



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**PLATAFORMA DIDÁTICA PARA ESTUDO
DE PERFIL DE AEROFÓLIO DE GEOMETRIA
VARIÁVEL ACIONADO POR LIGAS DE
MEMÓRIA DE FORMA**

Elaine Maria Coim

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

Brasília
2024

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**PLATAFORMA DIDÁTICA PARA ESTUDO
DE PERFIL DE AEROFÓLIO DE GEOMETRIA
VARIÁVEL ACIONADO POR LIGAS DE
MEMÓRIA DE FORMA**

Elaine Maria Coim

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do grau de Mestra em Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio César Pinho Brasil Júnior

Brasília
2024

C679p Coim, Elaine Maria.
Plataforma didática para estudo de perfil de aerofólio de geometria variável acionado por ligas de memória de forma / Elaine Maria Coim; orientador Antônio César Pinho Brasil Júnior. -- Brasília, 2024.
89 p.

Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas -- Universidade de Brasília , 2024.

1. Bancada Didática. 2. Arduino (Gerenciamento). 3. Geometria Variável. 4. Perfil de Aerofólio. I. Antônio César Pinho Brasil Júnior, orient. II. Título

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**PLATAFORMA DIDÁTICA PARA ESTUDO
DE PERFIL DE AEROFÓLIO DE GEOMETRIA VARIÁVEL
ACIONADO POR LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA**

Elaine Maria Coim

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do grau de Mestra em Ciências Mecânicas.

Trabalho aprovado. Brasília, 28 de fevereiro de 2024:

**Prof. Dr. Antônio César Pinho Brasil
Júnior, UnB/FT**
Orientador

Prof. Dr. Reginaldo Nunes da Silva,
UEMA
Examinador Externo

Prof. Dr. Rafael Castilho Faria Mendes,
UnB/Gama
Examinador Externo ao Programa

Prof. Dr. Taygoara Felamingo de Oliveira,
UnB/FT
Examinador Interno

Brasília
2024

Este trabalho é dedicado à minha família, que fez mais do que me apoiar, assumiu comigo o compromisso de desenvolver uma ideia e realizar um sonho.

Agradecimentos

Agradeço ao Pai Celestial pelo caminho percorrido e por todas as inspirações recebidas que iluminaram meu entendimento.

Agradeço ao Prof. Dr. Antônio Brasil pela compreensão e apoio, decisivos para a defesa e aprovação desse trabalho.

Ao meu irmão, William, pelas muitas horas de conversas, na minha busca por respostas, e por não permitir que eu desistisse.

Às minhas irmãs Elk e Marissol pela colaboração na solução dos problemas.

E a todos os não citados que torceram e acreditaram em mim.

Resumo

Atualmente, pode-se observar uma preocupação crescente com o meio ambiente e, conseqüentemente, também cresce as discussões sobre como as fontes alternativas de energia podem ser melhor aproveitadas. Diante de uma nova tendência, pesquisas de desenvolvimento de difusores com estrutura deformável descrevem resultados satisfatórios. Dentre os materiais inteligentes estudados para o acionamento dessas estruturas destacam-se as ligas de memória de forma. Neste contexto, um protótipo de perfil de aerofólio modelo NACA 0015 bipartido foi confeccionado, de modo a permitir que o bordo de fuga realize um movimento rotacional de até 20° em relação ao bordo de ataque. Para tanto, dois fios de liga de memória de forma Nitinol são estrategicamente posicionados e acionados alternadamente. Para estudar a variação de geometria do perfil de aerofólio e a funcionalidade das ligas de memória de forma nesse processo, o presente trabalho é uma proposta de plataforma didática-experimental de baixo custo. A BRAVUS pode ser definida por um conjunto de elementos mecânicos e eletroeletrônicos que integra um sistema de aquisição de dados para documentar e analisar o movimento do bordo de fuga do perfil de aerofólio e a eficiência dos atuadores nitinol quando ativados por uma tensão elétrica com potência média aplicada de 75% e 50%. Para validar os resultados práticos obtidos, um diagrama de blocos com interface de comunicação Arduino foi criado no ambiente Simulink capaz de reproduzir os mesmos movimentos rotacionais do bordo de fuga em um modelo de perfil de aerofólio virtual. Após a comparação dos resultados reais e virtuais, foi atestada a funcionalidade e viabilidade da plataforma BRAVUS em projetos de ensino-aprendizagem, quando a intenção é analisar e controlar a variação de geometria de um perfil de aerofólio acionado por ligas de memória de forma.

Palavras-chave: Bancada Didática. Arduino (Gerenciamento). Geometria Variável. Perfil de Aerofólio.

Abstract

Currently, one can observe a growing concern with the environment and, consequently, also grows discussions about how alternative energy sources can be better used. Faced with a new trend, research on the development of diffusers with deformable structure describes satisfactory results. Among the intelligent materials studied for the drive of these structures, the shape memory alloys stand out. In this context, a prototype airfoil profile model NACA 0015 bipartite was made to allow the trailing edge to perform a rotational motion of up to 20° in relation to the leading edge. For this purpose, two wires of Nitinol shape memory alloy are strategically positioned and activated alternately. In order to study the geometry variation of the airfoil profile and the functionality of the memory alloys in this process, this work is a proposal of a low-cost didactic-experimental platform. BRAVUS can be defined by a set of mechanical and electronic elements that integrates a data acquisition system to document and analyze the runaway edge movement of the airfoil profile and the efficiency of nitinol actuators when activated by a voltage with average applied power of 75% and 50%. To validate the practical results obtained, an Arduino communication interface block diagram was created in the Simulink environment capable of reproducing the same rotational movements of the trailing edge in a virtual airfoil profile model. After the comparison of the real and virtual results, the functionality and viability of the BRAVUS platform was attested in teaching-learning projects, when the intention is to analyze and control the geometry variation of an airfoil profile triggered by shape memory alloys.

Keywords: Teaching Bench. Arduino (Management). Variable Geometry. Airfoil Profile.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Protótipo da turbina horizontal hidrocínética 3 ^o geração.	17
Figura 2 – Protótipo de uma turbina horizontal eólica.	18
Figura 3 – (a) Difusor com geometria para fluxos de pequena velocidade. (b) Difusor com geometria para fluxos de grande velocidade.	19
Figura 4 – Modelo de perfil de aerofólio bipartido proposto	20
Figura 5 – (a) Estrutura CCC para uma liga NiTi. (b) Martensita não-maclada. (c) Martensita maclada.	27
Figura 6 – Diagrama de mudança de fase da liga devido a temperatura. Onde, ϵ é a deformação mecânica, T é a temperatura e σ é a tensão mecânica.	27
Figura 7 – Diagrama de tensão-deformação-temperatura exibindo o EMF de uma liga NiTi.	29
Figura 8 – Diagrama do efeito pseudoelástico.	29
Figura 9 – Efeito do controle de superfícies em aerofólios.	32
Figura 10 – Perfil de aerofólio NACA 0015.	33
Figura 11 – Bancada didática (PANDINI et al., 2017).	34
Figura 12 – Bancada didática (REGUERA et al., 2015).	34
Figura 13 – Bancada didática (FOTOVOLTAICA; SILVA, s.d.).	35
Figura 14 – Bancada didática (AMORIM, 2006).	35
Figura 15 – Bancada didática (IZIDORO, 2015).	36
Figura 16 – (a) Plataforma BRAVUS, vista em perspectiva. (b) Plataforma BRAVUS, vista superior.	37
Figura 17 – Plataforma experimental - BRAVUS adaptada para transporte como plataforma didática.	39
Figura 18 – Base da planta de experimento - BRAVUS.	39
Figura 19 – Protótipo de perfil aerodinâmico de geometria variável.	40
Figura 20 – Processo de lubrificação utilizado.	41
Figura 21 – Liga de memória de forma para a realização do experimento.	41
Figura 22 – Posição de fixação e deformação dos fios de LMFs como atuadores do protótipo.	42
Figura 23 – Placa Arduino [®] UNO.	43
Figura 24 – Curva característica de saída de um MOSFET.	45
Figura 25 – Módulo mosfet IRF520N com sistema de ventilação. Em segundo plano, placa <i>Arduino</i> [®]	46
Figura 26 – Módulo mosfet IRF520N com dissipador de calor.	46
Figura 27 – Módulo de relés duplo e fotoacopladores.	47

