grupo dos fornecedores que possuem um código de ética definido em comparação aos fornecedores que não o têm. Encontrou-se uma relação mais forte do Apoio da FA à Pressão dos stakeholders dos fornecedores que não possuem um código de ética definido com um efeito maior de 0,196 ($p=0,014$). Encontraram-se diferenças significativas no grupo de fornecedores que opera há menos de 15 anos em comparação com os fornecedores que operam há mais de 15 anos, as empresas que operam à menos de 15 anos têm uma relação mais forte entre as Barreiras e a RS em 0,221 ($p=0,024$), e contrariamente, têm uma relação mais fraca entre a Motivação e a responsabilidade social num valor de -0,409 ($p=0,000$). Extrapolou-se que, quanto maior for a idade da empresa a operar maior será a sua motivação para adotar comportamentos de responsabilidade social (proporcional à sua maturidade empresarial), assim como diminui a força que as barreiras têm na adoção destes comportamentos.

5.6 Implicações para a Gestão

Com este estudo, pretende-se auxiliar a formulação de novas estratégias e incentivos para a adoção de comportamentos sustentáveis. Os resultados demonstram que a FA é capaz de exercer pressão nos seus fornecedores e que a implementação de medidas de contratação pública verde na FA faria com que os fornecedores adotassem práticas mais sustentáveis. O Código dos Contratos Públicos estabelece as normas para a contratação pública, neste diploma estão presentes os vários critérios de adjudicação. A adição de critérios de adjudicação que beneficiem, na fórmula, as empresas que apresentem comportamentos de RSE, seria uma grande motivação e trigger para os fornecedores do setor público adotarem mais este tipo de comportamentos. Neste seguimento e alinhado com o subcapítulo, os Relatórios de Sustentabilidade independentes ou integrados nos Relatórios e Contas deviam surgir de forma voluntária e responsável e não só caso se tornem obrigatórios. A divulgação da informação não financeira solicitada pode ser feita à medida de cada empresa, de acordo com várias diretrizes e referências, agora não abordar de todo o tópico de sustentabilidade é que não é opção, não temos um Planeta B!

6 Conclusões, limitações e pistas de investigação futura

O presente estudo teve por objetivo analisar as percepções dos fornecedores da FA na adoção de comportamentos sustentáveis. Para a adoção de comportamentos de RSE dos fornecedores da FA teve-se por base o estudo de 4 fatores: a Pressão dos stakeholders; a

Motivação; as Barreiras e o Apoio da FA (indiretamente). Através da análise destes fatores é possível responder à QI proposta e extrair algumas conclusões.

De forma global, os resultados vão parcialmente de encontro aos apresentados recentemente por Madime e Gonçalves (2022b). Demonstra-se que a Pressão e a Motivação são determinantes significativos na adoção de comportamentos sustentáveis por parte dos fornecedores, tendo a Motivação uma maior força do que a Pressão. No entanto, verifica-se que as Barreiras na adoção de práticas sustentáveis não são um determinante significativo. O estudo apresenta que o Apoio da FA tem grande e significativa influência na Pressão dos *stakeholders*, no entanto, a sua influência indireta na adoção de comportamentos de responsabilidade ambiental e de responsabilidade social é comparativamente mais baixa.

Globalmente, os testes de robustez confirmam as relações encontradas na utilização do PLS-SEM. Os resultados da aplicação do PLSc demonstraram relações mais fortes entre a Motivação e a Responsabilidade Ambiental e Responsabilidade Social. Relativamente aos resultados das entrevistas semiestruturadas, demonstrou-se que todos os determinantes influenciam a adoção de comportamentos sustentáveis, a Motivação e a Pressão afetam positivamente e as Barreiras negativamente. Embora os entrevistados acreditem que a FA tem a capacidade de influenciar os seus fornecedores na adoção de práticas sustentáveis através do exemplo e das ferramentas de contratação pública. Os mesmos relatam que, atualmente, a FA não promove a adoção de comportamentos sustentáveis nos seus fornecedores.

Através da análise multigrupo verificou-se que as Barreiras têm um impacto maior e a Motivação um impacto menor na adoção de comportamentos sustentáveis nas empresas que operam há menos de 15 anos. Segundo a estatística descritiva uma das maiores barreiras à adoção de comportamentos sustentáveis é o elevado investimento inicial (que é bastante elevado no início de um ciclo operacional), por isso é possível que as empresas recém-criadas não possuam capital suficiente para prosseguir políticas sustentáveis. Além disso, ter motivação para construir uma boa imagem e, por conseguinte, obter reputação e outros benefícios do mercado é uma das maiores “motivações” apontadas pela estatística descritiva.

Este estudo contribui para a literatura e academia ao analisar os determinantes de adoção de práticas de RSE na ótica dos fornecedores, no contexto da FA e da administração pública, uma área e sector pouco explorado (Moreno & Gonçalves, 2021; Godinho & Gonçalves, 2020). De forma a garantir um planeta mais saudável e limpo é necessário um grande esforço por parte de todos os sectores, sem exceção, na adoção de comportamentos de RSE (Gonçalves et al., 2021). Em adição, o presente estudo contribui para a criação de estratégias e iniciativas de promoção da adoção de comportamentos de RSE por parte das empresas portuguesas.

A existência de literatura escassa sobre o tema poderá ser considerada como uma limitação ao estudo, assim como o seu carácter exploratório. Embora se tenha tentado realizar uma metodologia robusta poderão existir outros efeitos sobre a amostra.

Como pista de investigação futura torna-se relevante analisar os determinantes da adoção de práticas sustentáveis numa vertente qualitativa mais robusta, tendo em consideração os vários grupos de *stakeholders*. Atendendo à possibilidade da aplicação futura de normas de contratação pública verde, seria importante identificar os setores de atividade que seriam capazes de responder às exigências legais, sem comprometer o fornecimento da FA. A análise temporal das percepções dos *stakeholders* sobre a adoção de práticas sustentáveis seria relevante e interessante para compreender melhor as características/razões da adoção de práticas sustentáveis ao longo do tempo (e se, se alteram ou não).

Referências Bibliográficas

- Aguinis, H., & Glavas, A. (2012). What We Know and Don't Know About Corporate Social Responsibility: A Review and Research Agenda. *Journal of Management*, 38(4), 932–968.
- Akehurst, G., Afonso, C., & Gonçalves, H. (2012). Re-examining green purchase behaviour and the green consumer profile: new evidences. *Management Decision*, 50(5), 972–988.
- Allouche, J., & Laroche, P. (2005). A meta-analytical investigation of the relationship between corporate social and financial performance. *Revue de Gestion Des Ressources Humaines*, 18.
- Alotaibi, A., Edum-Fotwe, F., & Price, A. D. F. (2019). Critical barriers to social responsibility implementation within mega-construction projects: The case of the Kingdom of Saudi Arabia. *Sustainability (Switzerland)*,
- Amann, M., Roehrich, J. K., Eßig, M., & Harland, C. (2014). Driving sustainable supply chain management in the public sector: The importance of public procurement in the European Union. *Supply Chain Management*, 19(3), 351–366.
- Arli, D. I., & Cadeaux, J. (2014). Drivers of corporate community involvement and challenges in measuring its impact. *Social Responsibility Journal*, 10(1), 161–183.
- Atkinson, A., Waterhouse, J., & Wells, R. (1997). A stakeholder approach to strategic performance measurement. *MIT Sloan Management Review*, 38(3), 25–38.
- Bagur-Femenias, L., Llach, J., & Alonso-Almeida, M. del M. (2013). Is the adoption of environmental practices a strategical decision for small service companies?: An empirical approach. *Management Decision*,
- Bansal, P. (2005). Evolving sustainably: A longitudinal study of corporate sustainable development. *Strategic Management Journal*, 26(3), 197–218.
- Barbieri, J., & Cajazeira, J. (2009). *Responsabilidade social empresarial e empresa sustentável: da teoria à prática*.
- Barros, V., Falcão, P. F., & Sarmento, J. M. (2022). Are more sustainable firms able to operate with lower working capital requirements? *Finance Research Letters*, 46, 102407.
- Bowen, H. R. (2013). *Social responsibilities of the businessman*. University of Iowa Press.
- Brundtland, G. H. (1987). Our common future—Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291–294.
- Carroll, A. B., & Brown, J. A. (2018). *Corporate Social Responsibility: A Review of Current Concepts, Research, and Issues* (pp. 39–69).
- Castanho, A., & Gonçalves, T. (2022). The different paradigms of public administration in the portuguese armed forces. [Os Diferentes Paradigmas da Administração Pública nas Forças Armadas Portuguesas] *RISTI - Revista Iberica De Sistemas e Tecnologias De Informacao*, 2022(E49), 51–64.
- Chan, E. S. W., Okumus, F., & Chan, W. (2017). The Applications of Environmental Technologies in Hotels. *Journal of Hospitality Marketing & Management*, 26(1), 23–47.
- Chandler, C., Franklin, A., Ochoa, A., & Iclei, S. C. (2015). *Sustainable Public Procurement of School Catering Services*. August, 1–36.
- Chkanikova, O., & Mont, O. (2015). Corporate supply chain responsibility: Drivers and barriers for sustainable food retailing. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 22(2), 65–82.
- Clarkson, M. E. (1995). A Stakeholder Framework for Analyzing and Evaluating Corporate Social Performance. *Academy of Management Review*, 20(1), 92–117.
- Clement, S., John, W., & Semple, A. (2016). *A Guide to Implementing Sustainable Procurement 3rd Edition The Procura+ Manual*.
- Contrafatto, M. (2014). The institutionalization of social and environmental reporting: An Italian narrative. *Accounting, Organizations and Society*, 39(6), 414–432.
- Decreto-Lei n.º 187/2014 do Ministério da Defesa Nacional: Lei Orgânica da Força Aérea. (2014). Diário da República n.º 250/2014, Série I de 2014-12-29, páginas 6413 - 6420
- Diesendorf, M. (2000). Sustainability and Sustainable Development. In *Sustainability: The corporate challenge of the 21st century* (pp. 19–37). Allen & Unwin.
- Dijkstra, T. K., & Henseler, J. (2015). Consistent partial least squares path modeling. *MIS quarterly*.

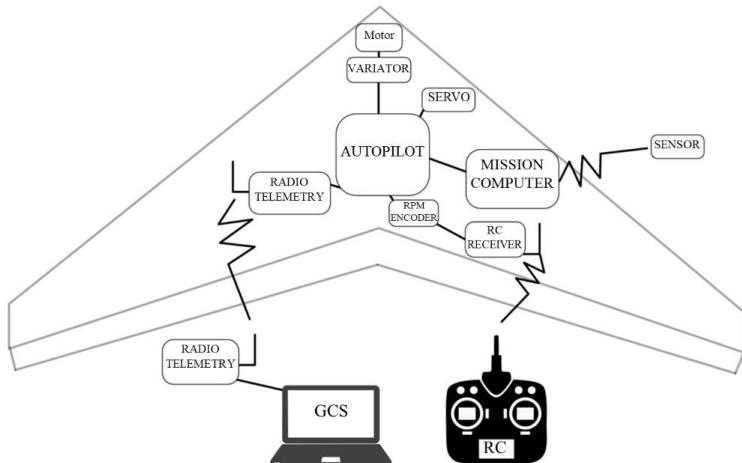
- Ditlev-Simonsen, C. D., & Midtun, A. (2011). What motivates managers to pursue corporate responsibility? a survey among key stakeholders. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*.
- Donaldson, T., & Preston, L. E. (1995). The Stakeholder Theory of the Corporation: Concepts, Evidence, and Implications. *Academy of Management Review*, 20(1), 65–91.
- Du, S., Bhattacharya, C. B., & Sen, S. (2007). Reaping relational rewards from corporate social responsibility: The role of competitive positioning. *International Journal of Research in Marketing*, 24(3), 224–241.
- Falkner, R. (2013). The Handbook of Global Climate and Environment Policy. In *The Handbook of Global Climate and Environment Policy*. <https://doi.org/10.1002/9781118326213>
- Figge, F., & Hahn, T. (2013). Value drivers of corporate eco-efficiency: Management accounting information for the efficient use of environmental resources. *Management Accounting Research*, 24(4), 387-400.
- Força Aérea Portuguesa. (2022). Diretiva de Planeamento Estratégico da Força Aérea 2022-2025
- Freeman, R. E., Harrison, J. S., Wicks, A. C., Parmar, B. L., & De Colle, S. (2010). Stakeholder theory: The state of the art.
- Fuller, C. M., Simmering, M. J., Atinc, G., Atinc, Y., & Babin, B. J. (2016). Common methods variance detection in business research. *Journal of Business Research*, 69(8), 3192–3198.
- Furrer, O., & Holtbrügge, D. (2018). Stakeholder pressures, CSER practices, and business outcomes in Denmark, Germany, and the Netherlands. *Article in European Journal of International Management*.
- Gaio, C., & Gonçalves, T. C. (2022). Gender diversity on the board and firms' corporate social responsibility. *International Journal of Financial Studies*, 10(1), 15.
- Gaio, C., Gonçalves, T., & Sousa, M. V. (2022). Does corporate social responsibility mitigate earnings management? *Management Decision*.
- Garriga, E., & Melé, D. (2004). Corporate social responsibility theories: Mapping the territory. *Journal of Business Ethics*, 53(1–2), 51–71.
- Geng, Y., & Doberstein, B. (2008). Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving “leapfrog development.” In *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* (Vol. 15, Issue 3, pp. 231–239).
- Godinho, L. M., & Gonçalves, T. (2020, May). Defense Organizations Budgeting and Management Control Systems in Restrictive Budgets Context—Literature Gaps. In International Conference of Research Applied to Defense and Security. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 181. 391-397. Springer.
- Gonçalves, T. C., Dias, J., & Barros, V. (2022). Sustainability Performance and the Cost of Capital. *International Journal of Financial Studies*, 10(3), 63.
- Gonçalves, T., Gaio, C., & Costa, E. (2020). Committed vs opportunistic corporate and social responsibility reporting. *Journal of Business Research*, 115, 417-427.
- Gonçalves, T., Gaio, C., & Ferro, A. (2021). Corporate social responsibility and earnings management: Moderating impact of economic cycles and financial performance. *Sustainability*, 13(17), 9969.
- Gonçalves, T., Pimentel, D., & Gaio, C. (2021). Risk and Performance of European Green and Conventional Funds. *Sustainability*, 13(8), 4226.
- Gray, R. (2013). The practice of silent accounting. In *Building Corporate Accountability: Emerging Practice in Social and Ethical Accounting and Auditing* (pp. 201–217).
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, Marko. (2017). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (2nd ed., Vol. 2). SAGE Publications, Inc.
- Hair, J. F., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2011). PLS-SEM: Indeed a silver bullet. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 19(2), 139–152.
- Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 31(1), 2–24.
- Helming, B., Spraul, K., Society, D. I.-B. &, & 2016. Under positive pressure: How stakeholder pressure affects corporate social responsibility implementation. *Sage*, 55(2), 151–187.
- Henriques, A., & Richardson, Julie. (2004). The Triple Bottom Line - Does it all add up? A. HENRIQUES J. RICHARDSON. In *Small Enterprise Development* (Vol. 16, Issue 1). Earthscan.

- Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43(1), 115–135.
- Hiebl, M. R. W., & Richter, J. F. (2018). Response rates in management accounting survey research. *Journal of Management Accounting Research*, 30(2), 59–79.
- Hörisch, J., Schaltegger, S., & Freeman, R. E. (2020). Integrating stakeholder theory and sustainability accounting: A conceptual synthesis. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124097.
- Hossain, M. M., Alam, M., Hecimovic, A., Alamgir Hossain, M., & Choudhury Lema, A. (2016). Contributing barriers to corporate social and environmental responsibility practices in a developing country: A stakeholder perspective. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 7(2), 319–346.
- Hulland, J. (1999). Use of partial least squares (PLS) in strategic management research: a review of four recent studies. *Strategic Management Journal*, 20(2), 195–204.
- Hummel, K., & Schlick, C. (2016). The relationship between sustainability performance and sustainability disclosure – Reconciling voluntary disclosure theory and legitimacy theory. *Journal of Accounting and Public Policy*, 35(5), 455–476.
- Jordan, P. J., & Troth, A. C. (2020). Common method bias in applied settings: The dilemma of researching in organizations. *Australian Journal of Management*, 45(1), 3–14.
- Kirchherr, J., Pomun, T., & Walton, M. J. (2018). Mapping the Social Impacts of 'Damocles Projects': The Case of Thailand's (yet Unbuilt) Kaeng Suea Ten Dam. *Journal of International Development*, 30(3), 203–217.
- Klein, J., & Dawar, N. (2004). Corporate social responsibility and consumers' attributions and brand evaluations in a product-harm crisis. *International Journal of Research in Marketing*, 21(3), 203–217.
- Kock, N. (2015). Common method bias in PLS-SEM: A full collinearity assessment approach. *International Journal of E-Collaboration*, 11(4), 1–10.
- Kock, N. (2020). Harman's single factor test in PLS-SEM: Checking for common method bias. In *Data Analysis Perspectives Journal* (Vol. 2, Issue 2).
- Kristensen, H. S., Mosgaard, M. A., & Remmen, A. (2021). Integrating circular principles in environmental management systems. *Journal of Cleaner Production*, 286.
- Latapí, M., Jóhannsdóttir, L., Davíðsdóttir, B., & Morsing, M. (2021). The barriers to corporate social responsibility in the nordic energy sector. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9).
- Laudal, T. (2011). Drivers and barriers of CSR and the size and internationalization of firms. *Social Responsibility Journal*, 7(2), 234–256.
- Laurian, L., & Crawford, J. (2016). Organizational Factors of Environmental Sustainability Implementation: An Empirical Analysis of US Cities and Counties. *Journal of Environmental Policy and Planning*.
- Lazzini, S., Anselmi, L., Schiavo, L. Lo, & Falanga, A. M. (2014). The role of information systems to support performance management in public administration: The case of the Italian regulatory authority for the energy sector. In *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*.
- Leuenberger, D. Z., & Wakin, M. (2007). Sustainable Development in Public Administration Planning: An Exploration of Social Justice, Equity, and Citizen Inclusion. *Administrative Theory & Praxis*, 29(3), 394–411.
- Lisi, I. E. (2015). Translating environmental motivations into performance: The role of environmental performance measurement systems. *Management Accounting Research*, 29, 27–44.
- Lozano, R. (2015). A holistic perspective on corporate sustainability drivers. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 22(1), 32–44.
- Madime, E., & Gonçalves, T. C. (2022a). Consequences of Social and Environmental Corporate Responsibility Practices: Managers' Perception in Mozambique. *International Journal of Financial Studies*, 10(1).
- Madime, E., & Gonçalves, T. C. (2022b). Determining Factors For Social and Environmental Practices of Corporate Responsibility in Mozambique. *Environmental and Social Management Journal*, 16(2), e03002.
- Maignan, I. (2001). Consumers' Perceptions of Corporate Social Responsibilities: A Cross-Cultural Comparison. *Journal of Business Ethics* 2001 30:1, 30(1), 57–72.
- McDowall, W., Geng, Y., Huang, B., Barteková, E., Bleischwitz, R., Türkeli, S., Kemp, R., & Doménech, T. (2017). Circular Economy Policies in China and Europe. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 651–661.

- Medeiros, E., Valente, B., Gonçalves, V., & Castro, P. (2022). How Impactful Are Public Policies on Environmental Sustainability? Debating the Portuguese Case of PO SEUR 2014–2020.
- Moore, D. R. J. (2013). Sustainability, institutionalization and the duality of structure: Contradiction and unintended consequences in the political context of an Australian water business. *Management Accounting Research*, 24(4), 366–386.
- Moreno, D., & Gonçalves, T. (2021). Collaborative governance outcomes and obstacles: Evidence from Portuguese armed forces. *Cogent Business & Management*, 8(1), 1906487.
- Morgan, K., & Sonnino, R. (2013). The school food revolution: Public food and the challenge of sustainable development. In *The School Food Revolution: Public Food and the Challenge of Sustainable Development*. Taylor and Francis.
- Pereira, V., Silva, G. M., & Dias, Á. (2021). Sustainability Practices in Hospitality: Case Study of a Luxury Hotel in Arrábida Natural Park. *Sustainability*, 13(6), 3164.
- Pintol, L., & Allui, A. (2020). Critical Drivers and Barriers of Corporate Social Responsibility in Saudi Arabia Organizations*. *Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 7(11), 259–268.
- Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J.-Y., & Podsakoff, N. P. (2003). Podsakoff Mackenzie Lee Podzakoff JAP 2003 Common method biases. *Journal of Applied Psychology*, 88(5).
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2017). Strategy & society: The link between competitive advantage and corporate social responsibility. In *Corporate Social Responsibility* (pp. 359–370).
- Prier, E., & McCue, C. P. (2009). The implications of a muddled definition of public procurement. *Journal of Public Procurement*, 9(3/4), 326–370.
- PWC. (2016). Stock-taking of administrative capacity, systems and practices across the EU to ensure the compliance and quality of public procurement involving European Structural and Investment (ESI) Funds.
- Ringle, C. M., Sarstedt, M., & Schlittgen, R. (2014). Genetic algorithm segmentation in partial least squares structural equation modeling. *OR Spectrum*, 36, 251–276.
- Sarstedt, M., Ringle, C., modeling, J. H.-P. least squares path, & 2017, undefined. (2017). Treating unobserved heterogeneity in PLS-SEM: A multi-method approach. Springer, 197.
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2016). Research Methods for Business Students, sixth edition. *Research Methods for Business Students*, January, 2–30.
- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, 17, 48–56.
- Sendlhofer, T. (2020). Decoupling from Moral Responsibility for CSR: Employees' Visionary Procrastination at a SME. *Journal of Business Ethics*, 167(2), 361–378.
- Silva, G. M., Gomes, P. J., Carvalho, H., & Geraldes, V. (2021). Sustainable development in small and medium enterprises: The role of entrepreneurial orientation in supply chain management. *Business Strategy and the Environment*, 30(8), 3804–3820.
- Smith, J., Andersson, G., Gourlay, R., Karner, S., Mikkelsen, B. E., Sonnino, R., & Barling, D. (2016). Balancing competing policy demands: The case of sustainable public sector food procurement. *Journal of Cleaner Production*, 112, 249–256.
- Sousa, R. (2019). Alimentação, Compras Públicas e Desenvolvimento Sustentável - o Caso das escolas. Universidade de Lisboa e Universidade Nova de Lisboa (Tese de Doutoramento).
- Spekklé, R. F., & Widener, S. K. (2018). Challenging issues in survey research: Discussion and suggestions. *Journal of Management Accounting Research*, 30(2), 3–21.
- Stein, M. (2019). Sustainable Food Procurement. *Encyclopedia of Food and Agricultural Ethics*, 2297–2303.
- Tench, R., Bowd, R., & Jones, B. (2007). Perceptions and perspectives: Corporate social responsibility and the media. *Journal of Communication Management*, 11(4), 348–370.
- Tenório, F. G. (2006). *Responsabilidade Social Empresarial: Teoria E Prática*.
- Valério, J. (2021). *Determinantes da Adoção de Práticas de Responsabilidade Social – Contexto da Defesa Portuguesa*.
- Vroman, L. (1994). *The world we do or do not want* (pp. 562–567).
- Wang, H., Tong, L., Takeuchi, R., & George, G. (2016). Corporate social responsibility: An overview and new research directions. In *Academy of Management Journal*. Academy of Management.

- Weber, M. (2008). The business case for corporate social responsibility: A company-level measurement approach for CSR. *European Management Journal*, 26(4), 247–261.
- Yu, Y., & Choi, Y. (2016). Stakeholder pressure and CSR adoption: The mediating role of organizational culture for Chinese companies. *Social Science Journal*, 53(2), 226–235.

Software architecture for low-cost UAVs – An application considering automatic target tracking mission scenarios



Source: Silva et al. (2020)

Author: ASPAL/PILAV João Filipe Gomes Moreira Alves
Master of Science Degree in Military and Aeronautical Sciences – Aviator Pilot
Air Force Academy, Sintra

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

Co-Supervisors: CAP/ENGEL Gonçalo Chartes Santos Cruz
CAP/ENGEL Diogo Alexandre Oliveira Silva
Air Force Academy, Sintra

Abstract

In recent years, advances in different technological areas enabled the development of low-cost, yet efficient Unmanned Air Vehicles (UAVs) for a broad spectrum of applications. The Air Force Academy Research Centre (CIAFA) is currently exploring new open-source software/hardware options, allowing for rapid prototyping and flight testing of control algorithms for UAVs. Our contributions lies in the development of a software architecture based on the hardware developed by Silva et al. (2020), considering open-source software tools, available in the scientific community. An autonomous ground target tracking mission is considered, illustrating the effectiveness of the proposed solution. Software-in-the-loop simulation results show that using the proposed architecture for the closed-loop control system (with vision), a fixed-wing UAV is able to autonomously detect, estimate and follow a ground target with good performance.