Figura 28 – Modulação por largura de pulsos com ciclos de trabalho definidos em 25%, 50% e 75%.	48
Figura 29 – Módulo de sensor de temperatura infravermelho posicionado acima das ligas de memória de forma.	49
Figura 30 – Potenciômetro linear posicionado no eixo da articulação mecânica entre as duas seções do protótipo.	50
Figura 31 – Para melhor interação com o usuário, displays de lcd para informar a geometria desejada e a geometria medida do protótipo	50
Figura 32 – Esquemático do circuito eletrônico montado na plataforma - BRAVUS, criado no software <i>Proteus</i> [®]	51
Figura 33 – Configuração da placa de hardware e da linguagem de programação . .	52
Figura 34 – <i>Streamer</i> de Dados Excel.	52
Figura 35 – Diagrama de blocos do sistema físico.	54
Figura 36 – Diagrama de blocos do sistema modelado	54
Figura 37 – Curva de histerese na LMF.	55
Figura 38 – Modelo tridimensional da seção 1 do protótipo.	58
Figura 39 – Modelo tridimensional da seção 2 do protótipo.	59
Figura 40 – Modelo do perfil aerodinâmico criado no Simscape Multibody [™]	59
Figura 41 – Modelo do perfil aerodinâmico representado graficamente na simulação computacional.	60
Figura 42 – Testes sendo realizados na plataforma didática-experimental - BRAVUS.	62
Figura 43 – (a) Variação da temperatura das LMF e (b) Variação da geometria do perfil de aerofólio mediante um sinal PWM de 100% equivalente a 5 Volts. . .	63
Figura 44 – (a) Variação da temperatura das LMF e (b) Variação da geometria do perfil de aerofólio mediante um sinal PWM de 75% equivalente a 3,75 Volts. .	64
Figura 45 – (a) Variação da temperatura das LMF e (b) Variação da geometria do perfil de aerofólio mediante um sinal PWM de 50% equivalente a 2,5 Volts. . .	65
Figura 46 – (a) Variação da temperatura das LMF e (b) Variação da geometria do perfil aerodinâmico sob condições de temperatura ambiente mais crítica e <i>setpoint</i> máximo reduzido.	67
Figura 47 – Modelo híbrido em malha aberta utilizando plataforma didática-experimental - BRAVUS e <i>Simulink</i> [™]	68
Figura 48 – Diagrama do modelo de mudança de fase criado no <i>Simulink</i> [®]	69
Figura 49 – Diagrama do modelo mecânico criado no <i>Simulink</i> [®]	69
Figura 50 – Diagrama de blocos do sinal de saída criado no <i>Simulink</i> [®]	70
Figura 51 – Diagrama de blocos do filtro passa baixa criado no <i>Simulink</i> [®]	71
Figura 52 – Valores de temperatura importados ao modelo.	71
Figura 53 – Gráfico da representação de transformação de fase gerado pelo modelo.	72

Figura 54 – Gráfico da representação de deformação mecânica dos fios de memória de forma gerado pelo modelo.	72
Figura 55 – (a) Deslocamento angular do perfil de aerofólio computacional. (b) Perfil de aerofólio físico. Ambos sujeitos a sinal de tensão PWM de 50%.	73
Figura 56 – (a) Deslocamento angular do perfil de aerofólio computacional. (b) Perfil de aerofólio físico. Ambos sujeitos a sinal de tensão PWM de 75%.	74
Figura 57 – Perfil de aerofólio de geometria variável em simulação, utilizando <i>Simulink Multibody</i> TM	74

Lista de tabelas

Tabela 1 – Palavras-chave para pesquisa na base de dados	23
Tabela 2 – Caracterização da liga de Ni-Ti.	42
Tabela 3 – Parâmetros do modelo mosfet IRF520N. Fonte: ALLDATASHEET.com.	44
Tabela 4 – Temperaturas de transição do fio de LMF utilizado no projeto. Fonte: Catálogo NEXTEL.	55

Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Acrinitrilo-Butadieno-Estireno	32
CAD	Computer Aided Design	57
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	23
CCC	Cúbico de Corpo Centrado	26
CFD	Computational Fluid Dynamics	18
EMF	Efeito de Memória de Forma	19
HAT	Horizontal Axis Turbine	17
IDE	Integrated Development Environment	22
LCD	Liquid Crystal Display	49
LEA	Laboratório de Energia e Ambiente	77
LMF	Liga de Memória de Forma	19
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	44
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics	18
NOL	Naval Ordnance Laboratory	25
PE	Pseudo elasticidade	25
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol	40
PID	Proporcional Integral e Derivativo	19
PWM	Pulse Width Modulation	43
SE	Superelasticidade	56
TBJ	transistor Bipolar de Junção	44

Lista de símbolos

μ_n	Mobilidade de elétrons cm^2/V_s	45
A_f	Temperatura final de transformação austenítica [$^{\circ}C$]	27
A_s	Temperatura inicial de transformação austenítica [$^{\circ}C$].....	27
A_t	Área transversal do fio de liga de memória de forma [mm^2].....	56
C_{ox}	Capacitância por unidade de área [F/m^2]	45
E_a	Módulo de elasticidade da fase austenítica [Pa].....	56
E_m	Módulo de elasticidade da fase martensítica [Pa].....	56
E_{LMF}	Elasticidade da liga de memória de forma [Pa]	56
F_{LMF}	Força do fio de liga de memória de forma [N]	56
M_f	Temperatura final de transformação martensítica [$^{\circ}C$].....	27
M_s	Temperatura inicial de transformação martensítica [$^{\circ}C$].....	27
V_t	Tensão de threshold [V].....	44
V_{ds}	Tensão entre os terminais Drain e Source [V]	44
V_{gs}	Tensão entre os terminais Gate e Source [V]	44
V_{ov}	Tensão de overdrive [V]	44
h	Coefficiente de convecção [$W/m^2^{\circ}C$]	30
K	Ganho do transistor [A].....	45
L	Comprimento do canal [m]	45
mA	Unidade de medida que equivale a um milésimo de ampère [A].....	43
T	Temperatura [$^{\circ}C$].....	27
W	Largura do canal [m]	45
W	Trabalho mecânico [N/m]	56
α	Ângulo de ataque [$^{\circ}$].....	31
ΔH	Calor latente [J/kg]	30
ϵ	Deformação mecânica [N/m].....	27
σ	Tensão mecânica [Pa].....	27
σ^{CRIT}	Tensão crítica [Pa]	29

σ_f	Tensão final [Pa]	28
σ_{LMF}	Tensão da liga de memória de forma [Pa]	57
τ_{mec}	Contante de tempo mecânica [s]	56
ξ	Fração volumétrica da fase martensítica [V]	30
C_p	Coefficiente de potência	18
C_{Lmax}	Coefficiente de sustentação máximo	31
W/L	Parâmetro de projeto	45

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização e Motivação	17
1.2	Objetivo Geral	21
1.2.1	Objetivos Específicos	21
1.3	Metodologia	22
1.4	Estrutura da Dissertação	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - CONCEITOS FUNDAMENTAIS	25
2.1	Ligas de Memória de Forma	25
2.1.1	Transformação de Fase em Ligas de Memória de Forma	26
2.1.2	Efeito de Memória de Forma e Pseudoelasticidade	28
2.1.3	Modelagem de Atuadores com LMF	30
2.2	Aerofólio de Geometria Variável	31
2.3	Bancadas Didáticas	33
3	PLATAFORMA DIDÁTICA - BRAVUS	37
3.1	Estrutura	37
3.2	O Projeto Mecânico	38
3.2.1	Base da Plataforma	38
3.2.2	Protótipo do Perfil Aerodinâmico de Geometria Variável	39
3.2.3	Atuadores de LMF	40
3.3	O Projeto Eletroeletrônico	42
3.3.1	O Arduino	42
3.3.2	O Sistema de Acionamento	43
3.3.3	Os Sinais de Controle	47
3.4	Sistema de Integração e Aquisição de Dados	50
4	MODELAGEM DO SISTEMA	53
4.1	Modelagem Matemática	53
4.2	O Modelo de Mudança de Fase	55
4.3	Modelo do Sistema Mecânico	56
4.4	Modelo do Perfil de Aerofólio	57
4.4.1	Visão Geral do Simscape Multibody™	57
4.4.2	As Etapas da Construção do Modelo	58

5	SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA DIDÁTICA - BRAVUS	61
5.1	Experimento em Malha Aberta	61
5.1.1	Avaliação da Dinâmica das Variáveis	61
5.2	Validação dos Resultados - Simulação do Modelo Híbrido	66
5.3	Comparação dos Resultados	70
6	DISCUSSÕES E CONCLUSÃO	75
6.0.1	A Bancada Experimental BRAVUS	75
6.0.2	Experimentos Sugeridos	76
6.0.3	Aerofólio de Geometria Variável	77
6.0.4	Trabalhos Publicados	78
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXOS	85
	ANEXO A – ANEXOS	86
A.1	Código de Programação no Ambiente IDE do Arduino	86

1 Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

O contexto adotado para a elaboração do tema de estudo na bancada experimental teve como foco as abordagens de engenharia e sustentabilidade aplicadas à avaliação de sistemas de energia renovável desenvolvidas no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA), unidade acadêmica da Universidade de Brasília. Os estudos revelam que uma turbina envolta por difusor pode ter uma capacidade aumentada de captar e converter a energia cinética do fluido de trabalho em energia mecânica, conseqüente, gerar mais energia elétrica. Os estudos mais recentes atribuem a essa capacidade as características físicas do aerofólio.

O conceito de Turbina de Eixo Horizontal - HAT ¹ na captura e produção de energia sustentável é o foco de pesquisas nas últimas décadas. Uma HAT consiste em um conjunto de lâminas acopladas a um eixo de rotação paralelo ao solo que se movimenta em sentido rotacional quando se opõem perpendicularmente a favor ou contra ao fluxo do fluido de trabalho. Utilizada como tecnologia modelo na captação de energia cinética da água, representada na figura 1, ou do vento, representada na figura 2, duas ou três lâminas operam em elevadas taxas de velocidade (JOHARI; JALIL; SHARIFF, 2018).

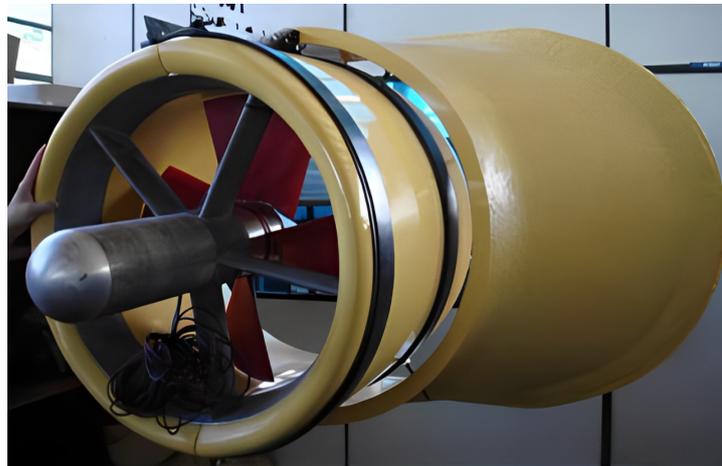


Figura 1 – Protótipo da turbina horizontal hidrocínica 3^o geração.
Fonte: (JUNIOR et al., 2005) e (XIMENES, 2018).

Por muitos anos os principais experimentos em turbinas de eixo horizontal estavam concentrados nas características geométricas do dispositivo como sendo a única maneira viável de aumentar sua potência. No entanto, nas últimas décadas, pesquisas mostraram que uma turbina de eixo horizontal envolta por difusor tem apresentado melhores resultados. Primeiramente proposto por (LILLEY; RAINBIRD, 1956), estudos experimentais foram

¹ do inglês, *Horizontal Axis Turbine*



Figura 2 – Protótipo de uma turbina horizontal eólica.
Fonte: (JUNIOR et al., 2005) e (XIMENES, 2018).

conduzidos por (OMAN; FOREMAN; GILBERT, 1975), (IGRA, 1981), (FOREMAN; GILBERT; OMAN, 1978), (PHILLIPS; RICHARDS; FLAY, 2002). Os experimentos comprovaram que uma turbina de eixo horizontal envolta por difusor pode extrair muito mais energia de um fluido em movimento que uma turbina convencional com as mesmas dimensões. Outros estudos experimentais, analíticos e numéricos foram desenvolvidos para comprovar a eficiência do método.

Novos estudos, como o desenvolvido por (BAGHERI-SADEGHI; HELENBROOK; VISSER, 2018), utilizando uma ferramenta CFD ², demonstrou como as características geométricas de um difusor pode interferir na geração de energia. (NUNES et al., 2019), através de estudo experimental em túnel de vento, observaram um significativo aumento no coeficiente de potência para dois difusores modelos Lens CII e S1223. (OHYA; KARASUDANI, 2010) conduziram um teste experimental em quatro diferentes configurações de curvatura do difusor, uma delas projetada e testada em uma fazenda eólica real, alcançou um coeficiente de potência (C_p) igual a 0,54 - significando dizer que se recuperou o máximo de 54% da energia disponível no vento. (NASUTION; PURWANTO, 2011) usaram ferramentas computacionais para comparar os resultados entre difusores de perfis cônicos e curvos de seção transversal similar ao do aerofólio NACA 5807 (NACA - National Advisory Committee for Aeronautics). A velocidade do fluido no interior do difusor com parede curva pode ser otimizada em 65,5% em comparação ao difusor cônico simples.

Diante de uma nova tendência, muitos pesquisadores têm investido esforços para o desenvolvimento de difusores com estrutura deformável para melhoria da eficiência aerodinâmica ou hidrodinâmica. Essa área de pesquisa e desenvolvimento possibilita que o projeto possa maximizar a potência da turbina mesmo em diferentes condições de operação. (QUACKENBUSH; CARPENTER; GOWING, 2005) apresentaram um conceito de difusor inteligente para veículos submarinos, um propulsor envolta por difusor de geometria variável

² do inglês, *Computational Fluid Dynamics*

atuado por ligas de memória de forma (LMF). (MUSZYŃSKI; STRZELCZYK, 2013) descreveram resultados preliminares satisfatórios de uma pesquisa experimental em difusores de geometria variável em turbina, ver figura 3. (HU; WANG, W.-X., 2015) analisaram numericamente um flange autoadaptativa inteligente capaz de reduzir gradualmente a ação das cargas do vento em um difusor. Ainda mais recente, (SIAVASH et al., 2020) experimentaram um difusor de duto controlável para gerenciar a potência da turbina também em diferentes condições de operação.

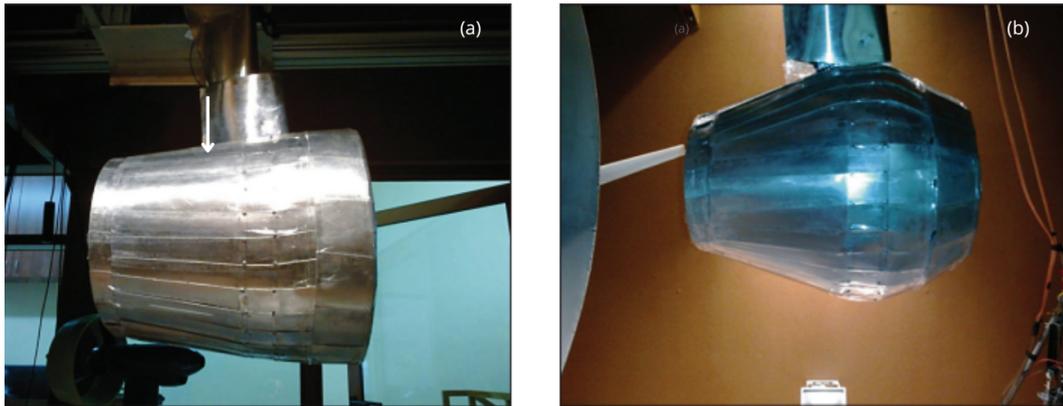


Figura 3 – (a) Difusor com geometria para fluxos de pequena velocidade. (b) Difusor com geometria para fluxos de grande velocidade.