Keywords: Software architecture, Unmanned air systems, YOLOv3, Moving Path Following, PX4 autopilot, Gazebo.

1. Introduction

1.1. Background, Motivation and Main Objective

The increasing use of UAVs for military and civilian purposes determines the need to adopt low-cost configurations to fulfil the mission to which they are being committed. Since 2009, CIAFA has been engaged in several research projects (PITVANT, PERSEUS, SUNNY, SEAGULL, FIREFRONT) using UAVs.

Typically, Piccolo autopilots (Collins Aerospace, 2022) have been used for research purposes by CIAFA. However, these are relatively expensive and resort to closed-source software, which makes it very difficult to sustain and operate due to the need for specific skills for that purpose (Kortunov et al., 2015). Therefore, CIAFA is currently exploring new open-source hardware and software options that allow for rapid prototyping and flight testing of UAVs, such as Pixhawk (PX4 User Guide, n.d.). This autopilot has already been integrated into a previous thesis, as in Silva & Oliveira (2017), who compared Pixhawk and Piccolo autopilots. Later, Ferreira et al. (2019), Silva et al. (2020) and Mendes et al. (2021) developed aerial platforms using this same hardware.

The main objective of this article is to develop and validate a software architecture compliant with the hardware architecture proposed by Silva et al. (2020) for later implementation in a fixed-wing UAV. Furthermore, we aim at demonstrating the effectiveness of the proposed architecture by considering a target tracking mission in which a UAV detects and tracks a moving ground vehicle.

1.2. Problem Formulation

The first problem that this article intends to solve is to propose a software architecture suitable for prototyping and expediting the validation of flight controllers taking into account the hardware architecture proposed in Silva et al. (2020). This can be formulated as follows: i) consider the hardware architecture proposed in Silva et al. (2020), ii) propose a compatible software architecture for rapid prototyping of computer vision, guidance and control algorithms for low-cost, fixed-wing UAVs.

Once the previous problem is successfully addressed, the proposed software architecture will be validated by implementing a case study described in the following: i) consider the problem of a UAV performing an autonomous detection and tracking of a ground vehicle, ii) Using the

software architecture previously proposed, implement a modular control architecture that allows the UAV to:

- 1- Detect a ground vehicle.
- 2- Estimate its location based on the data collected using an RGB camera.
- 3- Autonomously follow the ground vehicle based on that information.

2. Literature Review

2.1. Brief Review on the Hardware Architecture for Low-cost UAVs

The UAV hardware architecture is complex as it requires the ensemble of all the systems in a small volume, ensuring low weight, limited power resources, increased computational requirements, and never hindering the system's performance (Pastor et al., 2006).

The software architecture will be designed based on the hardware architecture proposed by Silva et al. (2020). For this reason, constraints will be imposed on the software and firmware running in the different Unmanned Aerial Systems (UAS) systems. The hardware architecture from Silva et al. (2020) proposes the use of a Pixhawk autopilot (PX4 User Guide, n.d.), a Raspberry Pi mission computer (Raspberry Pi Foundation, n.d.), a laptop as Ground Control Station (GCS), a camera as the sensor and a SIK telemetry radio for the communication (ArduPilot Dev Team, 2021c).

The constraints imposed by the autopilot are related to the flight stack to be used. In particular, two major software packages are fully compatible with the Pixhawk autopilot, the Ardupilot and the PX4 (LambDrive, 2016a).

Two mission computer options, Raspberry Pi and NVidia TX2 (NVidia Developer, 2022) can be considered for hardware architecture. Both mission computers have no significant software restrictions (ArduPilot Dev Team, 2021a).

The SIK telemetry radio's firmware is compatible with different GCS software applications that allow for the graphical display of telemetry information. Finally, a Raspberry Pi camera (Raspberry Pi Foundation, n.d.) was considered for (eventual) early laboratorial/flight validation of the architecture proposed in this article.

2.2. Software

Once all hardware components and their software constraints have been presented, the options available for the software architecture will be addressed in the sequel.

The Pixhawk autopilot can adopt two different flight stacks: PX4 and Ardupilot. One of the key points of the PX4 over the Ardupilot concerns the availability of the Offboard mode for fixed-wing aircraft. This mode enables sending vehicle guidance and attitude commands, which are key requirements for this research (PX4 User Guide, 2021a).

Regarding the GCS software, several options, such as, QGroundControl (QGC) (QGroundControl, 2019), APM Planner (APM Planner 2, 2021), MAVProxy (ArduPilot Dev Team, 2019) and Mission Planner (ArduPilot Dev Team, 2021b) include different features. Particularly, QGC is the only GCS that provides full compatibility with the PX4 flight stack; the others are fully compatible with Ardupilot (LambDrive, 2016b).

The mission computer software applications widely used for low-cost UAVs are Robot Operation System (ROS) (PX4 User Guide, 2021b) and Dronekit, and both use MAVLink communication (Dronekit, 2015). According to Kim & Lee (2019), ROS is more accessible than DroneKit because it supports C, C++, and Python, whereas DroneKit only runs Python. In

addition, even though DroneKit is working towards full compatibility with PX4 firmware, it is not entirely working with this firmware. Conversely, ROS completely supports PX4 firmware.

Since the testing of the software architecture is usually performed in a simulated environment, it is necessary to address different simulator options in order to recreate the aircraft in a real environment. For this reason, the simulator will have to guarantee compatibility with one of the flight stacks, Ardupilot or PX4, and provide a simulating flight with a fixed-wing aircraft. Gazebo, Mission Planner Simulator, JSBSim, and Flight Gear are the simulators that meet the two requirements mentioned above (ArduPilot Dev Team, 2021d).

2.3. Guidance and Control Techniques

Different strategies have been proposed for ground target tracking. One line of work defined periodic reference flight trajectories for the UAV to navigate via waypoint and maintains proximity with the target. In particular, Lee et al. (2003) introduced a path-planning algorithm for a UAV to track a ground vehicle. Husby (2005) proposed a path algorithm with three possible patterns (square wave, circular and bow tie-shaped standoff). Finally, Beard (2007) developed two classes of flight trajectories, longitudinal and orbital, for tracking ground-based objects.

Quintero & Hespanha (2014) recognized that the greatest amount of research regards the standoff tracking issue in the target tracking area. In order to solve this problem, Frew et al. (2007) used a Lyapunov guidance vector field (LGVF) to enable a UAV orbiting a moving target at a fixed, planar standoff distance, assuming no wind speeds. As a way of improving, Chen et al. (2009) proposed tangent and Lyapunov field vectors that enable the UAV to converge to the standoff circle faster than the previous LGVF method through differential geometry. Next, Oh et al. (2013) proposed a rendezvous and standoff tracking guidance. Finally, Zhu et al. (2013) presented a saturated heading rate controller based on a vector field to regulate the relative course angle to the target while the velocity remains constant.

Other authors used the Moving Path Following (MPF) technique to address target tracking problems. Oliveira et al. (2013) presented a control method that relies on a path following a control strategy to track a fixed radius circumference that moves solidly to the target that emits its position through a GPS beacon. More recently, Oliveira et al. (2016b) introduced the MPF control law while a Lyapunov method was derived for the UAV. This new method extends the classical path following methods to the case of a path that is written with respect to a path-transport frame that can move with respect to an inertial frame.

2.4. Ground Vehicle Detection in Airborne Images using Computer Vision

Several methods can be adopted for object detection by a UAV, such as radar (Schwartz, 1990), an operator (van Breda, 1995), and a computer vision (Borji et al., 2019).

Larry Roberts first introduced computer vision, discussing the possibility of recovering "3-D geometrical information from a 2-D perspective view of blocks" (Huang, 1996, p. 21). Simultaneously, since the 1950s, a small subsection of Artificial Intelligence (AI) known as Machine Learning (ML) has revolutionized different fields. Neural Networks (NN) is a set of techniques that integrates ML, and it was the field that spawned Deep Learning (DL) (Alom, 2018).

Object detection can be accomplished through several approaches that can be split into traditional and deep-learning approaches (Nguyen et al., 2020). There are two types of DL methods of object detection. These types are divided into two and one -stage approach. The two-stages approach are the ones based on region proposal algorithms (Region-based Convolutional Neural Networks (R-CNNs), Fast R-CNN, Faster R-CNN). The one-stage approaches are based

on regression or classification recognized as real-time object detection (You Only Look Once (YOLO) and Single-Shot Detector (SSD)) (Nguyen et al., 2020).

Several projects have been introduced for the aerial vehicle detection task. Mandal et al. (2019) first proposed a lightweight network for vehicle detection in aerial scenarios called SSSDet; later, the author detected small-scale vehicles in aerial images through a one-stage vehicle detection network called AVDNet. Dorrer et al. (2019) proposed an external region method, RetinaNet, for vehicle detection and a focal loss function to distinguish complex negative samples from actual vehicles. In another line of work, Lu et al. (2018), Ju et al. (2020), and Cepni et al. (2020) used YOLO as aerial vehicle detection methods in their research.

3. System Architecture

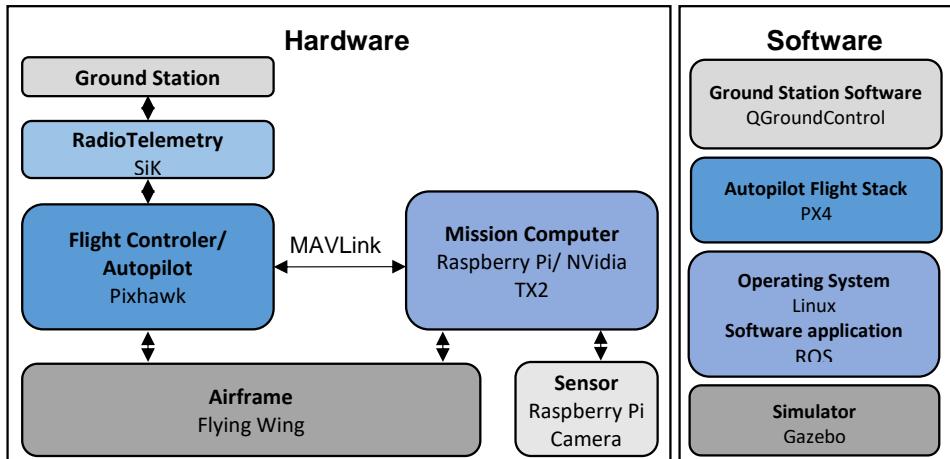


Figure 1 - System hardware/software architecture.

The hardware and software architecture proposed in this article is depicted in Figure 1. The proposed hardware based on Silva et al. (2020) is displayed on the left side of the image. On the right side are presented the software components selected for the software architecture based on the requirements imposed by the hardware, as well as the need to run the computational component of trajectory control and computer vision on board the aircraft.

Concerning the autopilot, the PX4 flight stack was chosen. Despite some advantages for the ArduPilot regarding the broader and more active community and information sharing and progress over the PX4, it lacked a main requirement for this article, the Offboard mode (ArduPilot Dev Team, 2021c). In addition, choosing PX4 over the ArduPilot was driven by easy understanding for beginners and connectivity with software like ROS, QGC and Gazebo, all used in this article (PX4 User Guide, n.d.).

As for the ground station software, the QGC was chosen because it provides full compatibility with the selected flight stack, PX4 (LambDrive, 2016b) and is suitable for beginners.

Regarding the mission computer software, the proposed software application to be used is ROS library due to its full compatibility with PX4. The use of ROS thus limits the operating system of the mission computer, which is Linux (PX4 User Guide, 2021c). The decision to choose ROS 1 over ROS 2 is based on four factors, ease of support for installing the development toolchain

(PX4, Gazebo and ROS Melodic), compatibility with CIAFA software applications, which are based on ROS1, CIAFA's greater experience using ROS1 and the present work doesn't require the real-time guarantees and certification provided by ROS2.

Lastly, the choice of the Gazebo 9 simulator is based on the recommendations made by the PX4 community and its scalability, which permits friendly usage, as well as, easy and fast access to other systems such as PX4 or ROS (PX4 User Guide, 2022b).

3.1. Software Architecture

The software architecture developed in this research is presented in Figure 2. The architecture is divided into four major parts (blue blocks), the PX4 Software in the Loop Testing (SILT) interface, QGroundControl, the Gazebo simulator and the ROS environment.

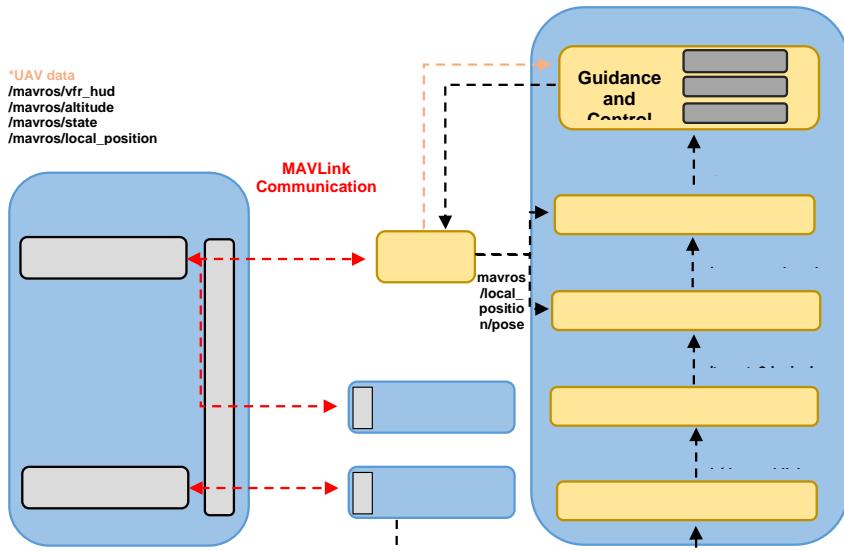


Figure 2 - Software architecture.

The module PX4 SILT represents the PX4 flight stack and is the component that will receive information via MAVROS from the ROS Environment module, as well as from QGroundControl and Gazebo simulator, through a UDP port. The PX4 uses the information from the ROS environment module (through the MAVROS node) to command the UAV aerodynamic surfaces deflection and thrust settings.

The Gazebo simulator module provides a realistic environment for the SILT simulations. From the received information, the simulator reproduces the commands in the aircraft. In addition, there is a connection through UDP port from the simulator to the Video Acquisition node sharing the aircraft camera video displayed in the Gazebo.

Furthermore, the QGroundControl block represents the software from the ground station. The link between the QGC and PX4 autopilot, allows the exchange of information between the

simulation interface and ground control. As a result, it is possible to follow the flight and monitor several parameters from the aircraft through the QGC, for instance, airspeed, heading, altitude, flight mode, etc. In addition, it is also possible to file a flight plan from the QGC to the PX4 autopilot, change the flight mode and a handful of other functionalities.

Finally, the ROS environment block contains the following sub-modules: Guidance and Control, Target Estimate, Target Geolocation, Target Detector and Video Acquisition. Each sub-module corresponds to a ROS node. The Target Detector node is divided into two parts; initially, a colour filter is implemented to detect a red box to validate the Guidance and Control algorithm. Afterwards, this detection module is replaced by a neural network-based approach to detect a ground vehicle.

In the ROS environment, the data is transferred over ROS topics. Regarding Figure 6, it displays several ROS topics, namely, UAV data published by the MAVROS and subscribed by the Guidance and Control node and *local_position_pose* message subscribed by Target estimate node and Target Geolocation. Both these ROS topics correspond to telemetry data regarding altitude, airspeed, flight mode, etc.

Moreover, inside the ROS module, five ROS topics are used: i) *video_publisher*, ii) *target_2d_pixel_position*, iii) *target_geolocation_measurements*, iv) *target_data* and v) *setpoint_raw/attitude*. First, the *video_publisher* is the topic where the ROS image from Gazebo is published and subscribed by Target Detector node. Next, the *target_2d_pixel_position* is a topic where the 2D coordinates from the target's position in the camera frame in pixels is published and subsequently subscribed by the Target Geolocation position estimation. Afterwards, the *target_geolocation_measurements* is the topic where the North East Down (NED) coordinates calculated by target geolocation are published and is subscribed by the Target Estimate node.

Subsequently, the *target_data* topic represents the output from the Kalman Filter estimation. Having two separate ROS nodes, one for position measurement through the Target Geolocation node and the other node for parameters estimation by the Target Estimate, enables the *target_geolocation_measurements* rate to be distinct from the *target_data* computation rate (which includes information regarding the target position, velocity and heading). This makes it possible to use filter estimation and prediction in the case of no measurements by the Target Geolocation node.

Finally, the Guidance and Control node subscribes to the *target_data* topic and publishes the *setpoint_raw/attitude* topic. The *setpoint_raw/attitude* topic includes a command message (*mavros_msgs/AttitudeTarget.msg*, which includes commands to yaw, pitch, roll and thrust) sent to the PX4 autopilot. The Guidance and Control node comprises the PI lateral (Roll_control) and longitudinal (Pitch_control and Thrust_control) controllers.

Implementing a modular architecture allows various algorithms to be developed and tested for later implementation in UAVs. Each of these modules will be described in the following sections.

3.2. Gazebo Simulator

The Gazebo simulator is the module responsible for creating complex worlds (Koenig & Howard, 2004) that will be encountered in reality by both UAVs and unmanned ground vehicles (UGV) (Shin, 2019). Additionally, its diverse library of air vehicles, open-source community, high fidelity and precise control makes this simulator a crucial piece between "the drawing board and the real hardware" (Koenig & Howard, 2004, p. 1).

3.3.PX4 Flight Stack

PX4 autopilot architecture is divided into two layers, the flight stack and middleware. The first one represents the software of the flight control system and estimation; the second part supports all types of UAVs and UGVs, providing hardware integration and communication.

This autopilot shares a single codebase for all airframes and is reactive. The reactivity means that every functionality is split into exchangeable and reusable components, the communication is done by passing messages asynchronously, and the system can deal with varying workloads (PX4 User Guide, 2021e).

3.4. ROS Environment

The ROS environment corresponds to the module that incorporates the ROS nodes related to the Guidance and Control, Target Estimate, Target Geolocation, Target Detector and Video Acquisition.

3.4.1. Guidance and Control

The Guidance and Control node comprises the sub-blocks concerning to longitudinal, lateral and attitude control. The longitudinal control is computed by PI implementation. Through software in the loop testing (SILT) simulation was possible to confirm that the UAV could climb, descent and cruise at a given velocity and altitude setpoints; thus, the longitudinal control was validated.

The lateral control was performed through the path following control strategy developed by Oliveira & Encarnação (2013). This method suggests following a circumference with a constant radius that moves jointly with the reference on the ground. The control law is derived from Lyapunov methods, and the kinematic model for path following is written through the association of the Serret-Frenet frame to the reference path. The MPF considers a local inertial frame, which has its origin in the Ground Station's GNSS coordinates and follows a North-East-Down (NED) convention, and a wind frame, which has its origin in the centre of mass of the UAV. The following equation is the control law proposed by Oliveira & Encarnação (2013) and implemented in this research

$$\dot{\psi} = \left(-g_1\dot{\psi} + k\dot{s} - g_2y_1(v_x\sin\psi_{sf} - v_y\cos\psi_{sf}) \frac{1 - \cos\psi}{\psi} - g_2V_t y_1 \cos\overline{\psi}_d \frac{\sin\psi}{\psi} \right), \quad (3.1)$$

where variables k and ψ_{sf} , represent the path curvature and the yaw angles of the Serret–Frenet frame, respectively. Variable \dot{s} is the velocity vector of the UAV along the path, written in the referential that parameterizes the path and V_t are the UAV ground speed. Variable y_1 represents the linear distance between the UAV and the path to be followed, and ψ refers to orientation tracking errors. The controller parameters correspond to g_1 and g_2 . Variables ψ_d and $\dot{\psi}$ are the parameters that mathematically characterize the problem.

Finally, the attitude control (including thrust, pitch and roll control) is sent to the UAV through the /mavros/setpoint_aw/attitude topic (see Figure 2).

The SILT simulation of the Guidance and Control node validated that the UAV could accurately follow a dummy target with a lateral error tending to zero and an average lateral error of 1.79 m, which means that the UAV was converging towards the loiter around the target. The dummy target was developed to randomly generate position, velocity, acceleration, angular acceleration and orientation to feed the MPF algorithm.

3.4.2. Target Detector

The Target Detector node corresponds to the detection phase of the target. In order to validate the Guidance and Controller module, the target detector block was initially implemented to detect a red block. Then, the OpenCV (OpenCV team, 2022) library was executed to detect the red color and locate it in a 2D image. Finally, a simulation was performed to confirm that the aircraft could detect the ground target properly.

3.4.3. Target Geolocation

Since a low-cost small UAV with a camera embedded is being used, the solution found for navigation, guidance, and control purposes was to use the Geolocation algorithm from Barber et al. (2006). Generally, the Geolocation algorithm estimates the position of a ground target through its location and motion streamed in the video sequence (Beard & McLain, 2012). The method is based on five different frames, the inertial frame (i), the gimbal frame (g), the camera frame (c), the body frame (b) and vehicle frame (v). Given the previously presented notation, the position of target in the inertial frame is computed by the target's pixel coordinates in the camera frame through equation

$$p_{obj}^i = \begin{pmatrix} p_n \\ p_e \\ p_d \end{pmatrix} + h \frac{R_b^i R_g^b R_c^g \check{l}^c}{k^i \cdot R_b^i R_g^b R_c^g \check{l}^c} \quad (3.2)$$

where, in general, R_g^b is the rotation matrix from the gimbal to the body, R_c^g is the rotation from camera frame to gimbal frame and R_b^i is the rotation from body to inertial. In addition, h is the UAV altitude, $\begin{pmatrix} p_n \\ p_e \\ p_d \end{pmatrix}$ are the UAV coordinates, k^i represents the Z axis of the inertial frame and \check{l}^c represents the normalized target's line-of-sight vector from the camera frame.

The Geolocation algorithm was implemented in the Target Geolocation module. Subsequently, this block was validated in two stages. First, it was tested to compute the position of a red target standing at a constant position. Secondly, the red target was assigned with motion to validate whether the Geolocation could estimate the target's position over time. Results show good performance from the implemented Geolocation algorithm.

3.4.4. Target Estimate

A Kalman Filter was implemented in the Target Estimate block to estimate and predict through linear dynamical systems the other parameters to feed the MPF algorithm (Kim & Bang, 2019). This filter also reduces the effect of high-frequency peaks from the Target Geolocation node. The filter uses a constant acceleration model following Newton's motion equations based on a dynamic model.

The filter was tested to estimate the target parameters in two scenarios, where the target was at a constant position and moving on a predetermined path. Results show that the filter could estimate the target parameters successfully, thus validating this module.

3.5.Closed-loop Validation

In order to finalize this first phase of validations, it was performed a general closed-loop SILT simulation of the four blocks previously mentioned with the red object moving in a predetermined realistic path. The simulation results enabled the conclusion that the UAV could

estimate the position of the red target with an average error of 8.7953 m and follow it with a lateral error oscillating around zero with an average lateral error of 1.22 m.

4. Ground Vehicle Detector

Detecting an object through aerial images is different from general object detection once the pictures "*lose their 'faces' because they are captured from a distance to the ground*" (Ju et al., 2020. p. 1). This research implements a YOLOv3 detector that follows a data-driven approach. Regarding the literature review on computer vision, the YOLO detector presented key advantages for this research, such as performing rapid detection, the capacity to analyse the whole image (Redmon et al., 2016) and improved small object detection (Redmon & Farhadi, 2018; Lu et al., 2018; Ju et al., 2020; Cepni et al., 2020).

4.1. System Setup

This section describes the aircraft, the camera used to capture the images for the dataset, and the different Gazebo Worlds considered to modify the background environment.

The aircraft used in this research was the fixed-wing standard plane, a UAV developed by PX4 autopilot. While choosing the plane that would be integrated into the simulations, one of the main concerns was whether this plane would be able to carry a camera. The camera used in this research was a camera plugin provided by PX4 that operates in the visible spectrum.

Various parameters from the camera were modified to increase the dataset's diversity. Changes to the camera included adjusting the pan, tilt, field of view, and resolution to get different perspectives of the vehicles.

In order to ensure diversity in the dataset, four scenarios were used for image capture. Up to six cars were placed with different models, sizes, and colour characteristics, along with these scenarios.

4.2. Dataset

Several datasets of aerial car images were proposed in the literature, such as Vehicle Detection in Aerial Imagery (VEDAI), introduced by Razakarivony & Jurie (2016), and Vehicle Aerial Image Dataset (VAID), developed by Lin et al. (2020). However, those datasets mainly use pictures taken from the upper perspective of a car, which is not ideal for the problem at hand since the UAV will capture the cars from a side perspective.