Fonte: (MUSZYŃSKI; STRZELCZYK, 2013)

Os atuadores baseados em materiais inteligentes também oferecem uma alternativa inovadora aos sistemas de acionamento convencionais e significativas vantagens por serem compactos, possibilitar atuação distribuída, desempenhar simultaneamente função estrutura e possuírem alta densidade energética ou altas taxas de resposta, conforme o caso (DE PAULA SALES; RADE, 2014). Dentre os materiais inteligentes estudados para acionamento de estruturas de geometria variável destacam-se as LMF, por possuírem propriedades únicas comparadas a outros tipos de ligas metálicas. As LMF quando sofrem uma aparente deformação permanente, sua estrutura empreende a função de recuperar a forma original quando submetida à temperatura mais elevada. Esse fenômeno é conhecido como efeito de memória de forma (EMF) e ocorre devido uma mudança na estrutura cristalina entre as fases austenítica e martensítica.

Há uma série de estudos apresentados sobre a reconfiguração de um perfil aerodinâmico usando atuadores de LMF. Dentre eles, (BARBARINO et al., 2009) que utilizaram a tecnologia para reduzir o arrasto transônico sobre um perfil aerodinâmico após reconhecer as primeiras ondas de choque; (GRIGORIE et al., 2012) descreveram o projeto de um sistema de controle híbrido, uma lógica fuzzy PID mais um controlador convencional *on-off*, para um mecanismo de asa atuado por materiais inteligentes; e ainda (BIL; MASSEY; ABDULLAH, 2013) e (ABREU et al., 2015) que realizaram um experimento para investigar os efeitos de um controlador PID em um perfil aerodinâmico seccionado e atuado por LMF.

Dentre estes, (FARIA, 2010) apresentou um modelo de aerofólio adaptativo, baseado no modelo NACA 0012, utilizando fios atuadores de LMF para realizar uma rotação relativa entre duas seções, o que possibilitaria a variação da linha de arqueamento do aerofólio, conforme ilustra a figura 4. Ao aquecer a liga de memória de forma superior o aerofólio desenvolve um movimento de rotação no sentido anti-horário tracionando a liga inferior. O movimento no sentido horário é alcançado ao resfriar a liga superior e aquecer a liga inferior.

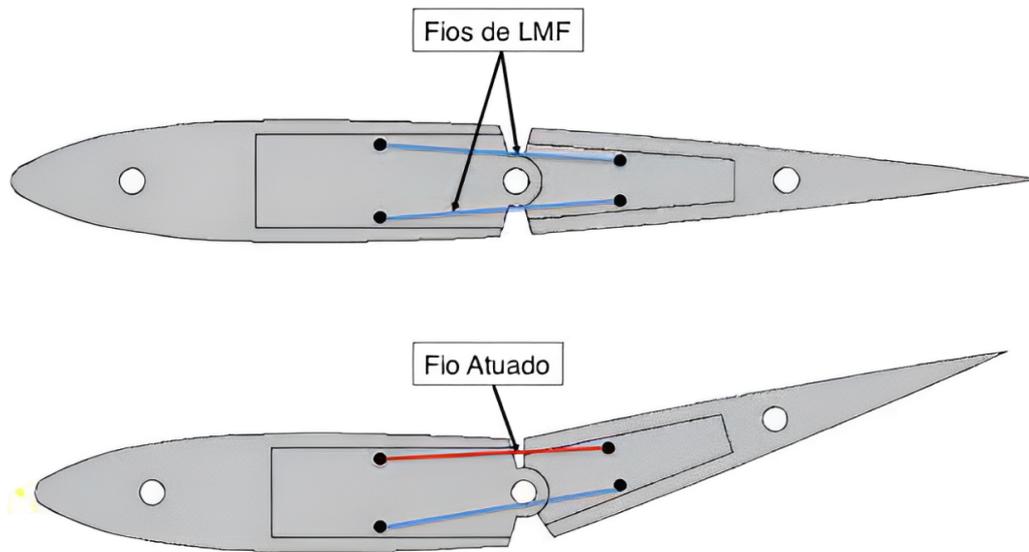


Figura 4 – Modelo de perfil de aerofólio bipartido proposto
Fonte: (FARIA, 2010)

Baseado nesta pesquisa, (MAESTA, 2012) utilizou o protótipo construído por (FARIA, 2010), com o objetivo de verificar o desempenho de um sistema de controle angular baseado na *Lógica Fuzzy* e na *Lógica Booleana* (controlador *liga/desliga*). O controlador nebuloso apresentou simplicidade de construção e facilidade de implementação experimental. Além disso, também mostrou-se eficiente para o problema em questão e apresentou características de desempenho satisfatórias em comparação como o sistema de controle *liga/desliga*.

Neste contexto, o presente trabalho de dissertação tem como propósitos: projetar, fabricar e testar um protótipo de perfil de aerofólio bipartido, acionado por dois fios de liga de memória de forma para realizar um movimento rotacional do bordo de fuga de até 20° em relação ao bordo de ataque; examinar a eficiência dos atuadores Nitinol quando ativados por sinal de tensão alternado PWM; construir e avaliar o desempenho de uma plataforma experimental de baixo custo, equipada com dispositivos mecânicos, eletroeletrônicos e de integração e aquisição de dados em projetos de ensino-aprendizagem. O experimento inclui a criação de um circuito eletroeletrônico acionado por uma placa *Arduino*[®] e uma fonte de bancada ajustável exclusiva para o funcionamento e automatização do processo. Dessa forma, disponibilizar um instrumento de estudo que possa ser utilizado por alunos do ensino médio para abordagens práticas de conteúdo das disciplinas de eletrônica, sistemas de controle,

materiais inteligentes e estruturas de geometria variável.

As bancadas experimentais são dispositivos usados didaticamente para avaliar conceitos e validar modelos teóricos. O uso de bancadas experimentais simulando a operação de sistemas reais é também um método amplamente conhecido e extensivamente usado para o desenvolvimento de projetos em geral. A engenharia sempre necessitou testar conceitos e aplicações em escala reduzida nas mais diversas áreas. Uma vez que sistemas de aquisição de dados e microprocessadores podem ser usados, a importância da implementação de bancadas de teste cresceu significativamente, tornando-se um apoio essencial para atividades de projeto, ensino e pesquisa.

Como parte do desenvolvimento da plataforma didática-experimental, é proposto a utilização do software *Matlab*TM (do desenvolvedor *MathWorks*[®]) para o processo de integração de dados. A técnica promove a reunião de dados de diferentes origens para uma visualização unificada e mais prática, o que contribui para tomadas de decisão melhoradas e mais rápidas. Além disso, a plataforma propõe a utilização do *Simulink*TM para a criação do diagrama de blocos da planta com interface de comunicação Arduino, pois a técnica favorece a visualização e a aquisição dos dados gerados enquanto o modelo é executado.

A motivação por trás desse trabalho está na necessidade de concentrar esforços na melhoria do processo de ensino e aprendizagem nas escolas que, na maioria das vezes, não possuem laboratórios estruturados para o desenvolvimento de uma pesquisa. Nesse sentido, qualquer técnica ou método que possam ser utilizados para ensinar um determinado conteúdo deve ser bem desenvolvido e implementado. A plataforma didática-experimental — BRAVUS pode demonstrar a viabilidade do projeto ao utilizar componentes de baixo custo e de fácil acesso no mercado e pode também servir de exemplo de metodologia de ensino inovador que estimula o protagonismo dos alunos. Além do que, projetar, fabricar e testar um protótipo de perfil aerodinâmico de geometria variável acionado por liga de memória de forma, permite tomar conhecimento do objetivo e soluções necessárias para avaliar a necessidade do desenvolvimento de um difusor adaptativo para turbinas de eixo horizontal na geração de energia elétrica.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver uma bancada experimental de baixo custo, didaticamente utilizada para avaliar e controlar a variação de geometria de um perfil de aerofólio NACA 0015 quando acionado por LMF ativadas por tensão elétrica controlada por sinal PWM.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Projetar e confeccionar o protótipo do perfil aerodinâmico, modelo NACA 0015;

- Definir a configuração e adquirir a liga de memória de forma;
- Definir e adquirir os componentes mecânicos e eletroeletrônicos;
- Gerenciar as tarefas por meio de uma plataforma *Arduino*[®]UNO;
- Confeccionar a base de apoio para os componentes e protótipo do perfil de aerofólio;
- Testar a posição e o comprimento dos atuadores de fio LMF;
- Testar dois sinais PWM diferentes utilizando um MOSFET;
- Escrever o código de programação no ambiente IDE - Ambiente de Desenvolvimento Integrado - do Arduino;
- Modelar o perfil de aerofólio no ambiente Simulink/Simscape Multibody;
- Modelar o diagrama de blocos com suporte Simulink para Arduino;
- Coletar e analisar os dados;
- Validar o sistema.
- Avaliar o desempenho dos fios atuadores de LMF na alteração da linha de arqueamento de perfis aerodinâmicos.

1.3 Metodologia

Inicialmente, uma revisão bibliográfica foi realizada para identificar as iniciativas e experimentos publicados sobre difusores de geometria variável na captação de energia sustentável. Para conhecer os estudos de maior relevância, as bases de dados *Scopus* e *Web of Science* foram consultadas. Para alcançar o maior número possível de experimentos publicados, uma questão de investigação foi formulada para conter o objeto foco, a intervenção aplicada e o tipo de resultado esperado. Assim, o tema "difusores de geometria variável para turbinas, utilizando materiais inteligentes" foi obtido para tornar a investigação tão objetiva quanto possível. Definido o tema de investigação, as palavras de maior significado lógico, e seus sinônimos, foram combinadas. A Tabela 1 resume as palavras-chave utilizadas, associadas aos operadores de pesquisa avançada Booleana.

Para a seleção dos artigos, os seguintes critérios foram utilizados. Os artigos que não cumpriram os critérios estabelecidos, foram descartados.

- Artigos originais e artigos revisados;
- Publicados em inglês e português;

Tabela 1 – Palavras-chave para pesquisa na base de dados

Palavras-chave combinadas	Artigos
TITLE-ABS-KEY ((variable* OR adaptive* OR controllable* OR smart* OR responsive* OR fold* OR piezoelectric*) AND (geometry* OR structure* OR shape* OR surface* OR materials* OR line*) AND (diffuser* OR duct* OR shroud* OR concentrator*) AND (wind OR tidal OR marine OR current OR hydro) AND turbine* AND NOT "gas turbine"OR "francis turbine"OR "darrieus turbine"OR pump* OR solar* OR tandem*)	55 Scopus 32 WoS

- Estudos experimentais ou de observação em dutos de geometria variável adequados para turbinas de eixo horizontal;

Realizada a leitura dos artigos, pouco foi observado sobre a aplicação da técnica de geometria variável na superfície de difusores para turbinas de eixo horizontal na captação e geração de energia sustentável. Dentre os trabalhos de maior relevância, nenhum deles utilizou LMF como atuadores para mudar a estrutura do difusor, o que deixou evidente o baixo aproveitamento da tecnologia no dispositivo na área de energia sustentável. Assim sendo, uma nova pesquisa, utilizando o Catálogo de Teses e Dissertações (CAPES), foi realizada com o objetivo de identificar as pesquisas sobre o tema. Os trabalhos selecionados auxiliaram no desenvolvimento deste projeto e serão discutidos nos próximos capítulos.

A ideia-chave foi entender o quanto a deformação geométrica pode contribuir no resultado aerodinâmico do dispositivo. O aumento do coeficiente de potência da turbina esteve entre as principais conclusões, suficiente para comprovar a eficácia do método. No entanto, para todas as pesquisas, esse resultado foi obtido à custa da utilização de *softwares* ou instrumentos muito sofisticados, o que tornou evidente também o pouco espaço para os estudantes e pesquisadores sem muito acesso às técnicas.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em sete (6) capítulos, conforme descrição a seguir. O capítulo atual apresenta a contextualização dos difusores de geometria variável em turbinas de eixo horizontal e como as LMF podem atuar nesse sentido. Apresenta o objetivo geral proposto, bem como os objetivos específicos para o desenvolvimento da pesquisa, e a metodologia utilizada. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e a fundamentação teórica de assuntos pertinentes às LMF, à geometria de difusores para turbinas de eixo horizontal e trabalhos correlatos ao uso de bancadas para práticas educacionais. O capítulo 3 apresenta os projetos mecânicos, eletroeletrônico e o sistema de integração e aquisição de dados que compõem a plataforma didática-experimental - BRAVUS. O capítulo 4 apresenta a modelagem matemática que descreve o comportamento de transformação de fase das LMF

e sua deformação mecânica. O modelo computacional do perfil de aerofólio de geometria variável também é apresentado. O capítulo 5 apresenta as variáveis de controle do processo, bem como os resultados da simulação da planta física (plataforma didática-experimental - BRAVUS) e os resultados da simulação da planta híbrida, validando o modelo. No capítulo 6 são apresentados os resultados do trabalho de pesquisa e considerações finais.

2 Revisão Bibliográfica - Conceitos Fundamentais

2.1 Ligas de Memória de Forma

Um conceito interessante e relativamente novo que recebe a atenção de pesquisadores no mundo inteiro é o conceito de materiais inteligentes.¹ A característica predominante que distingue esse material dos materiais comuns é que eles possuem a capacidade de adaptação ou mudança ativa em seu comportamento, ou propriedades, em resposta a um estímulo externo (GANDHI; THOMPSON, 1992). Esse material deve possuir um número de propriedades funcionais a fim de fazer tal adaptação possível.

Essas propriedades incluem a capacidade de sentir as mudanças do ambiente, a capacidade para executar reações específicas em resposta aos estímulos detectados e a capacidade de controlar tais reações. Podem ser descritos como materiais capazes de converter uma forma de energia recebida em uma resposta de outra natureza por meio de alterações de propriedades materiais (JANOCHA et al., 1999), (LEO, 2007), (CASTILHO, 2017). Sua reversibilidade de uma deformação, gerada por um carregamento mecânico, está associada com a habilidade do material submeter-se à transformação martensítica, quando um reordenamento atômico acontece (OTSUKA; WAYMAN, 1999). Esses efeitos funcionais são conhecidos por Pseudo elasticidade (*PE*) e Efeito de Memória de Forma (*EMF*). Materiais com essa propriedade podem ser empregados como sensores, processadores ou atuadores e, frequentemente, utilizados para o desenvolvimento de estruturas adaptativas.

Desde 1932, o fenômeno do EMF foi observado e tem sido estudado por alguns cientistas, dentre eles, (ÖLANDER, 1932) e (GRENINGER; MOORADIAN, 1938). Mas foi em 1949 que o fenômeno foi associado ao comportamento termoelástico da martensita, divulgado por (KURDJUMOV; KHANDROS, 1949) e (CHANG; READ, 1951), que observaram a reversibilidade da transformação de uma liga de ouro-cádmio (*Au-Cd*), utilizando técnicas metalográficas e medições de resistividade. A liga deformava até um limite determinado e, ao ser aquecida, retornava à sua forma original.

Em 1962, (BUEHLER; WANG, F. E., 1968) e seus colaboradores no "Naval Ordnance Laboratory" (*NOL*), situado em White Oak, Maryland - USA, descobriram o efeito de memória de forma também em uma liga de níquel-titânio (*Ni-Ti*). Após vários testes, notaram que as ligas Ni-Ti apresentavam grande resistência ao impacto, aliada a boas propriedades mecânicas, como elasticidade, maleabilidade e fadiga, então a nomearam "Nitinol", incluindo o acrônimo do laboratório à composição da liga (FARIA, 2010). Desde então, as ligas de Nitinol

¹ do inglês, Smart Materials

tornaram-se as mais atraentes devido à boa capacidade de recuperar deformações (efeito de memória de forma), pseudo elasticidade, resistência à corrosão e biocompatibilidade (ELAHINIA, 2016).