The developed dataset contains 1153 images of cars from different models and sizes. As stated in the previous section, the pictures were taken from a UAV at different heights, perspectives, and camera settings in the four simulated Gazebo worlds. In each image, the individual labelling of the objects of interest was performed by a human operator through a labelling tool called Label-Studio (Label Studio, 2022). The bounding boxes' width and height in pixels varied from $X=[0.4218, 80.8155]$ and $Y=[0.2109, 72.0788]$, respectively.

4.3. Detector Implementation

Since the goal regarding computer vision is to detect a car, an existing YOLOv3 repository within the community, duly validated, has been used. The repository used was TrainYourOwnYOLO, available on Github and developed by Muehlemann (2022). The detector used pretrained weights and was further trained with the car dataset mentioned above.

Keras and TensorFlow were the libraries used to implement the deep learning techniques. In addition, the Adaptive Moment Estimation Optimizer (Adam) was used as an optimization algorithm to train the deep learning model (Ezat et al., 2021).

The dataset proposed for this study was divided into 90% for the training set and 10% for the validation set. Later, forty more images were captured to test the detector after the network training. Different batch sizes and learning rates were used during the neural network training. Results from the training loss graph displayed in Figure 3 have shown a good fit learning curve by the model.

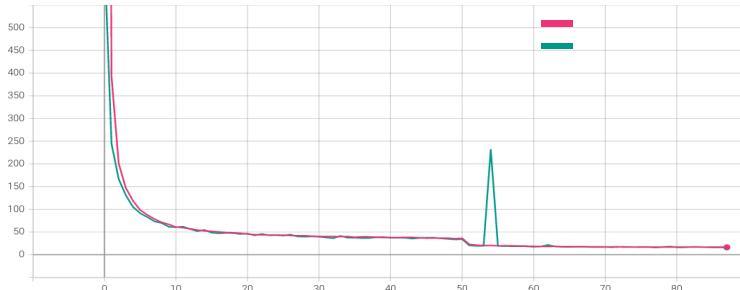


Figure 3 - Average loss function regarding the training of the neural network.

4.4. Neural Network Evaluation

The network evaluation was performed with 125 images with several backgrounds and a different number of ground vehicles. The threshold of the evaluation was changed in order to understand how it affected the mean average precision (mAP). As a result, the mAP increased linearly with the decrease in intersection over union (IoU) threshold, as displayed in Table 1. This result is expected since the system accepts more detections by the network as true positives with the threshold decrease. Therefore, the results of the network evaluation were acceptable for the detection problem.

Table 1 - Network evaluation results for different IoU Threshold.

IoU Threshold	mAP
0,3	0,703
0,4	0,533
0,5	0,331
0,6	0,133

5. Closed-loop Validation

In order to validate the closed-loop, the architecture proposed in Figure 2 was implemented. Until this section, the Guidance and Control, Target Geolocation and Target Position modules with the color filter have been validated. The previous section validated the YOLOv3 detector itself in a realistic environment. Therefore, the Target Detection block is now replaced by the vehicle detector described in Section 4.

Previously, the detection of the red block was performed at a rate of 10 Hz, enabling the rate of 2-D coordinates publication to be equal to the rate of measurement of the Geolocation. So, each Kalman Filter update had a new Geolocation measurement. Since the MPF also runs at a rate of

10 Hz, the information from the target to feed the Guidance and Control module is always given by the Kalman Filter updated estimate.

Conversely, when introducing the YOLO detector, since the frequency between detections is approximately 0.15 Hz, it is considerably slower than the rate of the MPF. To solve this issue, the Target Geolocation rate was changed to match the rate of detections, and the Target Estimate maintained a rate of 10 Hz, equal to the Guidance and Control node. So, when detection occurs, the Target Geolocation calculates the estimated position, and until the next detection, the Target Geolocation do not send position measurement to the Target Estimate. As a result, the prediction phase of the Kalman Filter in these periods is used to feed the MPF.

5.1. Closed-loop Validation with the Target Standing at a Constant Position

Initially, the closed-loop was tested with a vehicle standing in a constant position in the Runway Gazebo world, chosen to be the realistic environment for the final simulation. Results showed that the aircraft could maintain a continuous loiter around the target. The average position error by the Target Position block was 5.66 meters. Moreover, the lateral error tends to be bounded around zero with an average error of 4.24 meters.

Regarding Computer Vision, a threshold value of 60% confidence was restricted for the detection to be considered. During the simulation, 415 frames of the video were analysed, of which 314 obtained detections and 99 had no detections. Of the 314 frames detected, 27 detected more than one car. Therefore, the closed-loop architecture with the object stopped in a fixed position was successfully validated concerning the previous results.

5.2. Closed-loop Validation with the Target Moving

The simulation considering a moving target was conducted based on path as similar as possible to a potential car movement, as shown in Figure 4 in the blue line. Several changes of direction, velocities, and stops were considered.

After performing several simulations with the proposed target's path, the time between detections and the ground vehicle movement provided poor estimations of acceleration by the Kalman Filter. Furthermore, those acceleration estimations impaired the MPF tracking, leading the simulation to have false detections, which generated high lateral errors. As a result, dynamic model of the target in the Kalman filter was updated by considering a constant velocity model.

Figure 4 shows the upper perspective of the implemented target tracking control system's simulation. Visually analysing the graph, it is possible to state that the estimation of the target's coordinates (represented by the red track) corresponds, in general, to the trajectory performed by the car. Indeed, the mean average position error, 11.23 meters, and the standard deviation, 7.16 meters, were within the expected range for this simulation. Moreover, the UAV can efficiently maintain continuous loiters around the target, both in straight lines and in curved segments, which tend to be the most demanding sections for the tracking controller, once the car changes direction and speed rapidly. The lateral error does not continuously tend towards zero; it makes a harmonic effect centred on zero and peaks at -20.78 and 34.90 meters, which are acceptable results for this research.

In what concerns the detection module, from the 2754 analysed frames, only 1878 included detections above the 60% threshold, which means that the Target Estimate block with the Kalman Filter was decisive in predicting the coordinates of the target in between (true positive) detections. In addition, of the frames that had detection, 109 of them obtained 2 detections. Considering all that has been presented, it was possible to validate that the proposed software architecture could detect, extract specific parameters and track a ground vehicle autonomously.

6. Conclusion

6.1. Conclusions

The present article aimed to implement an adequately validated and documented open software architecture based on the hardware architecture proposed by Silva et al. (2020) and on the academic community's available and most used software components. This software architecture goal was to constitute a modular tool that allows rapid prototyping of control algorithms and computer vision. This goal was validated in this article by implementing a case study where a fixed-wing UAV is required to detect and track a moving ground target.

A literature review was carried out, which aggregated the theoretical basis of this article. Initially, the hardware architecture from Silva et al. (2020) was reviewed, and the different software solutions were studied in depth. Subsequently, two areas were addressed, namely Guidance and Control Techniques and Computer Vision.

After this brief review, the hardware/software architecture was presented, and the software tools selection was carried out. Afterwards, the software architecture was proposed, and each block was explained in detail, tested in a simulated environment, and successfully validated. This architecture comprises four main blocks, Gazebo simulator, PX4 autopilot, QGC and ROS environment.

The last Section comprised the final simulation where the closed-loop was validated. This simulation was used together with the previously tested Guidance and Control, Target Geolocation and Target Estimate nodes and the Target Detector, which uses the YOLOv3 detector. Since these sub-modules were validated individually, this final closed-loop simulation aimed at providing that the architecture could accomplish the proposed mission. In summary, the proposed architecture enabled a UAV to detect and track a car fully autonomously.

The main objective, which was developing a software architecture with low-cost tools proposed by the community, was achieved. Moreover, the Guidance and Control and Computer Vision implementation was accomplished with success, first individually and then as a closed-loop simulation. As a result, the surveillance mission of tracking a ground vehicle through Computer Vision proposed for this research was also attained.

6.2. Future Work

During the development of this research, several important decisions were needed to be made, particularly the tools used for the architecture, namely the simulator, ROS versions. Some of the chosen paths led to problems due to no previous knowledge of the specific topics, thus resulting in limitations in certain areas and restricting the time available to develop this project.

In what concerns the Gazebo simulator and ROS, the versions used caused some compatibility issues when implementing the detector due to the python versions. In addition, the adoption of Gazebo 11 could enhance the simulation for several reasons in terms of the improved quality of the video captured from the camera and opening doors to all the latest projects developed by the community.

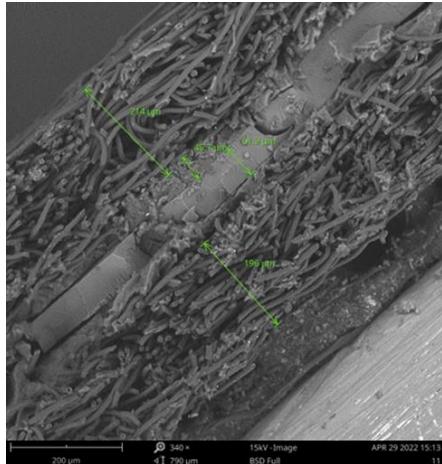
Finally, future studies could focus on improving the YOLOv3 detector or studying other state-of-art detectors. Another suggestion would be to follow up on this same work, moving forward with the hardware-in-loop phase, and test this same architecture on board a CIAFA UAV in a test flight.

7. References

- APM Planner 2. (2021). *APM Planner 2 Home*. ArduPilot Versatile, Trusted, Open. <https://ardupilot.org/planner2/>
- ArduPilot Dev Team. (2019). *MAVProxy Developer GCS*. ArduPilot Versatile, Trusted, Open. <https://ardupilot.org/mavproxy/index.html#home>
- ArduPilot Dev Team. (2021a). *Companion Computers*. ArduPilot Versatile, Trusted, Open. <https://ardupilot.org/dev/docs/companion-computers.html#companion-computers>
- ArduPilot Dev Team. (2021b). *Mission Planner Home*. ArduPilot Versatile, Trusted, Open. <https://ardupilot.org/planner/>
- ArduPilot Dev Team. (2021c). *Sik Telemetry Radio*. ArduPilot Versatile, Trusted, Open. <https://ardupilot.org/copter/docs/common-sik-telemetry-radio.html>
- ArduPilot Dev Team. (2021d). *Simulation*. ArduPilot Versatile, Trusted, Open. <https://ardupilot.org/dev/docs/simulation-2.html>
- Barber, D. B., Redding, J. D., McLain, T. W., Beard, R. W., & Taylor, C. N. (2006). Vision-based Target Geo-location using a Fixed-wing Miniature Air Vehicle. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 47(4), 361–382. <https://doi.org/10.1007/s10846-006-9088-7>
- Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). *Small unmanned aircraft: Theory and practice*. Princeton University Press.
- Cepni, S., Atik, M. E., & Duran, Z. (2020). Vehicle Detection Using Different Deep Learning Algorithms from Image Sequence. *Baltic Journal of Modern Computing*, 8(2), 347-358. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2020.8.2.10>
- Collins Aerospace. (2022). *Piccolo™ Autopilots*. Collins Aerospace. <https://www.cloudcaptech.com/products/piccolo-autopilots>
- Dronekit. (2015). *Dronekit Developer Tools for Drones*. Dronekit. <https://dronekit.io/>
- Ju, M., Luo, H., & Wang, Z. (2020). An improved YOLO V3 for small vehicles detection in aerial images. *2020 3rd International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence*, 1–5. <https://doi.org/10.1145/3446132.3446188>
- Kim, H.-M. & Lee, D. W. (2019). Integrated simulation environment for heterogeneous unmanned vehicles using ROS and Pixhawk. *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 27(3), 20.
- Kim, Y., & Bang, H. (2019). Introduction to Kalman filter and its applications. *Introduction and Implementation of the Kalman Filter*, 1-14. <https://www.intechopen.com/chapters/63164>
- Koenig, N., & Howard, A. (2004). Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, 3, 2149–2154. <https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389727>
- Label Studio. (2022, May 26). *Open Source Data Labeling Tool*. Label Studio. <https://labelstud.io/>
- LambDrive. (2016a). *Firmware—On-board Flight Control Software for Pixhawk Family of Controllers*. LambDrive. <https://www.lambdrive.com/depot/Robotics/Controller/Firmware/index.html>
- LambDrive. (2016b). *Ground Control Station*. LambDrive. <https://www.lambdrive.com/depot/Robotics/Controller/Ground-Control-Station/>
- Lu, J., Ma, C., Xing, X., Zhang, Y., wang, Z., & Xu, J. (2018). A Vehicle Detection Method for Aerial Image Based on YOLO. *Journal of Computer and Communications*, 6(11), 98-107. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=88545>
- Muehlemann, A. (2022, April 8). *TrainYourOwnYolo*. Github.

- <https://github.com/AntonMu/TrainYourOwnYOLO>
- NVidia Developer. (2022). Jetson TX2 Module. <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-tx2>
- Oh, H., Kim, S., Shin, H.-S., White, B. A., Tsourdos, A., & Rabbath, C. A. (2013). Rendezvous and Standoff Target Tracking Guidance Using Differential Geometry. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 69(1–4), 389–405. <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9751-0>
- OpenCV team. (2022). OpenCV. OpenCV. <https://opencv.org/>
- Pastor, E., Lopez, J., & Royo, P. (2006). A Hardware/Software Architecture for UAV Payload and Mission Control. *2006 Ieee/Aiaa 25TH Digital Avionics Systems Conference*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/DASC.2006.313738>
- PX4 User Guide. (n.d.). PX4 Autopilot. *PX4 Autopilot*. Retrieved 26 June 2021, from <https://px4.io/>
- PX4 User Guide. (2021a, January 31). Offboard Mode. PX4 Autopilot. https://docs.px4.io/v1.12/en/flight_modes/offboard.html
- PX4 User Guide. (2021b, March 4). ROS (Robot Operating System). PX4 Autopilot. <https://docs.px4.io/v1.12/en/ros/>
- QGroundControl. (2019). QGroundControl. *QGroundControl*. <http://qgroundcontrol.com/>
- Raspberry Pi Foundation. (n.d.). Raspberry Pi Foundation. Retrieved 23 May 2022, from <https://www.raspberrypi.org/>
- Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement. *ArXiv:1804.02767 [Cs]*. <http://arxiv.org/abs/1804.02767>
- Silva, R., Félix, L., & Oliveira, T. (2020). *Projeto Conceptual de uma Aeronave Pequena de Baixo Custo para Aplicações em Controlo Cooperativo*. Academia da Força Aérea Portuguesa.

Hydrogen Fuel Cell for Unmanned Aerial Systems: Operational Environment Contamination Response



Autor: José Guilherme Costa Moura

Aspirante a Oficial Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Piloto Aviador
Academia da Força Aérea, Sintra

Orientador: MAJ/ENGAER João Vítor Aguiar Vieira Caetano
Força Aérea Portuguesa, Academia da Força Aérea, Sintra

Coorientador: Doutor Paulo António Alves Ribeirinha
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Abstract: Air contaminations found in areas of operation of the Portuguese Air Force cause significant degradation in the aircraft that there operate. Moreover, durability is one of the extensive challenges in proton exchange membrane fuel cells, as chemical and physical degradation phenomena hinder the system's performance over time. This article aims to study the response of fuel cells to contaminations mimicking those found in military aircraft operating conditions.

After system optimisation and baseline testing, NaCl, CO, and NO contaminations were admitted into the fuel cell cathode. Firstly, in values similar to those found in wildfire and maritime environments, and then in more significant concentrations. Contamination periods vary from 30 to 60 hours. The NaCl and NO tests revealed that these contaminations have a minimal reversible effect on performance for the periods, conditions, and concentrations studied.

CO tests determined some irreversible losses, namely a 17 % drop in Electrochemical Surface Area, ECSA, suggesting significant blockage of catalytic sites. Hence, prolonged wildfire operation is unadvised. Lastly, *ex-situ* analyses were undertaken to support the performance results.

Keywords: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC); Degradation; Membrane Poisoning; Impedance Spectroscopy; Electrochemical Surface Area (ECSA).

Introduction

In July of 2020, the Portuguese Minister Council approved the National Energy and Climate Plane 2030 (*Plano Nacional Energia e Clima 2030 -- PNEC 2030*). This programme sets concrete climatic and energetic goals for the year 2030, like reducing greenhouse gas emissions by 45 to 55 %, and reaching an overall energy efficiency of 32.5 % (Presidência Do Conselho De Ministros, 2020).

As a result of these determinations, efforts have been made to reduce the carbon footprint of the transport sector. However, lithium battery technology, the most common application for tactical UAS, provides lower specific power and energy (Lapeña-Rey *et al.*, 2017) than fossil fuel counterparts. On the other hand, hydrogen fuel cells offer rapid refuelling, higher specific power and specific energy, higher efficiency, low noise, low infrared signature and, since the only product of fuel cell propulsion systems is water, zero emissions. (Pan *et al.*, 2019).

As stemmed from above, the main objective of this work is to test the concept of a zero-emission hydrogen fuel cell system as a mean of electric propulsion for a tactical low weight fixed-wing Class I UAS, adapted for the Portuguese Air Force's operational needs. This work aims to **test a generic fuel cell in environments mirroring the ones faced by UAS in real areas of operation of the PAF**.

Furthermore, a set of secondary objectives was defined: *i)* Overview of the available technology and current state of the technology. *ii)* Comparison and selection of the possible fuel cells stacks to be used by CIAFA. *iii)* Performance analysis and characterisation of the single cell used in the practical study. *iv)* Contamination tests simulating environments 500 ft above the ocean and 500 ft above wildfires. *v)* Analysis of results and impact on implementation of hydrogen fuel cells in a PAF designed UAS.

1 Literature Review

1.1 PEMFC

The conventional PEMFC consists of three main components: an anode, a proton exchange membrane (PEM), and a cathode. Hydrogen oxidation occurs at the anode while oxygen reduction at the cathode. These reactions generate an electric potential difference between the electrodes (Pt-based) that can then be used to produce work. The entire reaction occurs if the electrolyte allows proton transport and isolates electrically both electrodes. (Kunusch *et al.*, 2012).

The cells are connected in series in a stack, this is achieved using bipolar plates, that serve as means of feeding oxygen to the cathode and fuel gas to the anode.

Furthermore, electrodes in the PEMFC are composed of a gas diffusion layer (GDL) and a catalyst layer (CL). The GDL, usually a carbon paper or cloth that diffuses the gas into the catalyst, creates an electrical connection between the bipolar plate and the catalyst. The CLs are usually made of Pt supported on carbon black mixed with an ionomer (Holton & Stevenson, 2013; Kunusch *et al.*, 2012; Pan *et al.*, 2019).

1.2 Fuel Cell Degradation

Reduction in cell performance, caused by chemical and physical degradation phenomena, limits PEMFC durability and hinders its performance over time (Gazdzick *et al.*, 2016).

Poisoning can trigger some degradation mechanisms. The most significant are the following (Yuan et al., 2011): *i)* Kinetic effect, caused by the poisoning adsorption of both anode and cathode catalyst sites, blocking them and reducing the electrochemical surface area (ECSA). *ii)* Conductivity effect, caused by impurities accumulation in the membrane and ionomer, lowering of protonic conductivity. *iii)* Mass transfer effect, due to deviations in the structure and hydrophobicity of the CLs and/or GDL.

Several authors studied the output impact of different gas contaminants in fuel cell supply, namely nitrates and sulphites, (Jing et al., 2007, Hongsirikarn, 2010, Uddin et al., 2015), and Nagahara et al., (2008)). Nagahara et al., (2008) established that sulphur compounds cause the most severe performance loss, which can be attributed to kinetic losses. The same study also suggested that high relative humidity (RH) operation resulted in almost complete recovery in performance.

The CO contaminations in the hydrogen supply has been widely debated in literature, (Valdés-López et al., 2020, Jiménez et al., 2005; Pérez et al., 2014). Pérez et al., (2014), recorded, with one ppm CO in the anode and 70% fuel utilization, a 50 mV drop (representing 10 % initial voltage) in 50 minutes. However, literature is scarce in air stream carbon monoxide contaminations. Only Moore et al., (2000) conducted a comparable experiment, assessing the effect of various contaminants, including CO, on the air intake, recording 4% reversible performance drop at 20 ppm in 15 min.

Likewise, only a few authors studied the influence of salt particles in the cathode air stream, (Mikkola et al., 2007; Uemura et al., 2017; Yan et al., 2011). The authors registered a decrease of effective surface area of the platinum catalyst by 22.6%, and in long operation time a declination rate of 1.1 mV/h for NaCl air fuel gas mixture, in separate experiments. Table 1.summarizes the FC performance loss in the presence of contaminates in the cathode and anode.

Table 1- Contaminations in literature summary

Contamination	Admission Mean	Possible Operational Cause	Result	Reference
NaCl	Direct Solution Admission in cathode	None	Irrecoverable 33 % performance loss in 100 h	(Mikkola et al., 2007)
	Salt Crystals in cathode (Ultrasonic vibrations + heated pipeline)	Operation in dry salt-rich environment	ECSA decreased by 22.6 %	(Uemura et al., 2017)
	Sea water vapours in air stream	Sea surface operation	50 % performance decay in 48h, full recovery after 40 h clean air	(Sasank et al., 2016)
	Fine mist in air supply	Sea Operation	No significant influence	(Yan et al., 2011)
COx	Carbon monoxide cathode admission	Wildfire operation	4 % reversible performance drop at 20 ppm in 15 min	(Moore et al., 2000)
	Carbon monoxide in hydrogen supply	Impurity in H ₂ tank	18 % reversible performance drop at 100 ppm in 5h	(Jiménez et al., 2005)
			10 % performance drop in 50 min	(Pérez et al., 2014)
NOx/ SOx	SO ₂ /NO ₂ in air admission	Wildfire operation	35 % partially reversible performance loss at 1 ppm SO ₂ in 100 h	(Jing et al., 2007)
			10 % reversible performance loss at 1 ppm NO ₂ in 100 h	

2 Materials and Methods

2.1 Test Bench

The setup was composed by an oven (Termolab) to control the cell temperature. The gases were fed to the cell using mass flow controllers (Alicate Scientific). The gases humidification was assured using two bubblers and two HPLC pumps that allow humidification ranging between 0-100 %. Two separate condensers, followed by two pressure controllers (Alicate Scientific), allow the pressure control of the cell. The unit was controlled using a LabView software interface.

For the electrochemical characterisation and data recording, the equipment used in a first phase was a Zahner potentiostat IM6e and a PP240 load. These equipments were then substituted by the newer versions, Zenium PRO potentiostat and PP241, which were used to complete the remaining tests. For characterization and data acquisition control, the Thales software was used.

2.2 Cell and Membrane

The membrane used for all tests was a Quintech® Nafion 212 (MEA-H50-N212), with 50 cm² of active area (7.23 x 7.27 cm), 60 µm membrane thickness, and loading of 0.6 mg/cm² Pt and 0.3 mg/cm² Pt, for the cathode and anode,

respectively. The remainder cell structure, flow fields, current collectors and end plates are experimental and were designed by Pragma Industries® for FEUP.

2.3 Contaminations and Admission Means

The PAF UAS missions involve maritime search and wildfire surveillance, therefore two categories of tests were conducted to test the PEMFC performance under these possible hazardous environments. Carbon monoxide (CO) / nitric oxide (NO) and sodium chloride (NaCl) were the chosen pollutants to simulate wildfire and seawater contaminations, respectively.

This work proposes starting with contamination values that recreate the concentrations recorded in the atmosphere and gradually progressing to higher values, which accelerate the contamination effects. All contamination periods were conducted between 15 and 20 hours.

The NaCl contaminant tests were conducted based on recordings by the following authors: (Blanchard *et al.*, 1984; Blanchard & Woodcock, 1980; Mikkola *et al.*, 2007; Smirnov *et al.*, 2003). A value of 500 nmol / m³ was used to recreate sea salt levels at 100 m altitude or above.

The cathode side pump injected a NaCl solution into the air stream, vaporising in the bubbler. Calculations were made to determine the concentration of the solution injected into the bubblers in order to have a 500 nmol / m³ in the cathode air supply, and the value of 0.1 mg/L was reached. The two subsequent contaminations were chosen to gradually reach a contamination value with a visible influence on the cell's performance.

For the wildfire experiments, atmospheric data was used to obtain a simulated environment closer to reality in coordination with the SmokeStorm project from the Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), part of the University of Coimbra. Through surface and altitude data recorded by ADAI, an estimated value was calculated of the concentrations of the main gases released in a wildfire present at 100 m AGL. The values obtained were 13 ppm for carbon monoxide (CO) and 1 ppm for nitric oxide (NO) (Miranda, 2004; Miranda *et al.*, 2005, 2010, 2012; Valente *et al.*, 2007).

2.4 Characterisation Techniques and Test Protocol

I-V Curves, Voltage Degradation, Cyclic Voltammetry (CV), and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) were conducted in the Thales system for *in-situ* characterisation.

The curves were obtained using a load in galvanostatic mode, monitoring the current at given values for potential, from open circuit voltage (OCV) to high current densities (0.7 A/cm²), in pre-established current points, with retention times of one minute. Two polarisation curves were recorded in the ascending and descending directions for each life stage of the experiment, and cell performance above 0.7 A/cm² was not studied due to equipment limitations.

The degradation tests were conducted in galvanostatic mode at current density of 0.4 A/cm², and at potentiostatic mode at a 0.7 V potential, during 15-20 hours in each contamination value and were repeated at least one time to assure validity and consistency in results.

For CV measurements, a gas flow of 200 mL/min of H₂ and N₂ was fed to the anode and the cathode, respectively, a scan rate of 20 mV/second was applied, and the working pressure was lowered to 1.5 bar.

Five EISs were conducted in each test set, in a frequency range from 100 mHz to 10 kHz, at the current densities of 0.02, 0.2, 0.4 and 0.5 A/cm² in the galvanostatic mode, and 0.7 V in the potentiostat mode. The impedance graphics in this article are represented in the Nyquist plot.

Some *ex-situ* techniques were used to investigate the presence of contamination residues in the MEA after the end of tests. The techniques used were Scanning Electron Microscopy (SEM), Temperature Programmed Desorption (TPD), and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS).

3 Results and Discussion

3.1 Fuel Cell Performance Assessment

Before the contamination sets, a 20-hour activation and stabilization test was conducted to determine the MEAs performance in optimal operating conditions to compare it with contamination sets. This test was recorded using the same operating conditions as the contamination sets, except pure air was used. After the activation, the cell's performance was recorded for 20 hours.

Data shows a stable operation over time. The overall tendency of the system is a slight increase in potential of 0.2 mV h⁻¹, this behaviour points to a robust system.

3.2 Maritime Operation - NaCl Contamination

In the NaCl contamination, the three consecutive contaminations were introduced in the form of a NaCl water solution in the air side bubbler preceding the cell. This contamination admission method was chosen to simulate real operational conditions.

Figure 1 shows the *voltage vs. time* response of an operating fuel cell exposed to NaCl, at 0.4 A cm^{-2} . The contamination started at $t = 0 \text{ h}$, and the concentration values are labelled on the figure, represent the NaCl concentration in the solution present in the cathode side bubbler for the correspondent period.

This test set shows an initially stable performance, and subsequent performance lost, as the overall voltage drop is 0.3 mV h^{-1} . The instability in the last 40 hours is likely due to over humidification of the system.

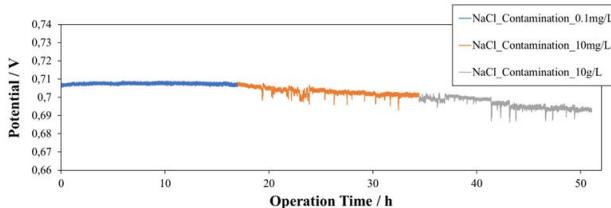


Figure 1- NaCl contamination: Potential evolution with operation time with increasing NaCl contamination injection in the cathode, (concentrations of 0.1 mg L^{-1} , 10 mg L^{-1} , 10 g L^{-1} were added to the air inlet side bubbler).

This behaviour was fairly expected, as in the Mikkola *et al.*, (2007) experiment, the highest performance drop was $4 \text{ mA cm}^{-2}\text{h}^{-1}$, 13 times larger than the values recorded in this experiment. This discrepancy can be related to the admission method, as Mikkola injected the liquid solution directly into the cathode air stream, causing reversible degradation in the cell by accumulation of salt crystals in the GDL.

When comparing the characterisation set results, no significant reduction in performance was recorded in polarisation curves, EIS tests, or CVs. The polarisation curves recorded before (BoL) and after (EoT) the contamination with salt at 0.4 A cm^{-2} are almost coincident. This leads to the assumption that salt is inert and do not affect the MEA, as the performance remained the same. The CV measurements show a small decay in ECSA (12.4 to $11.5 \text{ m}\Omega^{-1} \text{ gPt}^{-1}$) associated with natural cell degradation.

EIS analysis was conducted before and after salt contaminations at different current densities, (Figure 2). No substantial changes were observed, neither in the ohmic nor in the charge transfer resistances. The ohmic resistance was constant throughout the experiments, being around $100 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$.

Notwithstanding, some instability is found in the low-frequency arc across the concerning tests, and in the the graph E of Figure 2, performed at high current density (0.6 A cm^{-2}), the arc of the Nyquist plot increased. This suggests that a slight intensification of mass-transport resistance can be observed for high currents, although this is not observable in any other current densities; which can be related to an accumulation of water on the cell, blocking the active catalyst sites, hindering the mass transport of the reactants towards the Pt catalyst.

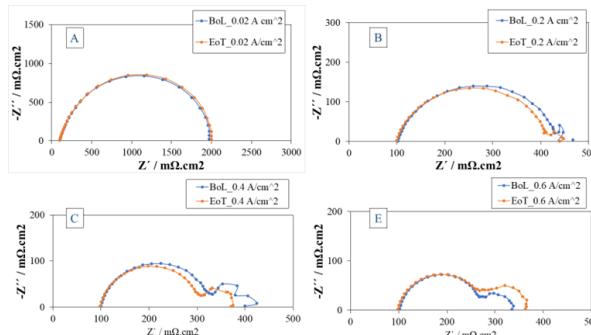


Figure 2- Second NaCl contamination test: EIS Nyquist plots performed at the BoL and EoT characterisation, performed at multiple amplitudes.

3.3 Wildfire Operation - CO and NO Contamination

This contamination set aims to simulate fuel cell operation in an UAS in wildfire conditions. This section is divided into CO, and NO tests conducted separately.

3.3.1 CO Cathode

Two CO contamination tests were recorded for reproducibility purposes, using two commercial MEAs. The first experiment consisted of three contaminations, of 13 ppm, 50 ppm and 75 ppm of CO, added to the cathode inlet air stream, for 20 hours each. The first contamination (13 ppm) is based on collected data by ADAI and simulates a working PEMFC in a 500 ft atmosphere, above a wildfire. The CO concentration was then increased in the two subsequent contaminations to access the performance under severe operating conditions. To validate the results obtained in the previous test, a second MEA was tested using a CO concentration of 50 and 75 ppm.

In Figure 3 (left), the plot for *potential vs. operation time* is presented. In the first 45 hours of operation, the performance decay was significant, averaging 0.5 mV h^{-1} . When the CO concentration was increased to 75 ppm, instability of the system was observed, showing a performance decay of 2.6 mV h^{-1} CO concentration (75 ppm). After the CO contamination, pure air was fed and the performance recovered almost completely – data not shown.

Figure 3 (right) shows the results obtained from the second test. The performance decay averaged 0.38 mV h^{-1} , which is aligned with the previous result for the first 45 h. This suggests that a CO concentration of 75 ppm has some effect but is not a severe for the fuel cell performance.

Nonetheless, the short bibliography referring to the cathode side CO contamination, pointed to a 4 % reversible performance drop at 20 ppm during a 15 min duration contamination (Moore *et al.*, 2000). In this study, for instance, a 10 % reversible performance drop was observed for 50 ppm, during 12 h test (Figure 3b).

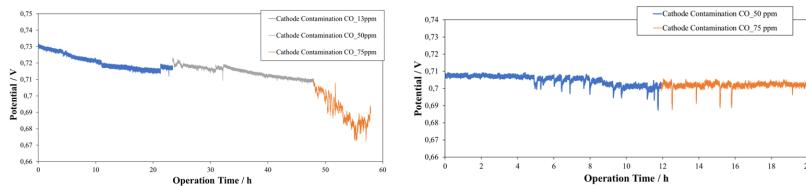


Figure 3-First CO contamination: Potential evolution with operation time, with increasing CO contamination injection in the cathode, (concentrations of CO were added to the PEMFC air inlet) (left) and second CO contamination: increasing CO contamination injection in the cathode (right).

The I-V curve plot in Figure 4 (left), for the second MEA, revealed a significant degradation in the high current density range, while in the activation and ohmic area, the performance remained stable, indicating that the main effect of the contamination was in the mass transport region; at 0.7 A cm^{-2} , the voltage drop was 6.5 %, in which potential decayed from 0.64 V to 0.60 V , from the BoL to the EoT.

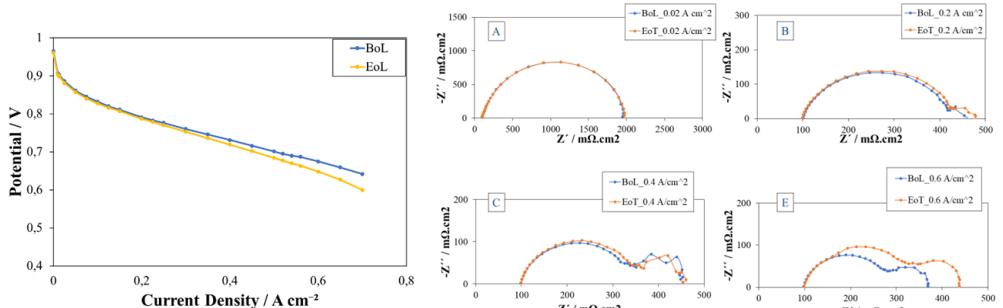


Figure 4- CO cathode second contamination: Descending Polarisation curve in BoL and EoT characterisation sets. (left) and Second CO contamination: EIS Nyquist plots performed at the BoL and EoT characterisation, being performed multiple amplitudes (right).

Nyquist plots for the EIS tests conducted before and after cathode carbon monoxide contamination show the $y=0$ value and the medium-frequency arc remained stable across all trials, meaning this contamination had minimal effect on ohmic and charge transfer resistances. However, mostly in high current density EISs performed, such as the one present in *Figure 4(right)-E* the low-frequency arc is slightly bigger in the EoT tests, showing an increase in mass-transport resistance throughout the cathode contamination. In fact, this increase was of 12.5 % (the total resistance increased from 80 to 90 $\text{m}\Omega \text{ cm}^2$, from the BoL to the EoT).

3.3.2 NO Contamination

Two contaminations were administered into the cathode, one at 2 ppm and the other at 20 ppm. The first had a duration of 15 hours and the latter of 25 hours.

NO contamination in the cathode had little to no effect on the cell at the periods and concentrations investigated. No significant decay occurred in the contamination period. The overall potential evolution was -0.05 mV h^{-1} and can be seen in *Figure 5*.

From the scarce studies of cathode NO contaminations, Talke et al. (2018) recorded a 33 % performance drop in just 50 minutes at 10 ppm. Similarly, Jing et al. (2007) recorded 100 hours of NO_2 contamination at 1 ppm with another nitrogen compound, documenting a 10 % reversible performance loss. Compared to the 0.7 % potential drop recorded in this 40-hour test, these degradations are very high. This discrepancy can be caused to the stoichiometry of the fed gases being much higher and the platinum loading of our MEA being lower in bibliography (Misz et al., 2016). Moreover, some tests in the bibliography were recorded using dry gases, and as high humidity can attenuate the contaminant effect (Uemura et al., 2017).

The I-V curves recorded show curious results. Not only there was no permanent degradation in the fuel cell, but a slight increase in the high-density range values was recorded after the NO contamination, pointing to a decrease in mass transport resistances.

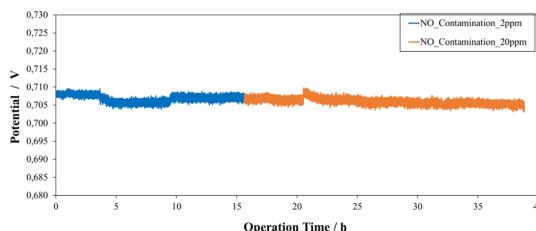


Figure 5- NO contamination: Potential evolution with operation time, for fixed 0.4 A cm^{-2} current density, with increasing NO injection in the cathode (concentrations of 2 ppm and 20 ppm of NO were added to the air inlet stream).

3.4 Ex-situ test analysis

Using SEM technology, samples from the membrane surface, membrane cross section and inner and outer GDL surface were scanned for particle deposits, CO migration and cross-section thickness.

In the NaCl membrane, some unusual contaminations were found; however, their nature could not be determined. And the amplified image of the anode GDL contaminated with CO has fibres with more degraded physical appearance compared with the other samples. The measured thickness of the membrane has not suffered significant alterations. As measurements of following membranes suggest: Pristine) 61.9 μm ; NaCl) 63.6 μm ; CO) 58.3 μm

TPD and MS results concluded that the pristine sample and CO contaminated samples showed no significant difference in CO amounts.

Also, as all operating conditions remained the same across samples, it is possible to associate signal intensity with CO concentration. Moreover, higher CO concentration was adsorbed in the anode than in the cathode despite the lower contamination period, as expected and validated by *in-situ* results. It is also seen that the adsorption recorded in the GDL was significantly lower than the one present in the whole MEA, this means most CO molecules were adsorbed in the catalyst layer.

ICP analysis showed that no significant NaCl contamination remained in the cell after recuperation. In line with the obtained data supporting the thesis, no permanent damage was recorded in the cell as Na^+ ion concentration in the samples was residual in all samples, with about 3.4 ppm concentration in the solution. This is likely to be associated with measurement errors and external contaminations.

3.5 Set comparation

Figure 6 shows the mean hourly performance evolution throughout the whole contamination period for all the contaminations and the baseline test referred to as Pristine. The figure is divided into fixed current tests (a) and fixed potential tests (b).

Pristine tests have shown a slight increase in performance during the 20 hours of operation. This reinforces the idea that the 20 hours of break-in procedure is not enough for the cell to reach its full potential. These values will serve as a reference for the contamination tests.

Salt tests, NaCl 1 and NaCl 2, recorded in potentiostat and galvanostat mode, respectively, show equivalent results. A low recoverable degradation rate was observed in both tests, when compared to the respective baseline tests.

CO Cathode 1 has roughly double the potential degradation rate of NaCl 2; however, CO Cathode 2 had less potential degradation than CO Cathode 1, being approximately 16% more harmful than the salt test, NaCl 2. This difference can be explained by the contamination period, as CO Cathode 2 set elapsed for a total of 20 hours, and the two others for a 60 hour period each.

The anode CO contamination values are not present in the Figure 6 graph for scale purposes. The potential evolution rate in this test was around 130 mV h^{-1} , representing by far the most aggressive contamination. Potential decay was 220 times steeper than the highest recorded in the cathode, also by carbon monoxide. Keeping in mind that the contamination value used in the anode was equal to the intermediate one in the cathode, 50 ppm, we can conclude that the CO adsorption is much stronger in the anode. This reflects on irreversible losses demonstrated in the ECSA and polarisation curves.

The Nitric Oxide set displays the lowest contamination rate of all results. A degradation rate very close to zero suggests no contamination effect on the performance.

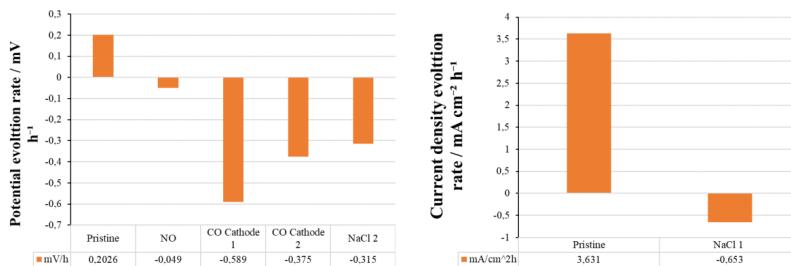


Figure 6- Comparison of the performance evolution of different test sets: Galvanostat mode (left) and Potentiostat mode (right)

In CV analysis, ECSA was calculated, and the surface area reduction after each contamination is displayed in Figure 7 in the form of percentage. A minor decay can be observed in NO and NaCl 2 contaminations due to regular cell operation. In these sets, it can be concluded that there were no significant alterations to the electrochemical surface area, and the active sites suffered minimal to no degradation.

The carbon monoxide cathode contaminations, represented by COcat1 and COcat2, show a large ECSA drop, and the longest contamination, COcat1, also suffered the most significant area drop. This suggests that some active sites might have been obstructed by CO molecules adsorption. This is validated by the decrease in the mass transport region in the I-V curves and EIS tests.

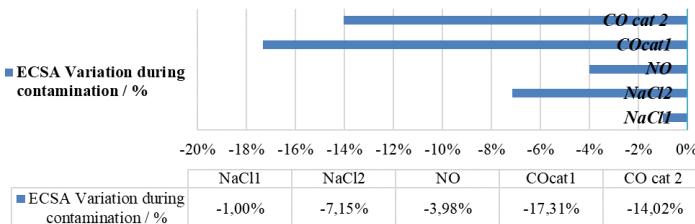


Figure 7- Comparison of the ECSA variation during all test sets

4 Conclusion

Regarding NaCl contamination tests, there is no comprehensive evidence that salt particles crossed the GDL and reached the catalyst, indicating that the concentration of NaCl used in the experiments for this thesis does not affect the PEMFC performance.

Carbon Monoxide was responsible for the biggest performance losses seen in this study. Data from performance tests, polarisation curves, EIS and CV point to irreversible performance decay to some extent, caused by CO contaminations both in the cathode and in the anode.

In the cathode, concentrations presented a deterioration, varying from 0.3 to 0.5 mV h⁻¹. This value is acceptable since the operation over a wildfire is time limited. A drop in ECSA of 14 % after the test suggests a significant blockage of catalytic sites.

Nitrate Oxide tests led to the most curious results. The performance test displayed the most stable performance and the lowest decay rate of all contaminations. Furthermore, almost all characterization techniques pointed to a slight performance improvement after the contamination. Compared with results in the literature, this is very unexpected, and the reasoning could be related to the high humidity conditions.

The key conclusion of this study is that for the conditions and cell used, and only concerning the cathode contaminations, no significant permanent damage was recorded in the cell for an operation time range from 15 to 60 hours. In actual drone operation above 500 ft, at least for the first 60 hours, environment causes will not produce significant and permanent degradation. However, prolonged wildfire operation may cause damage to the fuel cell, reducing ECSA over time.

Bibliography

- Blanchard, D. C., & Woodcock, A. H. (1980). The Production, Concentration, And Vertical Distribution Of The Sea-Salt Aerosol. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 338(1 Aerosols), 330–347. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1980.tb17130.x>
- Blanchard, D. C., Woodcock, A. H., & Cipriano, R. J. (1984). The vertical distribution of the concentration of sea salt in the marine atmosphere near Hawaii. *Tellus B*, 36B(2), 118–125. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.1984.tb00233.x>
- de Brujin, F. A., Dam, V. A. T., & Janssen, G. J. M. (2008). Review: Durability and Degradation Issues of PEM Fuel Cell Components. *Fuel Cells*, 8(1), 3–22. <https://doi.org/10.1002/fuce.200700053>
- Gazdzick, P., Mitzel, J., Garcia Sanchez, D., Schulze, M., & Friedrich, K. A. (2016). Evaluation of reversible and irreversible degradation rates of polymer electrolyte membrane fuel cells tested in automotive conditions. *Journal of Power Sources*, 327, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.049>
- Gröger, O., Gasteiger, H. A., & Suchsland, J.-P. (2015). Review—Electromobility: Batteries or Fuel Cells? *Journal of The Electrochemical Society*, 162(14), A2605–A2622. <https://doi.org/10.1149/2.0211514jes>
- Holton, O. T., & Stevenson, J. W. (2013). The Role of Platinum in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Platinum Metals Review*, 57(4), 259–271. <https://doi.org/10.1595/147106713X671222>
- Hongsirikarn, K. (2010). Effect Of Impurities On Performance Of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Components. Clemson University.
- Jiménez, S., Soler, J., Valenzuela, R. X., & Daza, L. (2005). Assessment of the performance of a PEMFC in the presence of CO. *Journal of Power Sources*, 151, 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.02.049>
- Jing, F., Hou, M., Shi, W., Fu, J., Yu, H., Ming, P., & Yi, B. (2007). The effect of ambient contamination on PEMFC performance. *Journal of Power Sources*, 166(1), 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.103>
- Kunusch, C., Puleston, P., & Mayosky, M. (2012). PEM Fuel Cell Systems. Em C. Kunusch, P. Puleston, & M. Mayosky, *Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells* (pp. 13–33). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2431-3_2
- Mikkola, M. S., Rockward, T., Uribe, F. A., & Pivoar, B. S. (2007). The Effect of NaCl in the Cathode Air Stream on PEMFC Performance. *Fuel Cells*, 7(2), 153–158. <https://doi.org/10.1002/fuce.200600206>
- Miranda, A. I. (2004). An integrated numerical system to estimate air quality effects of forest fires. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2), 217. <https://doi.org/10.1071/WF02047>

- Miranda, A. I., Ferreira, J., Valente, J., Santos, P., Amorim, J. H., & Borrego, C. (2005). Smoke measurements during Gestosa-2002 experimental field fires. *International Journal of Wildland Fire*, 14(1), 107. <https://doi.org/10.1071/WF04069>
- Miranda, A. I., Martins, V., Cascão, P., Amorim, J. H., Valente, J., Borrego, C., Ferreira, A. J., Cordeiro, C. R., Viegas, D. X., & Ottmar, R. (2012). Wildland Smoke Exposure Values and Exhaled Breath Indicators in Firefighters. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 75(13–15), 831–843. <https://doi.org/10.1080/15287394.2012.690686>
- Miranda, A. I., Martins, V., Cascão, P., Amorim, J. H., Valente, J., Tavares, R., Borrego, C., Tchepel, O., Ferreira, A. J., Cordeiro, C. R., Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., & Pita, L. P. (2010). Monitoring of firefighters exposure to smoke during fire experiments in Portugal. *Environment International*, 36(7), 736–745. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.05.009>
- Misz, U., Talke, A., Heinzel, A., & Konrad, G. (2016). Sensitivity Analyses on the Impact of Air Contaminants on Automotive Fuel Cells. *Fuel Cells*, 16(4), 444–462. <https://doi.org/10.1002/fuce.201500159>
- Moore, J. M., Adcock, P. L., Lakeman, J. B., & Mepsted, G. O. (2000). The effects of battlefield contaminants on PEMFC performance. 7.
- Nagahara, Y., Sugawara, S., & Shinohara, K. (2008). The impact of air contaminants on PEMFC performance and durability. *Journal of Power Sources*, 182(2), 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.12.091>
- Pan, Z. F., An, L., & Wen, C. Y. (2019). 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>
- Pérez, L. C., Koski, P., Ihonen, J., Sousa, J. M., & Mendes, A. (2014). Effect of fuel utilization on the carbon monoxide poisoning dynamics of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 258, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.016>
- Presidência do Concelho de Ministros (2020) "Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020"Diário da República, 1.^a série 133 (julho) 2-157 <https://dre.pt/dre/detalhe/resolucao-conselho-ministros/53-2020-137618093>
- Sasank, B. V., Rajalakshmi, N., & Dhathathreyan, K. S. (2016). Performance analysis of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stack operated under marine environmental conditions. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(3), 471–478. <https://doi.org/10.1007/s00773-016-0369-y>
- Smirnov, A., Holben, B. N., Eck, T. F., Dubovik, O., & Slutsker, I. (2003). Effect of wind speed on columnar aerosol optical properties at Midway Island: EFFECT OF WIND SPEED ON MARITIME AEROSOL. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D24), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2003JD003879>
- Talke, A., Misz, U., Konrad, G., & Heinzel, A. (2018). Influence of Nitrogen Compounds on PEMFC: A Comparative Study. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(6), F3111–F3117. <https://doi.org/10.1149/2.0181806jes>
- Uddin, M. A., Qi, J., Wang, X., Pasaogullari, U., & Bonville, L. (2015). Distributed cation contamination from cathode to anode direction in polymer electrolyte fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(38), 13099–13105. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.134>
- Uemura, S., Yamazaki, M., Yoshida, T., Jao, T.-C., & Hirai, S. (2017). Performance Degradation of PEMFC by Sea Salt Aerosol Contamination. *ECS Transactions*, 80(8), 651–655. <https://doi.org/10.1149/08008.0651ecst>
- Valdés-López, V. F., Mason, T., Shearing, P. R., & Brett, D. J. L. (2020). Carbon monoxide poisoning and mitigation strategies for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 79, 100842. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100842>
- Valente, J., Miranda, A. I., Lopes, A. G., Borrego, C., Viegas, D. X., & Lopes, M. (2007). Local-scale modelling system to simulate smoke dispersion. *International Journal of Wildland Fire*, 16(2), 196. <https://doi.org/10.1071/WF06085>
- Yan, W.-M., Chu, H.-S., Liu, Y.-L., Chen, F., & Jang, J.-H. (2011). Effects of chlorides on the performance of proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(9), 5435–5441. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.158>
- Yuan, X.-Z., Li, H., Zhang, S., Martin, J., & Wang, H. (2011). A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability test protocols. *Journal of Power Sources*, 196(22), 9107–9116. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.07.082>

República da Turquia: Partido da Justiça e Desenvolvimento e a Projeção de uma Potência Regional (2001-2020)



Fonte: Carnegie Europe, 2017

Autor: **André Ferreira Belbut**

Aspirante a Oficial Aluno no Mestrado Integrado na Especialidade de Piloto-Aviador
Academia da Força Aérea, Sintra

Orientadora: **Professora Doutora Teresa de Almeida e Silva**
Instituto Superior de Ciências Sociais e Políticas, Universidade de Lisboa

Coorientador: **COR/TODCI Luís Manuel Pinto de Almeida da Rocha**
Força Aérea Portuguesa, Academia da Força Aérea, Sintra

Resumo:

O Partido de Justiça e Desenvolvimento, AKP, de matriz islâmica, transformou-se no partido político de maior sucesso desde a fundação da República da Turquia, em 1923, no seguimento da dissolução do Império otomano. Num espaço de aproximadamente 20 anos, este partido revolucionou a política interna e externa turca, desde a economia à estrutura do poder, até ao posicionamento do país no sistema internacional.