Na literatura, são encontrados diversos artigos propondo soluções para alterar a forma e avaliar os efeitos aerodinâmicos de superfícies adaptativas utilizando as LMF. (KO; BAE; RHO, 2014) desenvolveram e testaram um aerofólio adaptativo acionado por molas de LMF, testaram o protótipo em túnel de vento e estudaram suas características aerodinâmicas utilizando o *software Xfoil*. (KIM; CHO, 2010) propuseram um modelo de asa inteligente utilizando LMF com perfil aerodinâmico NACA 0012. (MACHAIRAS et al., 2018) apresentou um modelo de aerofólio com estrutura adaptativa acionada por LMF incluindo um modelo constitutivo de LMF bem estabelecido para a previsão do comportamento do atuador utilizando um *software* de elementos finitos.

2.1.1 Transformação de Fase em Ligas de Memória de Forma

No estado sólido, as transformações de fase podem ser difusionais ou adifusionais. Ao considerar que as transformações de fase em ligas de memória de forma são adifusionais, não se fará referência ao estado difusional. Nas transformações adifusionais o movimento aleatório dos átomos não ocorre a longas distâncias, pois não há mudança de composição química na nova fase. As transformações martensíticas são exemplos de transformações adifusionais (DUERIG; MELTON; STÖCKEL, 2013).

O estudo das mudanças de fase de uma liga metálica é muito importante para se alcançar o entendimento pleno do comportamento do material, pois transformações de fase resultam em alterações na microestrutura, as quais, por sua vez, definem suas propriedades mecânicas (SANTOS, 2019). Em uma dada faixa de temperatura, as ligas com memória de forma apresentam duas fases com estruturas cristalinas e propriedades diferentes. Em alta temperatura e baixa tensão mecânica, tem-se a fase austenítica e, em baixa temperatura e alta tensão mecânica, tem-se a fase martensítica. Na ausência de tensão mecânica, a austenita apresenta uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) bem definida com uma única variante, enquanto a martensita apresenta uma estrutura monoclinica, conforme ilustra a figura 5.

Quando uma liga que se encontra na fase austenítica e em estado livre de tensão até uma temperatura abaixo de uma temperatura crítica, sua estrutura cristalina sofre uma transformação para martensita maclada. Essa transformação é chamada de transformação direta. Quando o material é aquecido a partir da fase martensítica, a estrutura cristalina retorna para a fase austenítica, e esta transformação recebe o nome de transformação reversa. Para melhor definir os aspectos termomecânicos das transformações martensíticas, (OTSUKA; WAYMAN, 1999) definiram os pontos de transformações como sendo: M_s e M_f para temperatura inicial e final da formação de fase martensítica durante o resfriamento, e A_s e

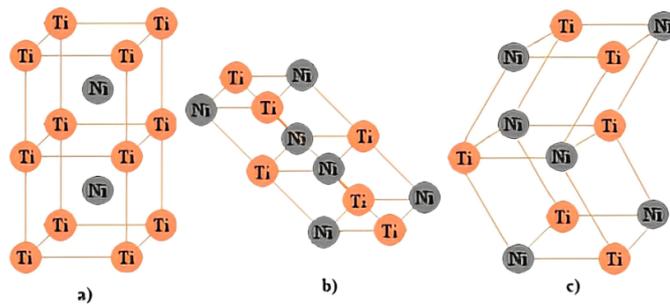


Figura 5 – (a) Estrutura CCC para uma liga NiTi. (b) Martensita não-maclada. (c) Martensita maclada.

Fonte: Adaptado de (FARIA, 2010).

A_f para temperatura inicial e final da formação de fase austenítica durante o aquecimento. Essas temperaturas obedecem à seguinte relação: $M_f < M_s < A_s < A_f$ e estão representadas no diagrama da figura 6.

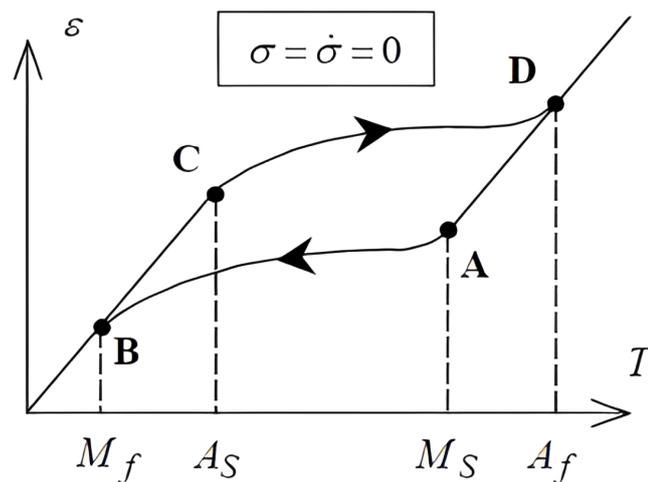


Figura 6 – Diagrama de mudança de fase da liga devido a temperatura. Onde, ϵ é a deformação mecânica, T é a temperatura e σ é a tensão mecânica.

Fonte: (MAESTÁ et al., 2016).

Considere uma amostra de material de LMF livre de tensões mecânicas e uma temperatura inicial abaixo da temperatura final de transformação em martensita (*ponto B*), temperatura em que o material apresenta microestrutura martensítica. A temperatura é elevada até atingir uma temperatura de início da transformação em austenita, no (*ponto C*). Partindo desta temperatura, o material sofre uma transformação não-linear de martensita para austenita (*trecho CD*), até atingir a temperatura final de transformação em austenita, no (*ponto D*), temperatura onde a austenita é estável. Diminuindo a temperatura até o início da transformação em martensita, no (*ponto A*), inicia-se uma transformação inversa (*trecho AB*), até atingir a temperatura final da transformação inversa no (*ponto B*), (MAESTÁ et al., 2016).

Experimentalmente, as transformações de fase podem ser caracterizadas por alguns métodos, dentre eles, o Método da Resistividade Elétrica ² e o Método da Calorimetria Exploratória Diferencial ³. Esta pesquisa não contemplou o desenvolvimento de nenhum dos métodos para caracterização da liga Nitinol em estudo, mas teve acesso aos parâmetros de caracterização disponíveis no manual do fabricante e trabalhos correlatos.

2.1.2 Efeito de Memória de Forma e Pseudoelasticidade

O Efeito de Memória de Forma (*EMF*) é o termo utilizado para descrever a capacidade das ligas de memória de forma de voltarem ao seu formato original (forma ou tamanho) quando submetidas a um processo de memorização entre duas fases de transformação, a depender da temperatura ou campo magnético.

Como explicado na seção anterior, de fato, existem duas possíveis fases microconstituintes associadas à LMF: a austenita (estável a alta temperatura) e a martensita (estável a baixa temperatura). Considere uma amostra de LMF com temperatura inferior a (M_f) e livre de tensões, condição na qual o material apresenta uma microestrutura martensítica maclada. Esta amostra é então submetida a um carregamento mecânico e desenvolve uma deformação elástica até atingir uma tensão final (σ_f), dando início a um rearranjo de seus planos cristalinos e assumindo uma transformação de martensita maclada para não-maclada. Durante a transformação, um pequeno aumento na tensão gera uma grande deformação, até atingir o ponto (*C*) onde o material volta a apresentar um regime elástico. Ao descarregar a amostra, não ocorre uma transformação de fase no material devido à variante da martensita ser estável a essa temperatura, mas apenas uma pequena recuperação linear resultando em uma deformação residual. Para recuperar a deformação residual máxima, é necessário aquecer a amostra a uma temperatura acima de (A_f) e, em seguida, resfriá-la a uma temperatura abaixo de (M_f), ver figura 7.

Esse efeito pode ser representado em duas categorias de memória de forma, a saber:

- *Memória de Forma Unidirecional* - quando o material é aparentemente deformado a baixa temperatura pela imposição de um carregamento mecânico e, quando descarregado e submetido a alta temperatura, retorna ao seu formato inicial.
- *Memória de Forma Bidirecional* - trata-se de uma mudança de forma sem carregamento mecânico, apenas submetendo o material a uma mudança de temperatura. Este fenômeno só é possível ser alcançado quando o material é submetido a um tratamento termomecânico.