A mudança da estrutura do Estado, que transitou de um sistema político parlamentar para um sistema presidencialista, onde o poder passou a concentrar-se largamente no presidente Recep Tayyip Erdogan, e a transformação por parte do sistema internacional, gradualmente mais permissivo e com menores pressões sistémicas, constituiram fatores de que resultaram uma mudança radical na agenda política da Turquia, e um corte com a tradicional visão kemalista do passado.

A presente dissertação procura, através de uma perspetiva baseada no Realismo Neoclássico, analisar algumas destas mudanças promovidas por esse novo ator político no contexto da política interna e do sistema internacional. A “nova Turquia”, de acordo com a nossa análise, apresenta agora uma identidade nacionalista mais independente no sistema internacional e desempenha um reforçado papel de potência regional, resultado da identidade política promovida pelo Partido de Justiça e Desenvolvimento, AKP, a nível doméstico.

Palavras-chave: Turquia; Erdogan; AKP; Realismo Neoclássico.

1- Introdução

O domínio do islamismo moderado na República da Turquia, hoje em dia, fortemente representado pela posição praticamente hegémónica do Partido de Justiça e Desenvolvimento (AKP) dentro da sociedade turca reflete, na realidade, uma transformação relativamente recente na história da Turquia. A ascensão do AKP, partido político com origens no islamismo moderado, representa o culminar de um longo processo de disputa entre o “centro e a periferia da sociedade”; por outras palavras, o culminar de um conflito latente entre o Estado secular kemalista autoritário e uma maioria muçulmana à procura de mudança (Lord, 2018).

A vitória, com maioria absoluta do AKP, em 2002, foi recebida por vários setores da sociedade turca, como mais um passo para o desenvolvimento democrático do Estado, por colocar no centro político, a maioria muçulmana afastada, ao longo de mais de setenta anos, dos centros decisórios, por uma minoria autoritária representada pelas élites seculares kemalistas (*ibidem*).

Paradoxalmente, a entrada do AKP, e do seu líder, Recep Tayyip Erdogan, no centro do palco político da Turquia tem suscitado sérias reservas sobre o real progresso da democracia no país. Em vez de promover o aumento de liberdades para todos, o novo regime de Ancara tem privado de espaço qualquer movimento de oposição, apenas deixando lugar para o aumento de liberdades no seu suporte eleitoral conservador, muito em especial, nas bases mais restritas pautadas pelo islamismo político (Cagaptay, 2020).

Em pouco mais de 10 anos, Erdogan, através de cuidadosos esforços diplomáticos, foi capaz de transpor o obstáculo do secularismo enraizado na política turca, criando, assim, uma maior bipolarização entre a nação que abraça por completo a marca de Erdogan e uma outra, imbuída dos valores seculares que se lhe opõe veementemente (*ibidem*).

Estas profundas mudanças no palco doméstico tiveram implicações na política externa turca, até então intrinsecamente ligada à filosofia kemalista, fortemente marcada pelo ocidentalismo e falta de abertura para com o mundo árabe, o que levara então a que a Turquia fosse genericamente entendida como “um país que seguia as tendências criadas pelo Ocidente e a Europa” (Cagaptay, 2020, p. 5) que se distanciava do seu passado histórico otomano.

A legitimidade de poder de Erdogan reside agora na sua capacidade de mobilizar mandatos democráticos, o que, no futuro, dependerá sempre da sua capacidade de manter a uma base eleitoral consolidada e uma oposição enfraquecida. Para o efeito, Erdogan tem vindo a vincar a vertente iliberal populista do seu discurso e políticas, dando assim azo a um aumento da bipolarização da sociedade turca (Şahin, 2020).

As transformações do sistema internacional, e o papel do AKP como ator protagonista, na política doméstico da República da Turquia, deu azo, naturalmente, a mudanças, algumas radicais, na política externa do país: a anterior política externa kemalista, tradicionalmente mais fechada, centrada nos problemas securitários nacionais e alinhamento com o Ocidente, foi sendo substituída por uma nova agenda cada vez mais independente (*ibidem*).

1.1- Objeto de Estudo

O Objeto de Estudo da presente tese de mestrado na área das Relações Internacionais (RI) é o estudo da República da Turquia tendo em conta a ascensão política do AKP. O objeto último desta dissertação consiste na elaboração de uma análise do posicionamento da Turquia, dominada pelo AKP, face aos principais eventos domésticos, regionais e internacionais.

Analisar a Turquia implica contemplá-la na sua plenitude, desde a sua história e 'traumas', composição social, relações diplomáticas, vetores de atuação, economia, religião, composição política entre tantos outros fatores que constroem a realidade desta nação ímpar, onde dificilmente encontraremos verdades absolutas ou versões binárias independentes dos seus contextos.

1.2- Base Teórica – Realismo Neoclássico

Na área das RI existem várias teorias, e modelos interpretativos. Enquanto investigadores, há a necessidade de optar no nosso estudo, por uma dessas teorias, não obstante, mantendo-nos receptivos às ferramentas, igualmente válidas, disponibilizadas por todas as restantes teorias. Esta dissertação segue a perspetiva das RI, definida pelo Realismo Neoclássico (RN) e faz uso mais prático dos modelos de análise de Kitchen e Schweller, para chegar às nossas conclusões.

Como em outras variações do Realismo, o RN entende o sistema internacional enquanto constante competição entre diferentes Estados em busca de poder material e segurança, num mundo de recursos escassos e de incerteza, em que forças sistémicas incentivam a competição entre os Estados (Rose, 1998).

No entanto, para o RN, não existe uma forma de colocar em prática todo o Poder de um Estado de uma forma imediata ou perfeita. Os comportamentos dos Estados não podem ser avaliados unicamente através do Poder, pois estes são também moldados pelos seus agentes individuais, líderes, ou elites que agem sujeitos às suas condicionantes humanas e características do foro individual (*ibidem*).

Os líderes políticos necessitam de manter o apoio interno de forma a serem capazes de extrair e mobilizar os recursos da sociedade doméstica e suas instituições de forma a manter o suporte dos principais grupos de influência da nação. Disto resulta que, muitas vezes, para garantir a estabilidade, o apoio, ou objetivos a curto prazo de nível interno, os líderes políticos tomam medidas menos que ótimas para os interesses macro estratégicos da nação (Lobell, Ripsman, & Taliáferro, 2009).

Schweller, define quatro principais variáveis referentes ao ambiente interno de uma nação e que têm um elevado impacto na articulação da política externa de uma nação.

Estas quatro variáveis domésticas são: (1) Consenso entre as elites; (2) Coesão entre as elites; (3) Coesão social; (4) Vulnerabilidade do regime/governo. Para a análise de um Estado, de acordo com Schweller, e segundo o RN, é importante explorar para além do seu ambiente sistêmico internacional, também a "intenção" pessoal dos atores decisórios e a "capacidade" dos mesmos atores de o fazer tendo em conta as repercussões sobre a política interna. As duas primeiras variáveis, (1) (2) Consenso/ Coesão entre as elites, são as variáveis que medem primariamente a "intenção" de agir do Estado; e as duas últimas (3), (4), Coesão social e Vulnerabilidade do regime/governo, as variáveis determinantes na "capacidade" de agir do Estado (Stranger, 2012; Schweller, 2004).

Kitchen, por outro lado, olha para a estrutura mais macro do palco doméstico e apresenta três hipotéticos cenários, sobre a forma como os Estados organizam a sua política externa em resposta ao sistema doméstico e internacional envolvente (Kitchen, 2010).

Os três cenários onde os interesses domésticos de um Estado podem prevalecer em detrimento dos seus interesses estratégicos no ambiente internacional são:

- 1- *Estados muito poderosos*- vêm as escolhas da sua formalização de política externa segundo uma ótica, não apenas definida pelas suas necessidades no contexto global, mas também através de objetivos ideológicos que se tornam o fim em si mesmo;
- 2- *Estados altamente institucionalizados*- dada a sua menor capacidade de mudança, filtram e limitam opções que não estejam alinhados com a cultura política da nação, independentemente dos seus interesses geopolíticos;
- 3- *Estados centralizados*- Neste caso, a política externa é adotada maioritariamente em função das decisões e motivações individuais, o que resulta numa política externa mais imprevisível e dependente geralmente de ganhos pessoais (*ibidem*).

1.3- Enquadramento Conceptual- Kemalismo

Os princípios do Kemalismo, são a súmula das ações, pensamentos, discursos e projetos formados pelo Mustafá Kemal Atatürk e seu Governo durante a formação da República Turca e o período de reforma estatal, após a queda do Império Otomano (Ágoston & Masters, 2009; Izmaylov, Fakhrutdinov, & Galimzyanova, 2017).

Tendo por base uma atuação *top-down*, o kemalismo, pretende criar das partir das cinzas do Império Otomano um Estado-nação turco, secular, moderno, democrático, com poder suficiente para garantir a sua independência das potências imperialistas europeias e ao mesmo tempo transformar a sociedade segundo o modelo da sociedade ocidental (*ibidem*).

Este passou a ser definido por seis princípios basilares que estiveram desde então institucionalizados no coração da elite política da República turca, nas oito décadas que se seguiram, bem como na própria estrutura social da Turquia (*ibidem*).

Os quatro primeiros princípios (Republicanismo, Nacionalismo, Populismo e Revolucionismo) refletem a base ideológica para a reestruturação política, e os últimos dois (Secularismo e Estatismo) os pilares filosóficos em que assentavam as reformas (Dewdney & Yapp, 2021).

Repetidamente, durante a história da República da Turquia, o Kemalismo tem sido frequentemente reinterpretado e adaptado como fonte de poder político, tanto por ideologias socialistas, liberalistas e conservadoras (Arisan, 2008).

2- Pergunta de Partida

Foram formuladas duas perguntas, uma de partida e uma derivada, que deverão guiar e orientar esta investigação:

Pergunta de Partida: *O que representa a “Nova Turquia de Erdogan” para o alinhamento da Turquia no sistema internacional, e em particular para o Ocidente?*

Pergunta Derivada: *O que permitiu a superação do Kemalismo na Turquia pelo Islamismo Político?*

O Objetivo central da presente investigação prende-se com a criação de uma compreensão holística sobre a atual República da Turquia moldada pela ascensão e consolidação de poder do AKP e de Erdogan como seu indiscutível líder, tendo em conta os implícitos fatores e contextos internos, externos e históricos.

Objetivos Específicos:

- Perceber a identidade, papel e importância do Kemalismo na República da Turquia e a suas limitações que contribuíram para a ascensão do Islamismo Político.
- Identificar os eventos considerados mais impactantes da política interna e externa do AKP e explorar as suas repercussões para o posicionamento geopolítico da Turquia.
- Contribuir para o recorrente debate sobre a possível mudança de orientação, do Ocidente para Oriente, da Turquia no sistema internacional.

3- AKP e a “Nova Turquia” de Erdogan

Com o surgimento do AKP, a Turquia passou a ter ao leme da política uma nova elite que, de uma forma notória e clara, procurou separar-se da anterior elite kenalista, e ao contrário desta, procurou trazer a fé islâmica para a esfera do Estado e não a limitar ao domínio pessoal e da vida privada. O Kemalismo, com a sua visão nacionalista e laica do Estado, deixou de ser visto como a solução e passou a ser tido como parte do problema, por ser incapaz de mitigar a divisão étnica entre turcos e curdos embora estes partilhem de uma história milenar de comunidade e convivência próximas baseada no Islão sunita. Só através da reafirmação desse laço comum poderia ser possível a convivência e coesão, agora em vias de dissolução na atual sociedade turca (Yavuz, 2001; Reynolds, 2012).

3.1- Origens e Base de Poder do AKP

A vitória do RP, nas eleições antecipadas de 1995, marca o momento em que, pela primeira vez, desde a formação da República Turca, um partido islâmico vence as eleições parlamentares (Lord, 2018).

A maior ameaça do RP, perante os interesses das elites kenalistas, era a sua oposição a uma maior aproximação da Turquia com o Ocidente, em particular, a uma eventual candidatura de adesão à UE (Karadjis, 1997).

O que resultou a 28 de fevereiro de 1997, num golpe de estado pós-moderno pelas Forças Armadas Turcas (FAT), através de um memorando e pressão política ao Governo do RP. Em 1998, o Tribunal Constitucional turco dissolveu o RP, por ser “um centro de atividades contrárias ao princípio de secularismo” (Moe, 2003, 34.º parágrafo).

Os desenvolvimentos em torno do golpe de estado de 1997 apresentaram ao movimento político islâmico turco duas direções destintas possíveis como resposta: a radicalização, ou a moderação do movimento (Cagaptay, 2017).

Abandonando a filosofia partidária do Islamismo conservador, Recep Tayyip Erdogan forma em agosto de 2001 o AKP, declarando que este seria uma força democrática conservadora e moderada, defensora de uma economia de livre de mercado e da adesão da Turquia à União Europeia (*ibidem*).

O momento em que o partido fora formado, 2001, também muito contribuiu para a vitória do AKP. A Turquia vivia então a pior crise económica desde a Segunda Guerra Mundial, o que causara a completa perda de confiança eleitoral nos partidos tradicionais turcos, tidos como responsáveis pela magnitude da crise (Koch, Chaudhary, & Bilques, 2002).

O posicionamento do AKP, enquanto força política de centro-direita, impulsionadora do projeto de integração da Turquia na UE, e com uma política externa pró-ocidental, aparentemente pautada por um “secularismo leve”, ofereceu ao partido uma plateia eleitoral muito mais diversificada, que a qualquer dos partidos islâmicos seus antecessores. Atraiu grande parte da classe média moderada, que embora pudesse não partilhar as preocupações e posições do partido em termos político-religiosos, via no recém-formado AKP um partido alternativo aos partidos tradicionais. Esta diversidade de base eleitoral foi capaz de atrair a “classe trabalhadora de centro-esquerda, classe média de centro-direita, nacionalistas

rurais, e eleitores islâmicos dos centros urbanos" (Cagaptay, 2017, p. 102), o que se refletiu na esmagadora vitória do AKP nas eleições de 2002 (*ibidem*).

3.2- AKP e o Estado Secular (2003-2011)

A sobrevivência Política inicial do AKP dentro do Estado turco não dependeu apenas do apoio democrático da população. Devido às características particulares da República Turca, que remontam à sua própria Constituição de 1923, e aos desígnios do kemalismo, onde a democracia é condicionada pela condição de secularidade da qual o sistema judicial e, mais particularmente, as Forças Armadas têm o dever de agir como guardiões. No sistema político turco, as Forças Armadas Turcas (FAT) agem como agente regulador político e defensor do Estado secular, externo ao próprio processo democrático (Ezikoğlu, 2021).

Numa primeira fase, como forma de garantir a sobrevivência política do partido, Erdogan necessitou de se estabelecer enquanto líder de um partido de identidade conservadora e democrática, capaz de agir dentro dos limites do secularismo, com os valores conservadores islâmicos apenas levemente presentes. O processo de legitimação do partido foi conseguido principalmente graças ao apoio internacional do Ocidente, em especial da UE que concedeu à Turquia o estatuto de país candidato a uma futura adesão; e pelos EUA onde o projeto AKP era tido como uma solução viável no pós 11 de setembro, para um modelo de democracia muçulmana capaz de estruturar o Médio Oriente de uma forma moderna e democrática, estável o suficiente para impedir a proliferação do terrorismo e fundamentalismo islâmico (*ibidem*).

Erdogan defendia os modelos ocidentais da democracia e dos direitos humanos, e procurava por essa via legitimar a liberdade da expressão política democrática das correntes Islâmicas, o que implicava pôr em causa a tutela militar sobre o sistema político da Turquia (Cagaptay, 2017). Esta posição permitiu a Erdogan colher dividendos e capital político em Bruxelas "que via as forças armadas [Turcas] como antagonistas para a realização dos valores europeus de direitos humanos, direitos de minorias e liberdades básicas na Turquia" (Phillips, 2017, p. 22). Desfazer os poderes políticos das forças armadas fazia parte das reformas base para a qualificação da Turquia no seu processo de adesão à UE.

As reformas instauradas pelo AKP, segundo os critérios de Copenhaga, para tornar a Turquia elegível a uma adesão à UE, são para alguns autores o "cavalo de Troia" da agenda islâmica do AKP. Em nome de uma maior democratização, o que o AKP procuraria, na realidade, seria neutralizar a ação das FAT no sistema governamental, e degradar a secularidade do poder judicial por forma a conferir ao islamismo legitimidade na vida política e social turca (Phillips, 2017).

A polarização entre o Estado secular kemalista e o AKP intensificou-se com a eleição presidencial de 2007. O receio que o candidato do AKP fosse uma personalidade de tradição islâmica, capaz de pôr em causa o regime secular turco, intensificou-se ainda mais por tratar-se de um cargo de alto simbolismo institucional (Dinçsahin, 2012).

A 27 de abril de 2007, o Chefe de Estado Maior, General Yasar Büyükanıt, publica um memorando eletrónico no website do Estado Maior Turco, conhecido como *e-memorandum*, onde insinuava a possibilidade de as FAT intervirem contra a candidatura de Gul (*ibidem*). Quatro dias mais tarde, a 1 de maio de 2007, o Tribunal Constitucional bloqueia o processo eleitoral como forma de interromper a candidatura de Gul.

Como resposta à decisão do Tribunal Constitucional, Erdogan desfaz o Governo e convoca eleições parlamentares antecipadas (Jenkins G., 2008). O resultado das eleições antecipadas tidas a 22 de julho de 2007 foi uma esmagadora vitória do AKP que obteve 47% dos votos, e uma representação parlamentar de 341 lugares (Grand National Assembly of Turkey, 2007). Assim, a 28 de agosto de 2007, Abdullâ Gul foi eleito, pelo novo Parlamento, Presidente da República (Migdalovitz, 2007).

O segundo mandato do AKP, 2007-2011, foi marcado por uma mudança na forma de atuação do partido e de Erdogan relativamente à questão do Estado secular. Reforçado pelo apoio popular expresso nos mais recentes resultados eleitorais, o AKP e Erdogan iniciam uma fase de confrontação direta com as elites seculares kemalistas e de grandes mudanças institucionais. (Ezikoğlu, 2021).

Foram lançadas duas investigações jurídicas, *Ergenekon* em 2007 e mais tarde *Sledgehammer* em 2010, ambas contra apoiantes proeminentes do kemalismo, incluindo ativistas, jornalistas, figuras militares, e políticos, sendo um dos principais alvos as FAT. Estes processos, posteriormente demonstradas como pouco fundamentadas, baseavam-se em alegados envolvimento em organizações ou planos para orquestrar golpes de Estado que procuravam derrubar pela força o Governo democraticamente eleito da Turquia. Como resultado, centenas de membros kemalistas foram afastados das posições de poder que detinham, tendo estas sido ocupadas agora por atores mais simpatizantes do AKP (Jenkins G. S., 2011; Jenkins G., 2014; MacDonald, 2019).

Em setembro de 2010, Erdogan propõe um referendo sobre uma emenda à Constituição da República da Turquia. O principal objetivo seria o de aproximar a Constituição da República, a um modelo mais similar ao das Constituições dos países membros da UE, numa tentativa de aproximar e facilitar o processo de adesão à UE (Cagaptay, 2017).

Por outro lado, os opositores ao referendo, maioritariamente do CHP, denunciaram que essa consulta popular teria como intuito oculto, preparar o caminho para uma forma de autoritarismo - nada estranho à sociedade turca - mas desta vez assumindo por atores civis, representados pelo AKP, que passaria a ter o controlo institucional sobre o poder executivo, legislativo e judicial, corrompendo os princípios de separação de poderes (Herzog, 2010).

O referendo constitucional acabou por ser votado a 12 de setembro de 2010, e resultou na aprovação do pacote de 26 mudança constitucionais, com uma taxa de aprovação de 58% (Cagaptay, 2017).

Na prática, o resultado do referendo constitucional de 2010 abriu as portas para a gradual institucionalização do próprio AKP como um partido hegemônico no poder executivo, legislativo e agora também no judicial, colocando em causa toda a balança do sistema democrático e laico do Estado turco.

3.3- Erdogan e o Lado Iliberal Populista (2011-2020)

Erdogan, a partir de 2011, adota um discurso cada vez mais populista, opondo-se aos modelos mais ocidentalizados e modernistas, característicos do esforço secular sempre presente desde a formação da República da Turquia. Este acentuar do conservadorismo islâmico, anti kenalista e antioidental, funcionou como um instrumento político capaz de criar mais um contraste divisório que talhava em duas a sociedade turca, relativamente a certos temas (Ezikoğlu, 2021).

A forma autoritária como Erdogan e os seus apoiantes lidaram com a demonstração de descontentamento popular expresso nos acontecimentos de *Gezi Park*, por uma parte considerável da população, refletiu claramente em 2013, o lado iliberal de Erdogan, e o seu discurso marcado pela bipolarização maniqueísta da sociedade turca, e por um sentimento antioidental (*ibidem*).

O discurso antioidental foi reforçado durante os protestos de *Gezi Park*. Este foi apenas um dos muitos episódios onde foi utilizada a retórica antioidental por parte de Erdogan e o seu partido, como ferramenta política capaz de instrumentalizar, conforme necessário, a opinião do seu eleitorado em cada crise ou cada campanha política. Ao apresentar o Ocidente, como um inimigo do interesse turco, Erdogan capitalizava apoio político e elevava a sua imagem de líder representante dos interesses das massas e não das elites (Zürcher, 2018).

A 10 de agosto de 2014, realizaram-se pela primeira vez eleições diretas, e não por via parlamentar, para o cargo de Presidente da República conforme as mudanças constitucionais estabelecidas em 2007. Nestas eleições Recep Tayyip Erdogan, então primeiro-ministro pelo terceiro mandato consecutivo e barrado de se candidatar a um quarto pelas diretivas internas do próprio AKP, apresenta-se como candidato (Özbudun, 2014). Erdogan vence com uma maioria de 51.8% dos votos na primeira ronda, tornando-se assim o 12º Presidente da República Turca.

A posição já consolidada do AKP na política turca iria sofrer grandes transformações após 2014, por via do afastamento do eleitorado curdo (Ezikoğlu, 2021).

Muito do apoio do AKP, anteriormente obtido nas regiões de maioria curda, deveria-se ao facto de o AKP ser considerado, por esse eleitorado, a melhor alternativa, em comparação com os partidos kenalistas, devido à sua postura inicialmente mais aberta e tolerante sobre os direitos e identidade dessa população (Larrabee & Tol, 2011).

No entanto a formação do partido político HDP, criado 2012, de Esquerda radical, e que se apresentava como defensor das minorias, nomeadamente a curda, acabou por transformar esta realidade. Nas eleições legislativas, em junho de 2015, com 13%, HDP recolhe mais de metade dos votos em províncias com grandes comunidades curdas, onde até então o AKP era o principal partido (Gunes, 2017).

Este resultado eleitoral obtido pelo HDP constituiu um grande contratempo para o AKP, que obteve 41% dos votos e 258 dos 550 lugares parlamentares, nas primeiras eleições em que Ahmet Davutoğlu substitui Erdogan como candidato a Primeiro-ministro, pela perda pela primeira vez da maioria absoluta do AKP. Como resultado o AKP viu-se incapacitado de formar governo, e convoca novas eleições antecipadas para novembro de 2015 (Grand National Assembly of Turkey, 2015a).

O AKP aproveita então o reacender do conflito curdo, e o período de caos provocado, como forma de combater as conquistas eleitorais do HDP, em diversas cidades com grande representação curda. O 'Problema Curdo' entra então num dos períodos de maior perseguição, que não terminou com as eleições de novembro de 2015 (Christofis, 2019).

Como resultado, nas eleições legislativas de novembro de 2015, o AKP provou ser capaz de consolidar-se, com esta acentuada retórica nacionalista, pois ganhou terreno principalmente junto ao eleitorado do MHP. Como resultado o AKP aumentou em quase 9%, o resultado eleitoral anterior, obtendo assim 317 dos 550 lugares parlamentares, o que lhe permitiu a maioria absoluta e manter Ahmet Davutoğlu como primeiro-ministro (Grand National Assembly of Turkey, 2015b).

Outra das grandes transformações do AKP característica até 2014 foi o fim da aliança do AKP com o Movimento Gulenista. Dois anos antes, na sequência do *Gezi Park Uprising* ambas as forças já se haviam envolvidos num aberto confronto. Os Gulenistas havia desde então procurado minar o monopólio de poder de Erdogan, através da abertura de investigações criminais ao partido, acusações de corrupção e/ou abuso de autoridade, ataques na opinião pública, lutas eleitorais e por último (embora nunca oficialmente confirmado por fontes independentes) um golpe de Estado (Esen & Gumuscu, 2017).

Esta tentativa de golpe de Estado militar, creditada ao movimento Gulenista, iniciou-se na noite de 15 de julho de 2016, ficando para a história como "o golpe mais sangrento da história turca" (Esen & Gumuscu, 2017, p. 62). A intentona acabaria por falhar quando milhares de cidadãos apoiantes do AKP e/ou contra um novo golpe de estado, que comprometessem o processo democrático da nação, revoltaram-se nas ruas (*ibidem*).

Nas próprias palavras de Erdogan a tentativa de golpe de estado acabou por ser “um presente de Deus” (Esen & Gumuscu, 2017, p. 69). Na verdade, permitiu a Erdogan, através da repetida imposição de estado de emergência suspender o Estado de Direito e a Convenção Europeia dos Direitos Humanos, criando assim o quadro legal que deu legitimidade ao regime para eliminar todo o tipo de dissidência na sociedade turca; não apenas contra o movimento Gülenista, identificado como autor da tentativa do golpe, mas também contra qualquer movimento opositor ou que constituisse uma ameaça a Erdogan (Castaldo, 2018).

O golpe de Estado falhado deu também a oportunidade a Erdogan de efetuar as profundas reformas constitucionais que há muito deseja, principalmente a almejada transformação do sistema político turco de parlamentarista para presidencialista, tornando assim o Presidente da República o chefe do Executivo e do Estado (*ibidem*).

As alterações à constituição foram aprovadas pelo Parlamento em janeiro de 2017 (com o apoio do MHP) e submetidas a referendo nacional a 16 de abril, sendo respetivamente aprovadas com 51,41%, e transformando assim a estrutura do Estado, para um sistema presidencialista. O presidente da República passou a deter, legítima e constitucionalmente, a maior parte do poder do Estado (*ibidem*).

4- Política Externa

Em 1991, o colapso do mundo bipolarizado, o denominado *fim da Guerra Fria*, fez a Turquia entrar, num novo ambiente de incerteza e novas oportunidades. Esta potência média da NATO, que fora durante a Guerra Fria um país fronteiriço entre os dois blocos, com a queda da União Soviética, adquiriu um papel de potência regional, dispondo doravante de um leque de diferentes escolhas possíveis quanto à sua política externa (Şahin, 2020).

4.1- Ponto de Partida Kemalista

A política externa turca no pós-Guerra Fria, a nível global e regional, manteve-se de forma geral, fundamentalmente alinhada com anteriores tendências de uma élite burocrática, altamente institucionalizada na filosofia política kemalista, muito determinada na defesa dos valores ocidentais e no reforço do papel estratégico assumido pela Turquia na região, muito em particular no que respeitava à projeção dos valores ocidentais para a Ásia Central e o Médio Oriente, a troco de uma maior integração do país no bloco ocidental, muito especialmente na UE (*ibidem*).

4.2- AKP - Profundidade Estratégica (2001-2011)

O 11 de setembro de 2001 marca a data dos ataques terroristas aos EUA que trouxeram repercussões para todo o mundo alterando radicalmente a política securitária internacional. A destruição do *World Trade Center* e o ataque ao Pentágono, no seio da maior potência mundial, mudou radicalmente a política de Washington (d'Abadie, 2003).

Tendo em conta a localização geográfica e o próprio conflito doméstico com o PKK, organização terrorista curda, a Turquia viu-se na linha da frente da campanha internacional, e prontamente se juntou à coligação das forças militares lideradas pelos EUA no Afeganistão em 2001 (Altunisik, 2006).

No entanto, em 2002, quando os EUA procuraram incluir a Turquia na operação *Iraqi Freedom*, com o objetivo de impor uma mudança de regime, no Iraque do presidente Saddam Hussein, este despoletou um grande debate na sociedade e classe política turca (Altunisik, 2006; Phillips, 2017).

A 1 de março de 2002, o parlamento rejeitou a moção apresentada pelo AKP sobre a participação da Turquia no conflito impedindo, assim, na prática, a criação da frente norte desta ofensiva contra o Iraque, e prejudicando os planos de Washington (Cagaptay & Parris, 2003).

Embora as relações entre os EUA e a Turquia tenham sido afetadas, momentaneamente, por esta decisão, ambos os lados acabaram por reconhecer e preferir salientar os seus interesses comuns e as possibilidades de cooperação no Médio Oriente, e as suas relações rapidamente se normalizaram (Altunisik, 2006; Cagaptay & Parris, 2003).

A visão desenvolvida por Davutoglu, para a nova política externa turca, partia do princípio de que a Turquia havia sido e continuava a ser uma das nações centrais para a política internacional, não só devido à sua localização geográfica, mas também pela sua herança histórica e identidade específica. A Turquia não poderia, pois, manter-se confinada ao papel internacional, de Estado secundário ou simples ponte entre civilizações, como viera sendo caracterizada após a formação da República Turca. Segundo a visão de Davutoglu, posteriormente conceptualizada como “*Strategic Depth Doctrine*”, a política externa turca deveria reposicionar o país como uma nação central, com uma área de influência, quer a nível regional, quer a nível global, muito mais profunda que a assumida previamente (Altunisik, 2011).

Seguindo a visão de Davutoglu, denominada de “*Strategic Depth*”, estabeleceram-se com as nações vizinhas novas relações e parcerias diplomáticas de forma pró-ativa nomeadamente de boas relações económicas e diplomáticas, especialmente com a Síria e Irão, ao mesmo tempo que as relações tradicionais com o Ocidente não sofreram percalços, mantendo-se a cooperação com os EUA e a adesão à UE, uma prioridade (Aydin, 2013).

No final dos anos 2000, fruto da “*Strategic Depth Doctrine*”, a Turquia ultrapassou os atritos do passado, com os seus vizinhos no Médio Oriente, estabelecendo bases de cooperação económica e diplomática nomeadamente por via da

abertura da livre circulação sem visa com a Líbia, Síria, Jordânia, Líbano e o Iémen, e acordos de livre comércio com o Egito, Jordânia, Líbano, Marrocos, Síria, Palestina e Tunísia. O resultado desta maior abertura a nível regional foi a promoção de novos mecanismos de diálogo, e o aumento dos investimentos e das trocas comerciais entre a Turquia e os países árabes vizinhos (Altunisik, 2011).

Em 2008, a crise financeira global moldara profundamente o contexto de poder no Médio Oriente e a posição da Turquia nesse sistema. Com uma pesada recessão económica, o foco do recém-eleito presidente dos EUA, Barack Obama, deixou de ser empregar o uso da força militar nas guerras prolongadas no Médio Oriente (Nuruzzaman, 2015). Esta crise teve também grande impacto na Política Externa da UE que se tornou progressivamente mais indiferente às políticas internacionais. (Şahin, 2020).

Neste período, entre 2008 e 2011, a consolidação do poder do AKP ocorreu pois nos meios burocráticos da política externa turca, resultado da diminuição de restrições impostas pelos anteriores interesses de potências ocidentais, EUA e UE, agora mais focados nos seus contextos domésticos e menos nos contextos regionais do Médio Oriente. Foi a mistura perfeita para que a política externa turca, promovida pelo AKP, e norteada pela doutrina “Strategic Depth” de Davutoglu, assumisse uma direção ainda mais independente e centralizada.

4.3- A Primavera Árabe e a Personificação da Política Externa (2011-2020)

A denominada *Primavera Árabe* foi sem dúvida um dos maiores movimentos sociais modernos de revolta e autodeterminação que ocorreram no Médio Oriente e Norte de África. Este movimento, que rapidamente se alastrou nos anos 2010 e 2011, teve por base demonstrações e revoltas sociais pró-democráticas que confrontaram alguns dos regimes mais autoritários da Região.

Como resultado, o AKP promoveu um modelo de política externa voltado para o apoio ativo ao islamismo moderado enquanto modelo a seguir, e criando uma rede de solidariedade promotora da transição. Esta mudança de postura da política externa turca, mais autónoma, foi um claro corte com o passado quando o país genericamente ajustava as suas principais diretrizes e motivações, apenas em torno da liderança criada pelo Ocidente. A Turquia, embora ainda um parceiro estratégico do Ocidente, e com interesses em comum, procurou assumir um papel de liderança regional ainda mais autónomo e ativo na região, fruto de uma percepção cada vez mais presente na nova elite política do AKP da posição da Turquia, como grande potência regional (Cop & Zihnioglu, 2015).

Quando a 25 de janeiro de 2011, o espírito de revolução da *primavera árabe* atingiu o Egito, onde protestos exigiam a demissão de Hosni Mubarak, então presidente, a resposta e o posicionamento da Turquia foi rapidamente demonstrada. A 1 de fevereiro de 2011, Erdogan expressa o seu apoio aos protestos pró-democratas, apelando à demissão de Mubarak, e à imediata transição democrática no país (Reuters, 2011).

Em 2012, a vitória eleitoral da Irmandade Muçulmana, movimento político islâmico, com uma base filosófica próxima do AKP, foi recebida pelo AKP com a intenção de estabelecer uma sólida e colaborativa relação regional, de forma a promover uma nova e poderosa coligação democrática. No entanto, todos os progressos atingidos, durante esta fase de aproximação, acabaram por ser perdidos quando a 30 de junho de 2013 o regime da Irmandade Muçulmana é alvo de um golpe de estado militar que derrubou o recém-formado Governo (Khalifa, 2017).

A Turquia manteve-se irredutível na defesa do deposto Governo, e numa contínua recusa em reconhecer, no palco internacional, a legitimidade do novo regime egípcio. Isto levou ao declínio das relações diplomáticas entre as duas nações, prejudicando as aspirações da Turquia de desempenhar o papel de líder regional. Esta posição foi ainda agravada pelo facto de grande parte dos Estados árabes do Golfo, apoiarem o novo regime no Egito, o que deu azo à quebra dos investimentos e à deterioração dos interesses turcos no Golfo Pérsico, até então uma das principais zonas de interesse económico do país, desde os progressos feitos no final dos anos 2000 (*ibidem*).

Esta política externa turca, propulsada pela *Primavera Árabe* permaneceu inamovível no seu apoio exclusivo aos movimentos próximos da sua ideologia política no Médio Oriente, nomeadamente no que respeitava à deposta Irmandade Muçulmana no Egito, o que resultou num grande isolamento regional da Turquia, exceto na sua relação com o Qatar (Cagaptay, 2020b).

Na Síria, o descontentamento social e as demonstrações contra o Regime de Assad eclodiram a 15 de março de 2011. Era de interesse da Turquia uma mudança pacífica e suave na Síria como forma de manter as relações positivas entre os dois países. Erdogan procurou de início utilizar a sua influência para motivar Al Assad a iniciar reformas políticas. No entanto, à medida que os protestos foram recebidos com mais violência estatal e os apelos pela mediação e implementação de reformas foram sendo ignorados, e o diálogo entre Assad e a oposição dos grupos dissidentes sírios, preconizado pela Turquia, falhou. O escalar de violência interna na Síria, em junho de 2011, levou a que Erdogan declarasse a impossibilidade da Turquia manter o seu apoio ao Governo de Assad, acabando Ancara por apoiar ativamente os grupos dissidentes sírios e as sanções internacionais contra o regime de Damasco (Súmer, 2013).

A instabilidade, às portas das fronteiras com a Síria, trouxe grandes problemas de segurança para a Turquia. Aos poucos, as repercuções desta guerra civil deixaram de estar contidas dentro do território sírio e passaram a afetar diretamente a segurança territorial turca, através de correntes migratórias e de danos colaterais dos confrontos militares nas suas fronteiras (Ozpek & Demirag, 2014).

À medida que as promessas da primavera árabe foram esmorecendo a Turquia viu-se a braços com dois problemas: os refugiados sírios e iraquianos, e a guerra contra o ISIL. A crise dos refugiados, relacionada não só com os Estados falhados e as respetivas guerras civis, mas também com os avanços do ISIL nas mesmas regiões, colocou a Turquia no centro destas duas crises, não só como um dos países mais afetados, mas também enquanto Estado chave para a resolução da crise (Keyman, 2016).

A guerra na Síria, o colapso da primavera árabe, e as posições isoladas defendida pela Turquia, e a quase completa personificação da política externa turca criaram maiores ineficiências entre as vontades políticas e a real capacidade no domínio da política externa de atuação da Turquia. A agenda política doméstica do AKP e os objetivos pessoais de Erdogan, centrado nos ganhos que pudesse obter junto da opinião pública turca, passaram a prevalecer em detrimento dos ganhos em matéria de política externa estratégica e interesses nacionais a longo prazo (Aras, 2019).

5- Conclusão

A presente investigação exploratória visou através de uma abordagem qualitativa, de natureza teórica, compreender o AKP como novo ator político na Turquia. De inspiração islâmica, vinte anos após a sua formação, este partido revolucionou em vários aspectos a política interna e externa da República da Turquia, desde a economia à estrutura do poder, até ao posicionamento do país no sistema internacional.

Neste sentido no quadro das perguntas de partida formuladas, que serviram de corolário para toda a investigação concluímos o seguinte:

PD - "O que permitiu a superação do Kemalismo na Turquia pelo Islamismo Político?"

A superação do Kemalismo na Turquia pelo Islamismo Político, resultou de um conjunto de esforços na sociedade turca, em particular, em busca de mudança do já exausto Kemalismo. A grande vantagem do AKP surge na sua identidade islâmica moderada capaz de mobilizar apoio internacional e criar uma coligação doméstica, não apenas baseada na vertente religiosa, resiliente o suficiente para sobreviver e aos poucos transformar por completo a balança de poder do Estado.

PP- "O que representa a 'Nova Turquia de Erdogan' para o alinhamento da Turquia no sistema internacional, e em particular para o Ocidente?"

A 'Nova Turquia de Erdogan' representa uma transformação da forma e contexto, mas não do seu alinhamento no sistema internacional com o Ocidente. A República da Turquia procura assumir-se como uma potência regional, mais independente e diversificada, com objetivos nacionalistas mais acentuados, coerentes com os seus órgãos de decisão mais centralizados e posturas diplomáticas mais rígidas na defesa dos seus interesses domésticos e políticos. No entanto, a sua crescente integração com o Ocidente, a nível militar e económico, leva a crer que os interesses políticos e internacionais da 'Nova Turquia de Erdogan' permanecem dependentes e dessa forma interligados de forma geral com os da Comunidade Ocidental.

O ano de 2023 marca uma importante data para a República da Turquia, não só porque representa simbolicamente os 100 anos desde a assinatura do tratado de Lausanne, e correspondentemente desde a sua criação, mas também por ser o ano em que estão previstas as próximas eleições presidenciais e parlamentares. O resultado, que vier a sair das urnas, embora já não coloque em causa a presença do islamismo político no sistema democrático turco, será crucial para a estabilidade do novo sistema governamental e por conseguinte de Erdogan.

No momento da realização desta tese, em 2022, a economia turca atravessa um dos piores períodos desde a liderança do AKP, marcada pela contracção do investimento internacional perante as transformações domésticas ao mesmo tempo que, a nível securitário, o apoio internacional a grupos curdos como o PYD coloca em causa a estabilidade da 'Turquia de Erdogan'.

No entanto, é inegável que o enquadramento geopolítico da Turquia, atualmente exaltado pelo contexto bélico do conflito entre a Ucrânia e a Rússia, e pelo crescente debate sobre possíveis expansões da NATO, na qual a Turquia está numa posição única e privilegiada, proporciona um maior alinhamento, desta vez, do próprio Ocidente com a Turquia. Seguramente esta conjuntura, de forma pragmática será utilizada, pelo presidente Erdogan, não só para a defesa dos interesses estratégicos, mas também como forma de garantir que as vitórias, a nível internacional, se refletem no contexto doméstico e partidário turco.

6- Referências Bibliográficas

- Ágoston, G., & Masters, B. (2009). Encyclopedia of the Ottoman Empire. Facts On File.
- Altunisik, M. B. (2006). Turkey's Iraq Policy: The War and Beyond. *Journal of Contemporary European Studies*, 14(2), 183-196.
- Altunisik, M. B. (2011). Turkish Foreign Policy in the 21st Century. *CIDOB International Yearbook*, 195-199.
- Aras, B. (2019). The Crisis and Change in Turkish Foreign Policy after July 15. *Alternatives: Global, Local, Political*, 44(1), 6-18.
- Arisan, M. (2008). Kemalism. Em P. N. Stearns, *The Oxford Encyclopedia of The Modern World 1750 To The Present*. Oxford University Press, 4, 351-353.
- Aydin, A. (2013). The Perception Over Change of Axis in Turkish Foreign Policy in Terms of a Liberal Perspective Between 2002-2010. *Journal of Süleyman Demirel University Institute of Social Sciences*, 235-257.
- Cagaptay, S. (2017). *The New Sultan Erdogan and the Crises of Modern Turkey*. I.B.Tauris.
- Cagaptay, S. (2020). *Erdogan's Empire - Turkey and the Politics of the Middle East*. I.B.Tauris.
- Cagaptay, S.(2020b). Turkish Foreign Policy Trends: An In-Depth Conversation. (T. Bruyere-Isnard, & C. Mabille, Entrevistadores) Obtido em 06 de maio de 2022, de <https://www.washingtoninstitute.org/policy-analysis/turkish-foreign-policy-trends-depth-conversation>
- Castaldo, A. (2018). Populism and competitive authoritarianism in Turkey. *Southeast European and Black Sea Studies*, 467-487.
- Christofis, N. (2019). The state of the Kurds in Erdoğan's 'new' Turkey. *Journal of Balkan and Near Eastern Studies*, 21(3), 251-259.
- Cop, B., & Zihnioglu, Ö. (2015). Turkish Foreign Policy under AKP Rule: Making Sense of the Turbulence. *Political Studies Review*, 1-11.
- d'Abadie, D. S. (2003). From 11/9 to 9/11: Continuity or Change in International Politics? *Nação e Defesa*, 123-134.
- Dewdney, J. C., & Yapp, M. E. (2021). Encyclopedia Britannica Turkey- Kemalist Policies. Obtido em 29 de dezembro de 2021, de Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/place/Turkey>
- Dinçsahin, S. (2012). A Symptomatic Analysis of the Justice and Development Party's Populism in Turkey, 2007–2010. *Government and Opposition*, 47(4), 618-640.
- Esen, B., & Gumuscu, S. (2017). Turkey: How the Coup Failed. *Journal of Democracy*, 28(1), 59-73.
- Ezikoğlu, Ç. (2021). *The Logic of Political Survival in Turkey The Case of AKP*. Lexington Books.
- Grand National Assembly of Turkey. (2007). Grand National Assembly of Turkey Elections Held in 2007. Obtido em 28 de março de 2022, de Parliment database: http://archive.ipu.org/parline-e/reports/arc/2323_07.htm
- Grand National Assembly of Turkey. (2011). Grand National Assembly of Turkey Elections Held in 2011. Obtido em 04 de abril de 2022, de Parliment database: http://archive.ipu.org/parline-e/reports/arc/2323_11.htm
- Grand National Assembly of Turkey. (2015a). Grand National Assembly of Turkey Elections Held in June 2015. Obtido de Parliment database: http://archive.ipu.org/parline-e/reports/arc/2323_15_June.htm
- Grand National Assembly of Turkey. (2015b). Grand National Assembly of Turkey Elections Held in November 2015. Obtido de Parliment database: http://archive.ipu.org/parline-e/reports/arc/2323_15_Nov.htm
- Gunes, C. (2017). Turkey's New Left. Obtido em 14 de abril de 2022, de New Left Review 107: <https://newleftreview.org/issues/ii107/articles/cengiz-gunes-turkey-s-new-left>
- Herzog, M. (2010). FPC Briefing: Analysing Turkey's 2010 constitutional referendum. *The Foreign Policy Centre*, 1-5.
- Izmaylov, R. I., Fakhrutdinov, R. R., & Galimzyanova, L. R. (2017). Kemalism: The Term, Content, and Contemporary Visions. *Journal of History Culture and Art Research*, 6(4), 1253-1259.
- Jenkins, G. (2008). Turkey's Latest Crisis. *Survival: Global Politics and Strategy*, 50(5), 5-12.
- Jenkins, G. (2014). The Balyoz Retrial and the Changing Politics of Turkish Justice. *Turkey Analyst*, 7(12), 1-3.
- Jenkins, G. (2011). Ergenekon, Sledgehammer, and the Politics of Turkish Justice: Conspiracies and Coincidences. *Middle East Review of International Affairs*, 15(2), 1-9.

- Karadjis, M. (1997). Behind the Turkish Military's "Soft Coup". Obtido em 20 de dezembro de 2021, de World History Archives: <http://www.hartford-hwp.com/archives/51/294.html>
- Keyman, E. (2016). Turkish foreign policy in the post-Arab Spring era: from proactive to buffer state. *Third World Quarterly*, 1-14.
- Khalifa, M. (2017). Turkish Foreign Policy in the Middle East After Arab Spring. *International Relations and Diplomacy(V)*, 102-111.
- Koch, L., Chaudhary, M., & Bilquees, F. (2002). Crisis in Turkey: Causes and Consequences. *The Pakistan Development Review*, 40(4), 467-486.
- Larrabee, F. S., & Tol, G. (2011). Turkey's Kurdish Challenge. *Survival*, 53(4), 143-152.
- Lord, C. (2018). Religious Politics in Turkey - From the Birth of the Republic to the AKP. Cambridge University Press.
- MacDonald, A. (2019). Ergenekon: The bizarre case that shaped modern Turkey. Obtido em 30 de março de 2022, de Middle East Eye: <https://www.middleeasteye.net/big-story/ergenekon-trials-turkey-gulen>
- Migdalovitz, C. (2007). Turkey's 2007 Elections: Crisis of Identity and Power. Washington: Congressional Research Service.
- Nuruzzaman, M. (2015). President Obama's Middle East Policy, 2009-2013. *Insight Turkey*, 17(1), 171-190.
- Outzen, R., & Cagaptay, S. (2022). The Third Age of Erdo\u011fan's Foreign Policy. Obtido em 10 de maio de 2022, de Center for European Policy Analysis: <https://cepa.org/the-third-age-of-erdogans-foreign-policy/>
- \u00d6zbudun, E. (2014). The 2014 Presidential Elections in Turkey: A Post-election Analysis. *Global Turkey In Europe*, 1-5.
- Ozpek, B. B., & Demirag, Y. (2014). Turkish foreign policy after the "Arab Spring": from agenda-setter state to agenda-entrepreneur state. *Israel Affairs*, 20(3), 328-346.
- Phillips, D. L. (2017). An Uncertain Ally Turkey Under Erdogan's Dictatorship. Transaction Publishers.
- Reuters. (01 de fevereiro de 2011). Turkey tells Mubarak to listen to the people. Obtido em 04 de maio de 2022, de Reuters: <https://www.reuters.com/article/idINIndia-54562520110201>
- Reynolds, M. A. (2012). Echoes of Empire: Turkey's Crisis of Kemalism and the Search for an Alternative Foreign Policy. Brookings.
- \u011fahin, M. (2020). Theorizing the Change: A Neoclassical Realist Approach to Turkish Foreign Policy. *Contemporary Review of the Middle East*, 7(4), 483-500.
- Schweller, R. (2004). Unanswered Threats A Neoclassical Realist Theory of Underbalancing. *International Security*, 159-201.
- Stranger, M. (2012). Review - Unanswered Threats. Obtido em 22 de abril de 2022, de E-International Relations: <https://www.e-ir.info/2012/03/27/review-unanswered-threats-2/>
- S\u00fcm\u00e9r, F. (2013). Turkey's Changing Foreign Policy and the Arab Spring. *The Innovation Journal*, 17(1), 1-28.
- Yavuz, M. (2001). Five stages of the construction of Kurdish nationalism. *Nationalism and Ethnic Politics*, 7(3), 1-24.
- Z\u00fcrcher, E. J. (2018). Erdo\u011fan's Anti-Western Discourse: Ideology or Opportunism? Obtido em 12 de abril de 2022, de Ahval: <https://ahvalnews.com/erdogan-turkey/erdogans-anti-western-discourse-ideology-or-opportunism>

Capital Psicológico Positivo como preditor do Desempenho Percebido: Estudo aplicado aos Alunos da Academia da Força Aérea



Fonte: Academia da Força Aérea (2021)

Autor: Gonçalo Filipe Cantante Margarido
Aspirante Aluno do Mestrado Integrado em Aeronáutica Militar na especialidade de
Piloto Aviador
Academia da Força Aérea, Sintra

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

Coorientadora: Capitão Ana Patrícia Gomes
Academia da Força Aérea, Sintra

Resumo

O presente estudo tem como principal objetivo analisar a influência do capital psicológico positivo no desempenho dos alunos da Academia da Força Aérea. Assim, foi analisada a relação entre estas duas variáveis, adicionando ainda o *work engagement* como variável mediadora nesta relação. Desta forma, o capital psicológico positivo promove o *work engagement*, que por consequência estimula a um melhor desempenho por parte dos alunos. Quanto à variável desempenho, esta foi analisada através do desempenho de tarefa, do desempenho contextual e dos comportamentos de trabalho contraproducentes.