² do inglês, Electrical Resistivity Method

³ do inglês, Differential Scanning Calorimetry

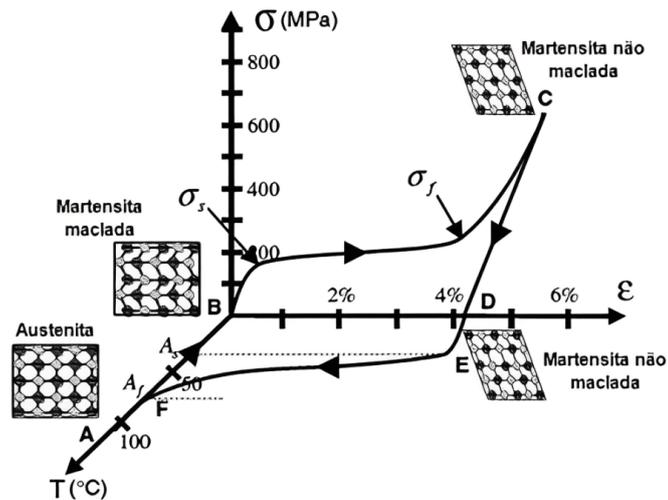


Figura 7 – Diagrama de tensão-deformação-temperatura exibindo o EMF de uma liga NiTi.
Fonte: (BARROSO, 2019).

Uma das manifestações macroscópicas mais úteis de materiais que possuem memória de forma é conhecida como *pseudo elasticidade*. O fenômeno é caracterizado pela transformação de fase induzida por carregamento mecânico e pela reversibilidade com o descarregamento. Considere um material à temperatura constante superior a (A_f), onde a austenita é estável. O material então é submetido a um carregamento mecânico, apresentando um comportamento elástico até atingir uma tensão crítica (σ^{CRIT}), no ponto (A') da figura 8. Neste ponto, inicia-se a transformação de fase austenítica para martensítica induzida por tensão (trecho $A'B'$). Ao descarregar o material, ele passa por uma recuperação linear (trecho $B'C'$) e, em seguida, sofre uma transformação não linear inversa de martensita induzida por tensão para austenita (trecho $C'D'$), (MAESTÁ et al., 2016). O que é possível devido à martensita ser instável para temperaturas superiores a (A_f).

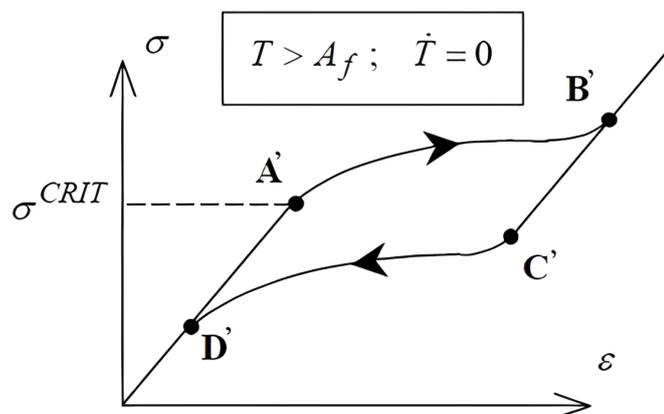


Figura 8 – Diagrama do efeito pseudoelástico.
Fonte: (MAESTÁ et al., 2016).

2.1.3 Modelagem de Atuadores com LMF

Existe uma quantidade bastante expressiva de modelos matemáticos propostos para descrever a transformação entre austenita e martensita. Esses modelos são desenvolvidos com o propósito de simular a resposta macro mecânica das ligas de memória de forma a auxiliar o processo de criação de estruturas envolvendo esses materiais. (MAESTÁ et al., 2016) relaciona alguns dos principais modelos, como o de (TANAKA, 1986), (BOYD; LAGOUDAS, 1994) e (IKUTA; TSUKAMOTO; HIROSE, 1991) que utilizam funções exponenciais para descrever a transformação de fase, e o modelo de (LIANG; ROGERS, 1991) que utilizam funções cossenoidais. Em suas formulações, consideram, além da deformação (ϵ) e da temperatura (T), uma variável interna escalar (ξ) que representa a fração volumétrica da fase martensítica.

Na formulação matemática para descrever o comportamento das LMF, este trabalho foi fundamentado no modelo inovador, apresentado por (JAYENDER et al., 2008), para o comportamento das LMF baseado no processo físico envolvido e não em dados experimentais, o que propicia a linearização do processo nos casos de aplicação de controle. O modelo consiste em três submodelos com equações dinâmicas que descrevem a variação da fração molar com temperatura utilizando estatísticas de Fermi-Dirac (submodelo da mudança de fase); temperatura dinâmica baseada no efeito *Joule* e resfriamento convectivo natural (submodelo térmico); e uma equação constitutiva relacionando tensão e deformação na LMF para mudanças na temperatura e na fração martensítica (ξ) da LMF (submodelo mecânico).

Análises específicas de cada um dos submodelos podem ser encontradas em alguns trabalhos. (XIAO GUANG et al., 2017), (PAI; RIEPOLD; TRACHTLER, 2016) e (VELÁZQUEZ; PISSALOUX, 2012) aprofundaram no estudo do submodelo da mudança de fase histerética na LMF em função da fração martensítica (ξ) e da temperatura (T). Com relação ao submodelo térmico, existem alguns trabalhos que detalham melhor a dependência da temperatura no cálculo de algumas características do fio, como o coeficiente de convecção (h) por (BARBOSA; CERQUEIRA; LIMA, 2016), e o calor latente (Δ)H em (VELÁZQUEZ; PISSALOUX, 2012). Por fim, o submodelo mecânico da LMF é detalhado em (ABDELAAL; NAGIB, 2014), (DHANALAKSHMI et al., 2016) e (NASCIMENTO et al., 2009) que apresentaram a deformação do fio (ϵ) em função de (T) e (ξ).

O grande desafio em se modelar matematicamente as características termomecânicas associadas às ligas de memória de forma está no fato de que as ligas equiatômicas de NiTi possuem comportamento de histerese, altamente não-linear, quando induzido por temperatura ou tensão mecânica. Nesse sentido, nenhum modelo consegue satisfazer tais condições sem considerar uma prévia caracterização mecânica por meio de experimentos. Sendo assim, pode-se concluir que a modelagem do comportamento termomecânico de uma liga de memória de forma é totalmente dependente do resultado que se pretende atingir, (SANTOS, 2019).

De acordo com (KHANDELWAL; BURAVALLA, 2009) os propósitos particulares de cada modelo podem ser divididos em três tipos:

1. Entender a física e os mecanismos que causam os efeitos observados durante o experimento, com o propósito de buscar uma explicação para o fenômeno intrínseco;
2. Identificar as propriedades do material ou os parâmetros do processo que podem produzir os efeitos desejados para o desenvolvimento de novos materiais.
3. Prever a resposta do material associado a um mecanismo inteligente ou um sistema sob investigação, para desenvolver novas aplicações tecnológicas.

Assim sendo, para o desenvolvimento deste trabalho, a modelagem matemática mais conveniente corresponde ao item 3 que utiliza modelos macroscópicos e fenomenológicos..

2.2 Aerofólio de Geometria Variável

A variação da geometria ao longo do bordo de fuga de um aerofólio é um conceito largamente utilizado na aviação para gerar benefício na decolagem e aproximação para pouso, referindo-se aos *flaps*, *Slats* e *Spoilers*, no inglês. Conforme, (RODRIGUES, 2014), os *flaps* são dispositivos hiper-sustentadores que consistem em superfícies articuladas existentes no bordo de fuga das asas de um avião. Quando estendidos, aumentam a curvatura do perfil aerodinâmico da asa, promovendo maiores valores de sustentação ($C_{L_{max}}$) durante os procedimentos de pouso e decolagem. O efeito provocado pela aplicação dos *flaps* pode ser visualizado na figura 9. É possível notar um considerável aumento no valor do ($C_{L_{max}}$) sem que ocorra nenhuma mudança no coeficiente angular da curva (C_L) versus (α). No entanto, como a aplicação dos *flaps* proporciona um aumento no arqueamento do perfil, o ângulo de ataque deve ser reduzido para se obter uma sustentação nula e também um menor ângulo de estol.