Para conduzir esta investigação, realizou-se um estudo de natureza correlacional, transversal, com uma metodologia quantitativa, através de um inquérito por questionário. A amostra foi composta por 242 alunos da Academia da Força Aérea.

Os resultados confirmaram existir uma relação positiva e significativa entre o capital psicológico positivo e o *work engagement*, para com o desempenho individual. Relativamente às três vertentes de desempenho, à semelhança da literatura, provou-se existir uma relação positiva e significativa entre, tanto o capital psicológico positivo como o *work engagement*, para com o desempenho de tarefa e contextual, e negativa e significativa com os comportamentos de trabalho contraproducentes. Confirmou-se ainda a mediação parcial entre as três variáveis estudadas.

Esta investigação permitiu expandir o conhecimento das variáveis que conduzem a melhores níveis de desempenho dos alunos da Academia da Força Aérea, fornecendo a informação necessária, para que com as ferramentas certas, tais como programas de desenvolvimento do capital psicológico positivo, se consiga investir esforços nos preditores do desempenho individual.

Palavras-Chave: Capital Psicológico Positivo, Individual Work Performance, Work Engagement, Academia da Força Aérea

1. Introdução

Hoje, mais do que nunca, procuram-se novas formas de aumentar a competitividade no mercado de trabalho. Uma das formas encontradas para aumentar essa margem face a outras empresas, foi a aposta nos trabalhadores e na sua capacidade de melhorar.

Desta forma, começaram a procurar novos campos para investir esforços e assim aumentar a produtividade das organizações. Com isto, emergiram campos de estudo que procuram aumentar a produtividade das empresas, prestando especial atenção aos indivíduos e à sua capacidade em melhorar (Lopes, Cunha, & Palma, 2005), assim como à sua felicidade e bem-estar, pois acreditam ser uma mais valia (Wright, 2003). Decorrendo, surgiram novos conceitos, o Capital Psicológico Positivo e o *Work Engagement*.

Torna-se assim relevante perceber a relação do capital psicológico positivo com o *work engagement*, pois como refere a literatura, o *work engagement* é um preditor do desempenho e como tal, ao analisarmos esta componente de psicologia positiva nos trabalhadores, o objetivo será sempre que os níveis de *work engagement* sejam superiores, o que por sua vez levará a um melhor desempenho dos mesmos.

O desempenho é uma variável central em qualquer contexto, e em especial numa organização militar, devido à sua missão. Sendo destacado por Chambel, Lopes, Castanheira e Silveira (2019), numa revisão de literatura sobre as variáveis *burnout* e *work engagement* em contexto militar, que concluíram que efetivamente é necessário estudar os efeitos destas duas variáveis nos comportamentos dos militares, tal como no seu desempenho. Dando assim suporte à realização deste estudo.

Na literatura do comportamento organizacional, o desempenho percebido tem sido conceptualizado com as seguintes dimensões, desempenho de tarefa, desempenho contextual e comportamentos de trabalho contraproducentes. Estes três tipos de desempenho percebido surgem em 1990 com Campbell, que os define como sendo ações que contribuem para o cumprimento dos objetivos de uma empresa, o chamado *Individual Work Performance*.

Com o presente trabalho, pretende-se estudar a relação entre o capital psicológico positivo e o desempenho percebido dos alunos da Academia da Força Aérea, tendo o *work engagement* um papel fundamental como variável mediadora. Pressupõe-se assim, que o capital psicológico positivo é determinante para um estado psicológico de energia, entusiasmo e envolvimento com o estudo, que se consubstancia num melhor desempenho de tarefa e contextual e em menos comportamentos de trabalho contraproducentes, nos alunos da Academia da Força Aérea (AFA).

Tendo por base estes conceitos, torna-se pertinente a seguinte questão de partida:

“Qual a influência do Capital Psicológico Positivo no desempenho percebido dos alunos da Academia da Força Aérea?”

Decorrente desta pergunta de partida, surge a necessidade de aprofundar a temática, de forma a compreender o tipo de relações existentes entre as variáveis. Surgem assim as seguintes questões derivadas:

- Os Alunos com elevados níveis de Capital Psicológico Positivo apresentam um maior *Work Engagement*?
- Os Alunos com um elevado nível de Capital Psicológico Positivo apresentam um maior desempenho percebido, de tarefa e contextual, e menos comportamentos de trabalho contraproducentes?
- Os Alunos com um elevado nível de *Work Engagement* apresentam um maior desempenho percebido, de tarefa e contextual, e menos comportamentos de trabalho contraproducentes?
- O *Work Engagement* tem um papel mediador na relação Capital Psicológico Positivo e desempenho percebido, desempenho de tarefa, contextual e nos comportamentos de trabalho contraproducentes?

2. Revisão da Literatura

2.1 Capital Psicológico Positivo

O termo capital humano refere-se às competências, capacidades e conhecimento dos trabalhadores. Já o Capital Psicológico Positivo, doravante designado por *psycap*, reflete a forma como essas características do trabalhador podem ser geridas. Não só na medida do que as mesmas representam no presente, mas sim, na ideia de que as mesmas podem ser otimizadas, e no futuro, esses mesmos trabalhadores poderem vir a atingir melhores resultados. Reafirmando assim as vantagens em investir nas pessoas (Lopes, Cunha & Palma, 2005).

Para melhor compreender estes quatro campos da psicologia positiva, surgem os seguintes conceitos: auto-eficácia, esperança, otimismo e resiliência (Luthans, Youssef & Avolio, 2007). O termo auto-eficácia, foi estudado vários anos, tendo sido Albert Bandura, com a sua teoria sociocognitiva, quem mais se debruçou (Stoykova, 2013). Segundo Bandura, auto-eficácia pode ser definida como “a forma como as pessoas avaliam as suas capacidades e como, através da percepção da própria eficácia, isso se reflete na motivação e comportamento” (Bandura, 1982, p. 122). Já o termo esperança, é vista por Snyder, Irving e Anderson (1991), como um estado motivacional positivo, que leva o indivíduo a atingir o sucesso. Algo também importante de referir, é que efetivamente uma pessoa que apresente esta característica, muitas vezes inicia uma ação

com um determinado fim, e é capaz de estabelecer diversos caminhos de forma a alcançar esse objetivo, ainda que surjam algumas adversidades (Snyder, 1994). Segundo Luthans (2002), o otimismo é uma aptidão emocional e cognitiva que está diretamente relacionada com as expectativas que um certo indivíduo detém acerca não só do presente, mas também do futuro, e que de certa forma vai ditar a determinação do indivíduo em alcançar com sucesso os seus objetivos (Nunes, 2015). Segundo Luthans e Youssef (2004) e Page e Donohue (2004), o otimismo associa causas internas e permanentes a acontecimentos positivos, e por outro lado, qualquer situação temporária e específica é derivada de acontecimentos negativos e indesejáveis. Resiliência é definida por Yunes (2003), e no âmbito da psicologia, como um termo que é utilizado para justificar a capacidade de superação de obstáculos e crises, por parte de indivíduos, grupos ou organizações. Para Luthans, Youssef e Avolio (2007), um indivíduo com esta característica tem uma maior probabilidade de vir a desenvolver uma maior satisfação face ao trabalho, um aumento do comprometimento organizacional e uma melhoria do capital social.

2.2 Work Engagement

O *Work Engagement* é então definido por Schaufeli e colaboradores em 2002, como um estado motivacional positivo, gratificante e associado ao trabalho que é caracterizado por vigor, dedicação e absorção. Sendo vigor, quando um indivíduo apresenta “elevados níveis de energia e perseverança durante o trabalho, uma vontade de investir esforços nas tarefas e persistência mesmo confrontado com dificuldades” (Schaufeli et al., 2002, p. 74). Dedicação, quando um indivíduo se apresenta com “sentimentos de propósito e entusiasmo, inspirado, orgulhoso e competitivo” (Schaufeli et al., 2002, p. 74). E por último, absorção, como o nome indica, quando um indivíduo se concentra de tal forma no trabalho que o tempo passa sem o mesmo se aperceber, levando também a uma dificuldade em se separar do mesmo (Schaufeli et al., 2002, p. 75).

O *work engagement* tem-se destacado na literatura em virtude da influência positiva que tem demonstrado em variáveis de resultados. A título de exemplo, segundo Kahn (1990), indivíduos com elevados níveis de *engagement* mostram-se muito mais engajados no seu trabalho, porque efetivamente identificam-se com os mesmos. No fundo, aquele que se sentir mais *engaged* no seu trabalho, terá uma ligação muito mais forte e assim muito mais motivado estará para dar o seu melhor contributo para o sucesso da organização. Importante também será ressaltar que por terem um maior comprometimento com a organização, mais dificuldade terão em quebrar essa ligação com a mesma (Bakker & Schaufeli, 2014). Schaufeli (2013), ainda complementa defendendo que apesar do *engagement* estar diretamente relacionado com a satisfação e com o compromisso do indivíduo em ambiente laboral, demonstra evidências mais significativas quando associado ao desempenho no trabalho.

2.3 Individual Work Performance

O desempenho percebido é uma das condições essenciais para o sucesso nas várias tarefas/objetivos. Sendo assim torna-se crucial, que as organizações tomem as ações necessárias para motivar e satisfazer os indivíduos, de forma a potenciar esse desempenho (M. Cunha, Rego, R. Cunha, Cabral-Cardoso, & Neves, 2014).

Para estudar o conceito de desempenho percebido, utilizou-se a variável *Individual Work Performance*, *IWP*, que para a presente investigação demonstrou ser a que melhor se enquadrou. Desta forma, a partir deste momento designar-se-á o desempenho percebido como *IWP*.

Em 1990, Campbell define a *Individual Work Performance (IWP)* como sendo comportamentos/ações relevantes para os objetivos de uma organização. Nota-se desde logo uma mudança de paradigma. Começa-se a dar importância, não apenas aos resultados, mas sim aos comportamentos e ações dos trabalhadores.

Para Campbell (1990), o desempenho de tarefa torna-se a componente mais relevante da *IWP* e caracteriza-a como sendo “a proficiência com a qual os trabalhadores realizam as tarefas técnicas essenciais para o seu trabalho” (p. 708-709).

Anos mais tarde, Borman e Motowidlo (1993), ‘dividem’ a esfera desempenho em desempenho de tarefa e desempenho contextual ou extra-tarefa. O desempenho de tarefa define-se como a eficácia com que os responsáveis pelos cargos desenvolvem atividades que contribuem para o núcleo técnico, seja diretamente através da implementação de uma parte do seu processo tecnológico, ou indiretamente, proporcionando-lhe os materiais e/ou serviços necessários (Borman & Motowidlo, 1997). Borman e Motowidlo (1993) e Motowidlo, Borman e Schmit (1997), vêm ainda a acrescentar, que para além de todas as tarefas ditas obrigatórias por parte de cada individuo, ainda existe uma componente extra, tal como o nome indica, que pretende expandir ainda mais o sucesso da organização, através de ações a nível psicológico e social. Estes comportamentos vão para além do dever, para além do desempenho de tarefa (Brandão, 2010).

Finalmente Robinson e Bennett (1995), desenvolvem uma terceira parte integrante deste modelo através da sua análise empírica sobre comportamentos desviantes no local de trabalho. Estes comportamentos desviantes são todas as ações voluntárias dos indivíduos, que vão contra as regras da organização, colocando assim em risco outros trabalhadores e até mesmo a própria organização. A esta nova dimensão deu-se o nome de comportamentos de trabalho contraproducentes.

2.4 Hipóteses e Pergunta Específicas

Segundo Avey e colaboradores (2011), indivíduos com elevados níveis de *psycap*, são mais propensos a sentirem-se mais energéticos e a esforçarem-se mais, refletindo-se num desempenho superior durante longos períodos de tempo. Isto deve-se ao facto de indivíduos com grandes níveis de auto-eficácia se esforçarem em tarefas que acreditam ser capazes de resolver. Pelo facto também de esses indivíduos possuírem a vontade de resolver problemas e desenvolverem diversas resoluções para os mesmos (esperança), por admitirem que acontecimentos positivos se devem a causas internas e terem efetivamente a expectativa de que os resultados serão positivos (otimismo), e por último por responderem de forma positiva e com grande resiliência sempre que encontram adversidades e contratempos (resiliência). Este resultado confirma-se com um estudo conduzido na Nigéria, em 2011, aplicado aos trabalhadores do setor público, no qual se avaliou o efeito do *psycap* no *work engagement*, explorando o papel mediador da inteligência emocional. Com uma amostra de 557 trabalhadores, os resultados mostraram uma mediação total da variável inteligência emocional, e que o *psycap* tem uma influência positiva e significativa no *work engagement* (George & Okon, 2021). Desta forma formula-se a seguinte hipótese:

H1: O PsyCap está positivamente associado ao work engagement.

De acordo com o estudo de Teixeira, Soares e Lopes (2015), existe evidencia estatística entre o *psycap* e o desempenho. Este estudo, aplicado a uma amostra de 100 vendedores de uma organização portuguesa de prestação de serviços, mostra que há uma relação positiva entre o *psycap* e os dois tipos de desempenho estudados, de tarefa e contextual. Conforme a literatura, são vários os autores que confirmam existir uma relação positiva entre estas duas variáveis,

sendo eles Avey, Luthans e Youssef (2009), Luthans (2002), Luthans, Avolio, Walumbwa e Li (2005), e Luthans, Youssef e Avolio (2007). Desta forma, formulam-se as seguintes hipóteses:

H2: O *PsyCap* está positivamente associado ao *IWP*.

H2a: O *PsyCap* está positivamente associado ao desempenho de tarefa.

H2b: O *PsyCap* está positivamente associado ao desempenho contextual.

Num estudo de Alqasmi, Manzoor e Hassan (2015), cujo objetivo foi explorar a interferência do *psycap* no controlo dos comportamentos de trabalho contraproducentes, demonstrou-se existir uma relação significativa, na medida em que as esferas do *psycap* têm a força para limitar os comportamentos desviantes, em trabalhadores numa determinada organização. Estudos como Rodríguez-Cifuentes, Segura-Camacho, García-Ael e Topa (2020), Raaghul (2014), e T. Shah e S. Shah (2016) vêm a corroborar com este pressuposto. Formula-se assim a seguinte hipótese:

H2c: O *PsyCap* está negativamente associado aos comportamentos de trabalho contraproducentes.

Christian, Garza e Slaughter (2011), desenvolveram um modelo de meta análise que concluiu que o *engagement* é um preditor do desempenho no trabalho, seja no caso do desempenho de tarefa ou no desempenho contextual. Schaufeli (2013) no seu estudo ainda reforça que a razão de o *engagement* possuir uma relação tão forte com o desempenho, mais do que qualquer outra atitude no trabalho, se deve ao facto de refletir uma força energética que guia o indivíduo na direção certa, ao invés de uma sensação de satisfação, comum para a satisfação no trabalho.

Tendo por base a literatura acima exposta, formulam-se outras três hipóteses:

H3: O *Work Engagement* está positivamente associado ao *IWP*.

H3a: O *Work Engagement* está positivamente associado ao desempenho de tarefa.

H3b: O *Work Engagement* está positivamente associado ao desempenho contextual.

Segundo Lee e Allen (2002), os comportamentos de trabalho contraproducentes contêm tanto componentes afetivos como cognitivos. Sendo assim, emoções negativas exercem efeitos diretos e indiretos nos comportamentos desviantes, considerando o *engagement* como uma resposta positiva na esfera emocional. Os autores concluem assim, que a resposta a uma emoção afetiva positiva nas tarefas de um funcionário, deverão ter uma relação negativa com os comportamentos de trabalho contraproducentes. Mais concretamente, existe uma relação negativa entre os comportamentos desviantes e o *work engagement*. Vários estudos vêm a confirmar esta teoria (Rich, 2006; Colbert, Mount, Harter, Witt, & Barrick, 2004). Sendo assim formula-se uma hipótese adicional:

H3c: O *Work Engagement* está negativamente associado aos comportamentos de trabalho contraproducentes.

Alessandri, Consiglio, Luthans e Borgogni (2018), realizaram um estudo a uma empresa de comunicações, com uma amostra de 420 indivíduos, com o objetivo de testar um modelo dinâmico do impacto do *PsyCap* no *Work Engagement* e na *Performance no Trabalho*. Uma das hipóteses consideradas foi precisamente, o *work engagement* como mediador dos níveis de *psycap* e performance no trabalho. De ressalvar que neste estudo as hipóteses referentes a esta mediação do *work engagement* foram ambas confirmadas. Estes resultados também foram confirmados em outros estudos, não só para o desempenho individual, mas também para o de tarefa e contextual (Chen, 2015; Zuberbühler, Calcagni, Martínez, & Salanova, 2021). Assim formulam-se as restantes hipóteses do estudo:

H4: O *Work Engagement* tem um efeito mediador na relação entre o *PsyCap* e o *IWP*.

H4a: O *Work Engagement* tem um efeito mediador na relação entre o *PsyCap* e o desempenho de tarefa.

H4b: O *Work Engagement* tem um efeito mediador na relação entre o *PsyCap* e o desempenho contextual.

H4c: O *Work Engagement* tem um efeito mediador na relação entre o *PsyCap* e os comportamentos de trabalho contraproducentes.

3. Método

No presente capítulo serão caracterizados os instrumentos de recolha de dados, os procedimentos de recolha e análise de dados e ainda, a população e amostra.

O método adotado, foi o quantitativo, usado para testar teorias, analisando a relação entre variáveis. Sendo que as mesmas poderão ser testadas através de instrumentos que permitam, posteriormente, realizar análises estatísticas (J. W. Creswell & J. D. Creswell, 2018). Dada a natureza do presente estudo, recorreu-se à utilização de um inquérito por questionário, para a recolha de dados. Importante também será salientar que se trata de um estudo hipotético-dedutivo, no qual, partindo da literatura anteriormente analisada, se desenvolveu um modelo de análise relacionando as três variáveis de estudo, aplicadas à Academia da Força Aérea.

3.1 Caracterização do Instrumento de Recolha de Dados

De forma a cumprir os objetivos definidos, foi desenvolvido um questionário, que se encontra dividido em quatro secções distintas. A primeira secção é composta por questões de natureza puramente demográfica (sexo, idade, especialidade e posto), já as restantes secções, focam-se nas três principais variáveis deste estudo. Sendo elas o *PsyCap*, o *Work Engagement* e o *Individual Work Performance*.

Para se operacionalizar a variável *PsyCap*, foi utilizado o questionário PCQ-24, desenvolvido por Luthans, Youssef e Avolio (2007). Este é composto por 24 questões, que avaliam as quatro dimensões (auto-efficácia, otimismo, esperança, resiliência), sendo cada uma delas avaliada em seis itens, numa escala *likert* de 1 a 6, em que 1 corresponde a “Discordo Totalmente” e 6 a “Concordo Totalmente”. A respetiva tradução para português foi realizada por Matias e D’Oliveira (2011), num trabalho não publicado e retirado da dissertação de mestrado de Moreira (2012). O instrumento de medida sofreu ainda um ligeiro ajuste, de forma a adaptar ao contexto militar, tendo sido posteriormente revisto e aprovado pelas orientadoras.

Para operacionalizar a variável *Work Engagement* utilizou-se a *Utrecht Work Engagement Scale* adaptada para estudantes, desenvolvida por Schaufeli e Bakker (2004), composta por 17 questões, que se distribuem em três componentes, vigor, dedicação e absorção. A escala utilizada foi do tipo *likert*, de 0 “nunca/nenhuma vez” a 6 “Sempre/todos os dias”. Por último, o *Individual Work Performance Questionnaire*, IWPQ de Koopmans, Bernaards, Hildebrandt, de Vet e van der Beek (2014). Este questionário permitiu medir e classificar o desempenho percebido de um indivíduo, em 18 itens, através de três dimensões, desempenho de tarefa, desempenho contextual e comportamentos de trabalho contraproducentes. Esta escala apresenta um formato de resposta fechado, do tipo *likert*, com 5 opções de resposta, desde 0 “Raramente” a 4 “Sempre”. A tradução foi retirada da dissertação de mestrado de Neves (2015).

3.2 Procedimento de Recolha e Análise de Dados

Para se proceder à recolha de dados, foi necessário realizar em antemão um requerimento a Sua Excelência o Comandante da Academia da Força Aérea, de forma a ser aceite a aplicação do questionário. Após concedida autorização para a aplicação do questionário, através da ajuda da plataforma *Google Forms*, o questionário foi divulgado por *email* a todos os alunos, com a

respetiva nota introdutória e contextualização das variáveis em estudo, tendo as respostas sido confidenciais e anónimas, destinando-se exclusivamente para fins de investigação científica.

Posteriormente, para realizar o tratamento dos dados utilizou-se a plataforma *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versão 28.0. Inicialmente procedeu-se à análise das qualidades psicométricas dos instrumentos de medida, através da análise fatorial, exploratória e confirmatória, de fiabilidade, através dos *Alfas de Cronbach*, e de sensibilidade através dos testes Kolmogorov-Smirnov, e posteriormente através da análise da assimetria e curtose. Seguidamente realizaram-se análises descritivas das variáveis em estudo, onde foi possível verificar e comparar as médias e desvios padrão das mesmas. Finalmente procedeu-se à análise correlacional, assim como à análise das hipóteses de mediação, através da ferramenta macro Process v3.1.

3.3 População e Amostra

A população alvo deste estudo foram todos os alunos da Academia da Força Aérea, no atual ano letivo 2021/2022.

Quanto à amostragem, esta é não probabilística ou por conveniência, aplicada a todos os alunos do 1.º ao 7.º ano. Foram reunidos 242 questionários, numa população de 255 alunos, o que se reflete numa taxa de resposta de 94,9%.

4. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da análise dos dados recolhidos.

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.

Na tabela 1, é possível aferir que a variável com o valor médio mais elevado é o desempenho contextual, com 2.93, numa escala de 0 a 4. Já a variável que apresenta o valor médio mais baixo, são os comportamentos de trabalho contraproducentes, com 1.69, numa escala de 0 a 4. Importa sublinhar que foi realizada uma conversão para percentagem de forma a confirmar o referido.

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis globais

	Média	Desvio padrão
PsyCap	4.56	0.48
Work Engagement	3.97	0.81
Individual Work Performance	2.73	0.40
Desempenho Tarefa	2.83	0.53
Desempenho Contextual	2.93	0.52
Comportamentos Trabalho Contraproducente	1.69	0.80

De forma a facilitar a interpretação, quando analisada a variável *IWP*, como um todo, inverteram-se os itens na negativa, da dimensão comportamentos de trabalho contraproducente, de forma a que todas as dimensões dessa variável sejam analisadas no mesmo ‘sentido’. Por outro lado, quando analisados os comportamentos de trabalho contraproducente, de forma

isolada, utilizaram-se os itens originais. Assim sendo, uma média mais baixa, como é o caso, é positivo, visto que quanto menor o valor desta dimensão, menores serão os comportamentos negativos e prejudiciais ao bom desempenho percebido de um indivíduo.

4.2 Correlação entre as Variáveis

Foi realizada a análise correlacional entre as diferentes variáveis, de forma a medir a intensidade e direção da relação entre as mesmas. Para isso utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, que mede precisamente esse aspecto.

Através da análise da tabela 2 foi possível verificar que a maioria das correlações são significativas no nível 0.01. Podemos ainda verificar que as variáveis, PsyCap e IWP se correlacionam com uma intensidade de 0.63 ($p < 0.01$), apresentando assim, a correlação mais forte do estudo. O que significa que estas duas variáveis se correlacionam de forma positiva, ou seja, quando uma aumenta a outra também aumenta. A relação entre o IWP e o desempenho contextual, apesar de apresentar a relação mais forte, não será considerada, dado que o desempenho contextual é uma dimensão do IWP. O mesmo se aplica no caso inverso, com a relação mais forte e negativa, entre o IWP e os comportamentos de trabalho contraproducente.

Sendo assim, as duas variáveis com a correlação mais forte e negativa, são o *psycap* e os comportamentos de trabalho contraproducente, com um valor de -0.35. O que significa que estas duas variáveis se correlacionam de forma negativa, quando uma aumenta a outra diminui.

Tabela 2 - Análise Correlacional entre as variáveis

	1	2	3	4	5	6
1 PsyCap	-					
2 Work Engagement	0.37*	-				
3 Individual Work Performance	0.63*	0.48*	-			
4 Desempenho Tarefa	0.39*	0.17*	0.62*	-		
5 Desempenho Contextual	0.51*	0.42*	0.79*	0.49*	-	
6 Comportamentos de Trabalho Contraproducente	-0.35*	-0.32*	-0.57*	0.05	-0.07	-

*A correlação é significativa no nível 0.01

4.3 Testes da Hipótese de Mediação

De forma a confirmar a hipótese de mediação, recorreu-se à ferramenta macro Process v3.1, para o SPSS. A utilização desta ferramenta permite testar de uma forma automatizada os efeitos da mediação, percebendo assim, se existe uma relação entre a variável independente, PsyCap e a variável dependente IWP, mediada pela variável mediadora, Work Engagement.

Foi ainda realizado o teste de Sobel, de forma a dar mais suporte aos modelos de mediação do estudo, no entanto devido à baixa fiabilidade deste teste, no que diz respeito à condição da relação ab ter de apresentar uma distribuição normal, utilizou-se ainda o método bootstrap, para estimar os efeitos indiretos dos modelos de mediação (Hayes, 2009).

Foi assim possível verificar que o *psycap* tem um contributo significativo no *work engagement*, explicando em 14% ($p < 0.01$, $R^2 = 0.14$), e também no IWP, explicando em 40% ($p < 0.01$, $R^2 = 0.40$). Na hipótese de mediação entre o PsyCap e o IWP, obteve-se um $p < 0.01$, no teste de Sobel e também através do método bootstrap, um efeito indireto significativo ($B=$

0.877, 95% Boot IC [0.0469, 0.1411]). Ainda é possível verificar que o modelo tem um contributo significativo no *IWP*, explicando em 47% a sua variância ($p < 0.01$, $R^2 = 0.47$).

Observou-se também que o modelo tem um contributo significativo no desempenho de tarefa, com um $p < 0.01$, explicando em 15%. Ainda neste modelo entre o *psycap* e o desempenho de tarefa, mediado pelo *work engagement*, confirmou-se a hipótese de mediação, através do teste de *Sobel* em que se obteve um $p = 0.017$. No entanto, denotou-se que não existe uma relação significativa entre o *work engagement* e o desempenho de tarefa ($p = 0.69$, $R^2 = 0.15$). Verificando-se assim não existir mediação, o que se vem a confirmar com a inexistência de um efeito indireto significativo ($B = 0.0104$, 95% Boot IC [-0.0477, 0.0775]).

No modelo entre o *psycap* e o desempenho contextual, mediado pelo *work engagement* verificou-se também que o *psycap* tem um contributo significativo no desempenho contextual, com um $p = 0.00$, explicando em 26%. Ainda neste modelo de mediação, confirmou-se a hipótese de mediação, através do teste de *Sobel* em que se obteve um $p < 0.01$, e também através do método *bootstrap* ($B = 0.1084$, 95% Boot IC [0.0527, 0.1781]). Ainda foi possível verificar que o modelo tem um contributo significativo no desempenho contextual, explicando em 32% a sua variância ($p < 0.01$, $R^2 = 0.32$).

Por último, no modelo entre o *psycap* e os comportamentos de trabalho contraproducentes, mediado pelo *work engagement*, observou-se que o *psycap* tem um contributo significativo nos comportamentos de trabalho contraprodutivo, com um $p < 0.01$, explicando em 12%. Ainda neste modelo, confirmou-se a hipótese de mediação, através do teste de *Sobel* em que se obteve um $p < 0.01$, e também através do método *bootstrap* ($B = -0.1320$, 95% Boot IC [-0.2274, -0.0510]). Ainda é possível verificar que o *work engagement* tem um contributo significativo nos comportamentos de trabalho contraprodutivo, explicando em 16% a sua variância ($p = 0.00$, $R^2 = 0.16$).

5. Discussão de Resultados

Neste capítulo serão analisados os resultados do estudo. Primeiramente, na análise descritiva, foi possível aferir que os alunos de uma forma geral percecionam níveis mais elevados de desempenho contextual ($M = 2.93$) e níveis mais baixos de comportamentos de trabalho contraproducentes ($M = 1.69$). Estes resultados mostram que os alunos percecionam as tarefas extra como sendo mais importantes, sobressaindo assim o sentimento de cumprimento da missão, dando mais foco na resolução de problemas que afetam o funcionamento da Academia da Força Aérea. Já os baixos níveis percecionados, na esfera, comportamentos de trabalho contraprodutivo, demonstram que os alunos acreditam não ter atitudes e comportamentos muito vincados que possam comprometer os seus objetivos enquanto alunos da Academia. Estes resultados evidenciam uma forte componente de deseabilidade social, como refletido em outros estudos de escalas de autorrelato (Crandall, Crandall, & Katrovsky, 1965; Crowne & Marlowe, 1960; Guedes, 2015).

Quanto às hipóteses do estudo, foi possível confirmar todas, à exceção da hipótese H4a, através da análise correlacional e das regressões lineares realizadas com o apoio da ferramenta macro Process.

Teste da Hipótese H1 – A hipótese H1 pretendia testar se o *psycap* está positivamente associado ao *work engagement*. Através do teste correlacional, foi possível verificar uma correlação positiva ($r = 0.37$, $p < 0.01$), onde a percepção de *psycap* dos alunos da AFA, explica em 14% a variação do *work engagement* ($R^2 = 0.14$). Sendo assim, a um aumento dos níveis de *psycap* está também associado um aumento dos níveis de *work engagement*. Estes resultados vão ao encontro da literatura anteriormente analisada (Avey, Reichard, Luthans, & Mhatre, 2011;

George & Okon, 2021; Harris, 2012; McElravy, Matkin, & Hastings, 2017; Niswaty, Wirawan, Akib, Saggaf, & Daraba, 2021). Sendo assim **confirma-se H1**.

Teste das Hipóteses H2 - As hipóteses H2, H2a, H2b e H2c pretendiam testar se o *psycap* está positivamente associado ao *IWP* e respetivas dimensões. Através do teste correlacional, foi possível verificar que existe uma correlação positiva entre o *PsyCap* e o *IWP* ($r = 0.63$), desempenho de tarefa ($r = 0.39$), contextual ($r = 0.51$) e negativa com os comportamentos de trabalhado contraproducentes ($r = -0.35$), todas elas significativas ($p \leq 0.01$). Os resultados mostram que 40% das variações no *IWP* dos alunos são explicadas pelos níveis de *psycap* ($R^2 = 0.40$). Por outro lado, os níveis do *psycap* explicam em 15% as variações dos níveis do desempenho de tarefa ($R^2 = 0.15$). Foi também possível verificar que 26% das variações no desempenho contextual são explicadas pelos níveis de *psycap* ($R^2 = 0.26$). Os resultados mostram ainda que 12% das variações nos comportamentos de trabalho contraproducentes se devem a variações nos níveis de *psycap* ($R^2 = 0.12$). Estes resultados vão ao encontro da literatura anteriormente analisada (Avey, Reichard, Luthans, & Mhatre, 2011; Kappagoda, Othman, & Alwis, 2014; Luthans, 2002; Luthans, Avolio, Walumbwa, & Li, 2005; Luthans, Youssef, & Avolio, 2007; Shah & Shah, 2016; Teixeira, Soares, & Lopes, 2015). Sendo assim **confirmam-se as hipóteses H2, H2a, H2b e H2c**.

Teste das Hipóteses H3 e H4a - As hipóteses H3, H3a, H3b e H3c pretendiam testar se o *work engagement* está positivamente associado ao *IWP* e respetivas dimensões. Através do teste correlacional, foi possível verificar que existe uma correlação positiva entre o *work engagement* e o *IWP* ($r = 0.48$), desempenho de tarefa ($r = 0.17$), contextual ($r = 0.42$) e negativa com os comportamentos de trabalhado contraproducentes ($r = -0.32$), todas elas significativas ($p = 0.01$). Verificou-se também que 47% das variações no *IWP* se devem a variações nos níveis de *psycap* e *work engagement* ($R^2 = 0.47$), que 32% das variações no desempenho contextual se devem a variações nos níveis do modelo ($R^2 = 0.32$), e que 16% das variações nos comportamentos de trabalho contraproducentes se devem a variações nos níveis do modelo ($R^2 = 0.16$), no entanto, a regressão linear entre o *work engagement* e o desempenho de tarefa não foi possível confirmar ($R^2 = 0.15$, $p = 0.69$). Sendo assim as hipóteses **H3, H3a, H3b e H3c são todas confirmadas, à exceção da H4a**, tal como referido anteriormente (Christian, Garza, & Slaughter, 2011; Colbert, Mount, Harter, Witt, & Barrick, 2004; Schaufeli, 2013). Uma justificação para os resultados não irem ao encontro do esperado, poderá ser o facto da forma de trabalhar na Academia da Força Aérea ser completamente diferente da forma de trabalhar de um trabalhador ou estudante numa empresa/instituição de ensino, respetivamente. Um aluno da Academia, por ser ao mesmo tempo militar, foca as suas atenções noutras componentes, neste caso na preocupação em garantir o bom funcionamento da sua Academia.

Teste das Hipóteses H4 - As hipóteses H4, H4a, H4b e H4c pretendiam testar se o *psycap*, mediado pelo *work engagement* atuava positivamente sobre o *IWP* e respetivas dimensões, e negativamente sobre os comportamentos desviantes. Como verificado anteriormente, não foi possível confirmar H4a, no entanto H4, H4b e H4c foram todas confirmadas. Como verificado no capítulo 4.3, todas as regressões entre as diferentes variáveis foram significativas à exceção da regressão linear entre o *work engagement* e o desempenho de tarefa, e foi também possível confirmar a inexistência de um efeito indireto significativo em todos os modelos à exceção do modelo da hipótese H4a. Sendo assim **confirmam-se as hipóteses H4, H4b e H4c**, o que se vem a confirmar com a literatura anteriormente analisada (Alessandri, Consiglio, Luthans, & Borgogni, 2018; Chen, 2015).

6. Conclusão

Inicialmente foram propostos um conjunto de objetivos, assim como uma pergunta de partida, “Qual a influência do Capital Psicológico Positivo, no desempenho percebido dos alunos da Academia da Força Aérea?”, que ao longo deste estudo foram respondidos. Agora, será elaborado um balanço destas respostas.

Através da análise dos dados, com o propósito de dar resposta a esses objetivos, foi possível compreender melhor a importância das variáveis *psycap* e *work engagement* para melhorar o desempenho dos alunos da Academia da Força Aérea. Constatou-se que estas duas variáveis, para além de se correlacionarem entre si, se correlacionam também de forma positiva com o *IWP*, desempenho de tarefa e contextual, e de forma negativa com os comportamentos de trabalho contraproducentes. De salientar que a correlação mais forte, foi entre as variáveis *psycap* e *IWP*.

Foi ainda possível confirmar as hipóteses de mediação, garantindo assim o papel de mediador da variável *work engagement* na relação entre o *psycap* e o *IWP*, assim como com as respetivas dimensões do *IWP*, à exceção do desempenho de tarefa. Na verdade, não foi possível concluir que o *work engagement* é um preditor do desempenho de tarefa, apesar de existir associação nesta relação. Através da literatura, não foi possível dar resposta a esta conclusão dada a sua especificidade, no entanto uma possível justificação poderá ser o facto de os alunos da AFA, muitas vezes darem mais destaque às tarefas extra, como observado na análise correlacional, preocupando-se mais com a resolução de problemas internos, que levam ao sucesso da organização.

Este estudo permitiu assim compreender algumas das mais importantes variáveis que levam a superiores níveis de desempenho por parte dos alunos, tendo-se tratado de uma investigação inovadora, na relação entre a psicologia positiva e o desempenho percebido dos alunos da Academia da Força Aérea.

Foi ainda possível perceber que o foco principal dos alunos é de facto o de garantir o correto funcionamento da organização em que trabalham e que tanto prezam, indícios da formação das bases necessárias como futuros gestores e líderes da Força Aérea.

Como limitações do presente estudo salienta-se o possível enviesamento devido ao facto de se tratar de um instrumento de medida de autorrelato, expondo assim as percepções dos alunos e não o seu desempenho real. Também o facto de se tratar de um estudo transversal, não permitiu aferir com confiança a evolução dos níveis das variáveis estudadas. Por último, o facto de a investigação ter sido realizada num período de adaptação, devido à situação pandémica, as relações sociais entre alunos e consequentemente a sua motivação poderá ter sofrido alterações.

Como sugestões futuras, seria interessante cruzar os dados das percepções dos alunos, com os resultados reais de desempenho dos mesmos (notas nas vertentes de avaliação). Seria igualmente interessante perceber quais as dimensões do *psycap* e do *work engagement* que mais impacto têm no desempenho, dado que a presente investigação não focou esse aspeto. À semelhança do que foi anteriormente referido, este trata-se de um estudo transversal, mas de facto um estudo longitudinal poderia contribuir para o enriquecimento desta temática, assim como uma expansão deste estudo para as restantes Academias Militares, para que com os resultados finais se conseguissem partilhar experiências, sempre com o intuito de promover uma melhor instrução. Finalmente, e de forma a ‘abrir os horizontes’, aplicar questionários de perguntas abertas ou entrevistas, para encontrar novas variáveis preditoras do desempenho, tais como o *Learning Empowerment* ou a Inteligência Emocional.

Referências Bibliográficas

- Alessandri, G., Consiglio, C., Luthans, F., & Borgogni, L. (2018). Testing a dynamic model of the impact of psychological capital on work engagement and job performance. *Career Development International*, 23(1), 33–47. <https://doi.org/10.1108/CDI-11-2016-0210>.
- Alqasmi, T., Manzoor, S. R., & Hassan, S. (2015). Psychological Capital Intervention towards Controlling Counterproductive Work Behavior. *Abasyn Journal of Social Sciences*, 8(1), 62-73.
- Avey, J. B., Reichard, R. J., Luthans, F., & Mhatre, K. H. (2011). Meta-analysis of the impact of positive psychological capital on employee attitudes, behaviors, and performance. *Human Resource Development Quarterly*, 22(2), 127-152. <https://doi.org/10.1002/hrdq.20070>.
- Avey, J., Luthans, F., & Youssef, C. (2009). The Additive Value of Positive Psychological Capital in Predicting Work Attitudes and Behaviors. *Journal of Management*, 36(2), 430-452. <https://doi.org/10.1177/0149206308329961>.
- Bakker, A. B., & Schaufeli, W. B. (2014). Work engagement. Em: P.C. Flood & Y. Freeney (Eds.), *Organizational Behaviour volume of The Blackwell Encyclopedia of Management* (pp. 1-6). West Sussex: Wiley.
- Bandura, A. (1982). Self-efficacy mechanism in human agency. *American Psychologist*. 37, No. 2, 122-147. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.37.2.122>.
- Borman, W. C., & Motowidlo, S. J. (1993). Expanding the criterion domain to include elements of contextual performance. Em: N. Schmitt & W. C. Borman (Eds.), *Personnel Selection in Organizations*, Jossey-Bass, San Francisco, 71-98.
- Borman, W., & Motowidlo, S. J. (1997). Task performance and contextual performance: The meaning for personnel selection research. *Human performance*, 10, 99-109.
- Brandão, C. d. (2010). O Desempenho Individual de dirigentes de topo da Administração Pública Portuguesa: um contributo para o desenvolvimento de uma taxionomia comportamental e motivacional. *Faculdade de Psicologia e de Ciências da Educação da Universidade do Porto*.
- Campbell, J. P. (1990). Modeling the performance prediction problem in industrial and organizational psychology. Em: M. D. Dunnette & L. M. Hough (Eds.), *Handbook of industrial and organizational psychology* (pp. 687–732). Consulting Psychologists Press.
- Chambel, M. J., Lopes, S., Castanheira, F., & Silveira, C. R. (2019). Militaries' Burnout and Work Engagement: A Qualitative Systematic Literature Review. Em U. Kumar, *The Routledge International Handbook of Military Psychology and Mental Health* (pp. 283-316). Routledge.
- Chen, S.-L. (2015). The relationship of leader psychological capital and follower psychological capital, job engagement and job performance: a multilevel mediating perspective. *The International Journal of Human Resource Management*, 26(18), 2349-2365. <https://doi.org/10.1080/09585192.2015.1020443>.
- Christian, M. S., Garza, A. S., & Slaughter, J. E. (2011). Work Engagement: A Quantitative Review and Test of its Relations with Task and Contextual Performance. *Personnel Psychology*, 64(1), 89-136. <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.2010.01203.x>.
- Colbert, A. E., Mount, M. K., Harter, J. K., Witt, L. A., & Barrick, M. R. (2004). Interactive Effects of Personality and Perceptions of the Work Situation on Workplace Deviance. *Journal of Applied Psychology*, 89(4), 599–609. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.89.4.599>.
- Crandall, V. C., Crandall, V. J., & Katrovsky, W. (1965). A children's social desirability questionnaire. *Journal of Consulting Psychology*, 29(1), 27-36. <https://doi.org/10.1037/h0020966>.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (5th ed.). Los Angeles: SAGE Publications. ISBN 13: 9781506386706.

- Crowne, D. P., & Marlowe, D. (1960). A new scale of social desirability independent of psychopathology. *Journal of Consulting Psychology*, 24(4), 349–354. <https://doi.org/10.1037/h0047358>.
- Cunha, M., Rego, A., Cunha, R., Cardoso, C., & Neves, P. (2014). *Manual de Comportamento Organizacional e Gestão*. Editora Rh.
- George, O. J., & Okon, S. E. (2021). Psychological Capital and Work Engagement among Employees in the Nigerian Public Sector: The Mediating Role of Emotional Intelligence. *International Journal of Public Administration*, <https://doi.org/10.1080/01900692.2021.2001010>.
- Guedes, D. (2015). Comparação da deseabilidade social entre uma amostra de pais em avaliação das competências parentais e uma amostra de controlo [Dissertação de mestrado, Faculdade de Psicologia e de Ciências da Educação da Universidade de Coimbra]. <http://hdl.handle.net/10316/31336>.
- Harris, C. (2012). Relationships between psychological capital, work engagement and organisational citizenship behaviour in South African automotive dealerships. *Doctoral dissertation, Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, South Africa*.
- Hayes, A. (2009). Beyond Baron and Kenny: Statistical Mediation Analysis in the New Millennium. *Communication Monographs*, 76(4), 408-420. <https://doi.org/10.1080/03637750903310360>.
- Kahn, W. (1990). Psychological conditions of personal engagement and disengagement at work. *Academy of Management Journal*, 692-772.
- Kappagoda, S., Othman, H., & Alwis, G. (2014). Psychological Capital and Job Performance: The Mediating Role of Work Attitudes. *Journal of Human Resource and Sustainability Studies*, 2(2), 102-116. <https://doi.org/10.4236/jhrss.2014.22009>.
- Koopmans, L., Bernaards, C. M., Hildebrandt, V. H., de Vet, H. C., & van der Beek, A. J. (2014). Construct Validity of the Individual Work Performance Questionnaire. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 56(3), 331-337. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000113>.
- Lee, K., & Allen, N. J. (2002). Organizational citizenship behavior and workplace deviance: The role of affect and cognition. *Journal of Applied Psychology*, 87(1), 131-142. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.87.1.131>.
- Lopes, M. P., Cunha, M. P., & Palma, P. J. (2005). Positive psychological capital: Distinguishing profiles and their impact on organizational climate. *Manuscript under review*.
- Luthans, F. (2002). Positive organizational behaviour: Developing and managing psychological strengths. *Academy of Management Executive*, 16(1), 57-75. <http://dx.doi.org/10.5465/AME.2002.6640181>.
- Luthans, F., & Youssef, C. M. (2004). Human, Social and Now Positive Psychological Capital Management: Investing in People for Competitive Advantage. *Organizational Dynamics*, 33(2), 143-160. <https://doi.org/10.1016/j.orgdyn.2004.01.003>.
- Luthans, F., Avolio, B. J., Walumbwa, F. O., & Li, W. (2005). The psychological capital of Chinese workers: exploring the relationship with performance. *Management and Organization Review*, 249-271. <https://doi.org/10.1111/j.1740-8784.2005.00011.x>.
- Luthans, F., Youssef, C. M., & Avolio, B. J. (2007). *Psychological capital. Developing the human competitive edge*. New York: Oxford University Press.
- Matias, M., & D'Oliveira, T. C. (2011). Adaptação para português da escala Psychological Capital Questionnaire (PCQ-24). *Lisboa: Trabalho não publicado*.
- McElravy, L., Matkin, G., & Hastings, L. (2017). How Can Service-Learning Prepare Students for the Workforce? Exploring the Potential of Positive Psychological Capital. *The Journal of Leadership Education*, 16(3), 97-117. <https://doi.org/10.12806/V16/I3/T1>.

- Moreira, C. (2012). Quão perto é perto o suficiente: a influência do capital psicológico positivo, do envolvimento no trabalho e da segurança. [Dissertação de mestrado, ISPA - Instituto Universitário]. Repositório do ISPA. <http://hdl.handle.net/10400.12/2317>.
- Motowidlo, S., Borman, W., & Schmit, M. J. (1997). A theory of individual differences in task and contextual performance. *Human performance*, 10(2), 71-83. https://doi.org/10.1207/s15327043hup1002_1.
- Neves, I. (2015). A liderança e a sua importância na gestão de equipas comerciais [Dissertação de mestrado, Faculdade de Economia Universidade do Porto]. *Publicações SASUP*. https://sigarra.up.pt/sasup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=37275.
- Niswaty, R., Wirawan, H., Akib, H., Saggaf, M. S., & Daraba, D. (2021). Investigating the effect of authentic leadership and employees' psychological capital on work engagement: evidence from Indonesia. *CellPress*, 7(5), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06992>.
- Page, L. F., & Donohue, R. (2004). Positive psychological capital: A preliminary exploration of the construct. *Monash University. Business and Economics*, Working Paper 51/04.
- Raaghul, R. (2014). An Empirical Study on Psychological Capital in Relation to Organizational Citizenship Behavior and Counter-Productive Work Behavior. *Department of Management Studies, School of Management*.
- Rich, B. L. (2006). Job engagement: Construct validation and relationships with job satisfaction, job involvement, and intrinsic motivation. *University of Florida*.
- Robinson, S. L., & Bennett, R. J. (1995). A Typology of Deviant Workplace Behaviors: A Multidimensional Scaling Study. *The Academy of Management Journal* 38(2), 555-572. <https://doi.org/10.2307/256693>.
- Rodríguez-Cifuentes, F., Segura-Camacho, A., García-Ael, C., & Topa, G. (2020). The Mediating Role of Psychological Capital between Motivational Orientations and Their Organizational Consequences, 17(13). *Environmental Research and Public Health*.
- Schaufeli, W. B. (2013). What is engagement?. In C. Truss, K. Alfes, R. Delbridge, A. Shantz, & E. Soane (Eds.). *Employee Engagement in Theory and Practice*, 1-37.
- Schaufeli, W. B., Salanova, M., González-Romá, V., & Bakker, A. B. (2002). The measurement of engagement and burnout: A two sample confirmatory factor analytic approach. *Journal of Happiness Studies: An Interdisciplinary Forum on Subjective Well-Being*, 3(1), 71-92.
- Schaufeli, W., & Bakker, A. (2004). UTRECHT WORK ENGAGEMENT SCALE Preliminary Manual, Version 1.1. *Utrecht University*.
- Shah, T. A., & Shah, S. Z. (2016). Combined Effects of Psychological Capital and Psychological Contract on Employees' Job Level Outcomes . *European Journal of Business and Management*, 8(26), 5-19.
- Snyder, C. R. (1994). Hope and optimism. *Encyclopedia of human behavior*, 2, 535-542.
- Snyder, C. R., Irving, L. M., & Anderson, J. R. (1991). Hope and Health. Em: C. R. Snyder & D. R. Forsyth (Eds.), *Handbook of social and clinical psychology*.
- Stoykova, P. S. (2013). *Developing Psychological Capital: Test of a Training Intervention with Bulgarian Students and Professionals*. ISCTE Business School.
- Teixeira, A. P., Soares, A. E., & Lopes, M. P. (2015). Impacto do Capital Psicológico Positivo no Desempenho de uma Equipa Comercial. *Revista Psique*, 9-33.
- Wright, T. A. (2003). Positive organizational behavior: an idea whose time has truly come. *Journal of Organizational Behavior*, 24(4), 437-442. <https://doi.org/10.1002/job.197>.
- Yunes, M. A. (2003). Psicologia positiva e resiliência: O foco no indivíduo e na família. *Psicologia em Estudo*, 8, 75-84.