Neste contexto, vários métodos construtivos vêm sendo estudados. Dentre os trabalhos mais recentes, (SANTOS, 2019) fez uma avaliação experimental de um protótipo de aerofólio adaptativo capaz de realizar variações de arqueamento utilizando, como atuadores, molas de torção constituídas de material de memória de forma. Com base em um perfil NACA 0020 dividido em quatro segmentos articulados entre si por rótulas e molas torcionais de Ni-Ti. Definidas as possíveis configurações geométricas do perfil que puderam ser obtidas por ativações individuais e combinadas das molas torcionais, para cada uma das configurações foram realizadas simulações numéricas utilizando o programa *XFOIL*. A principal conclusão dos ensaios numéricos e experimentais realizados, é que o uso de molas torcionais Ni-Ti como atuadores é uma alternativa viável para uso em asas de geometria variável.

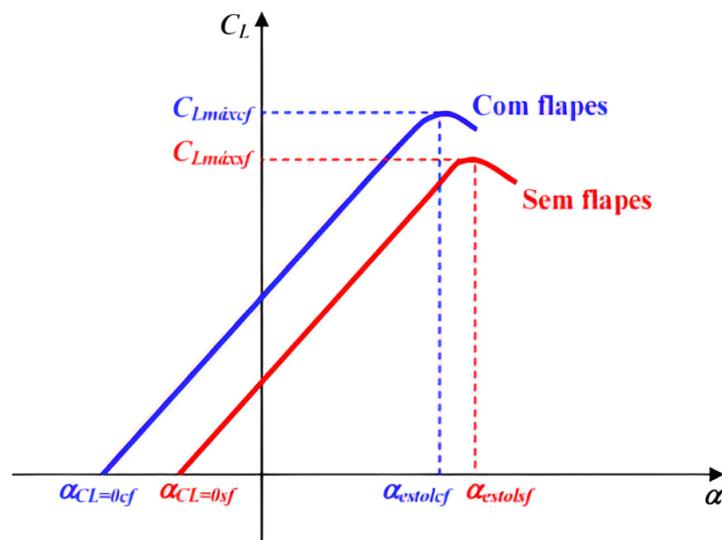


Figura 9 – Efeito do controle de superfícies em aerofólios.
Fonte: (RODRIGUES, 2014).

Um projeto semelhante foi desenvolvido por (EMILIAVACA, 2016). No protótipo desenvolvido, de estrutura mecânica construída em polímero ABS por impressão 3D e um sistema de recobrimento feito em chapa fina de acetato, foram avaliadas as deflexões máximas e as forças de sustentação e de arrasto. Usando a ferramenta computacional ANSYS CFD e um túnel de vento, foram feitas análises teóricas e práticas do comportamento aerodinâmico do protótipo na condição mais crítica de deflexão e de velocidade. O mecanismo articulado para reconfiguração de forma apresentou excelentes resultados.

Pode-se citar também (KO; BAE; RHO, 2014) que desenvolveram e testaram um aerofólio adaptativo acionado por molas de LMF em túnel de vento e compararam os resultados aerodinâmicos utilizando um *software*. E (HUTAPEA et al., 2008) que desenvolveram um sistema de *flaps* utilizando molas de LMF.

Na literatura, são encontrados diversos artigos propondo algumas soluções interessantes para alterar a forma e avaliar os efeitos aerodinâmicos de aerofólios adaptativos utilizando material inteligente. Dentre esses estudos, pode-se citar (FARIA, 2010) que apresentou um modelo adaptativo, utilizando fios atuadores de ligas de memória de forma, com base em um perfil NACA 0012. Modelagem matemática e aerodinâmica foram desenvolvidas para descrever o comportamento do sistema. Um controlador do tipo *fuzzy* foi projetado para controlar a forma do perfil quando submetido a ciclos de atuação. Nos ensaios experimentais, durante a simulação do controle e da linha de arqueamento. De início, o sistema apresentou uma aproximação bastante lenta do valor alvo definido ⁴. Porém nos instantes seguintes alcançou a vizinhança do ponto definido e permaneceu nessa vizinhança em função das regras do controlador. Para avaliar a repetibilidade dos dados, o processo de atuação do par de fios de LMF foi refeito quatro vezes para se verificar a capacidade do sistema de ser atuado

⁴ do inglês, *set point*

diversas vezes.

Dentre outros autores, (MAESTÁ et al., 2016) desenvolveram um perfil de aerofólio aplicando um controlador baseado em lógica nebulosa para controlar o ângulo de uma das seções do aerofólio. Além disso, demonstrou que os controladores do tipo Liga-Desliga suavizado são eficientes para o mesmo fim, embora o experimento em túnel de vento tenha mostrado valores muito rígidos para aplicações práticas.

Para o presente trabalho, o protótipo desenvolvido tem como base um aerofólio com perfil NACA 0015, ver a curva do perfil na figura 10, medindo 400 mm de corda e 60 mm de espessura. A escolha foi feita para maximizar os efeitos da reconfiguração de forma, uma vez que outros perfis já possuem uma curvatura pré-definida. É um aerofólio da série de 4 dígitos da NACA, os dois primeiros dígitos, representam arqueamento nulo, tornando-o simétrico, e os dois dígitos finais indicam espessura máxima no valor de 15% do total da corda.

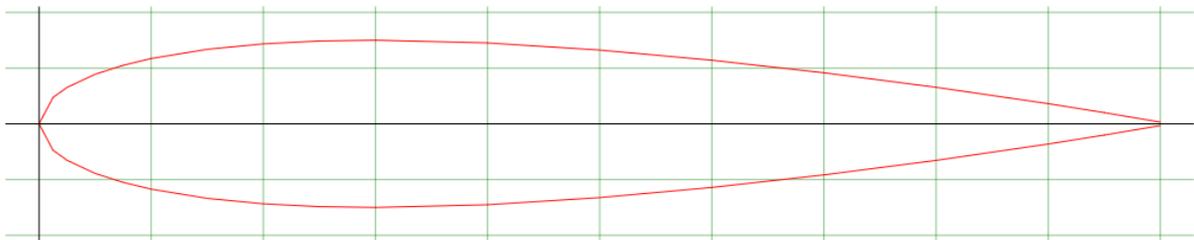


Figura 10 – Perfil de aerofólio NACA 0015.

Fonte: Airfoil Tools.

2.3 Bancadas Didáticas

As bancadas didáticas constituem ferramentas de ensino eficazes para a formação completa de alunos de diversos níveis. O uso desse meio multissensorial de aprendizagem como complemento à teoria repassada em sala de aula oferece ao aluno a oportunidade de buscar sua autonomia na construção do seu próprio conhecimento.

Para avaliar o impacto na aprendizagem dos estudantes, nos cursos de tecnologia, o trabalho de (COELHO et al., 2016) apresenta um modelo de bancada didática móvel de baixo custo que está relacionada às atividades da disciplina de eletrônica. O modelo proposto tem como principal característica a mobilidade, permitindo ao professor realizar experimentos durante as aulas, eliminando a necessidade do deslocamento dos alunos até os laboratórios.

O trabalho de (PANDINI et al., 2017) descreve o projeto e a construção de uma bancada didática para sistema de automação industrial, ver figura 11, destacando sua importância para a formação acadêmica. O trabalho também abrange o custo de fabricação da bancada e a composição dos circuitos de proteção, assegurando a integridade física do equipamento e do usuário. Reaproveitando e atualizando uma bancada antiga destinada

a experimentos relacionados a sistemas de controle industriais, (REGUERA et al., 2015) apresentaram um projeto de baixo custo a fim de ampliar o número e o tipo de experimentos possíveis na bancada, ver figura 12.



Figura 11 – Bancada didática (PANDINI et al., 2017).
Fonte: (PANDINI et al., 2017).

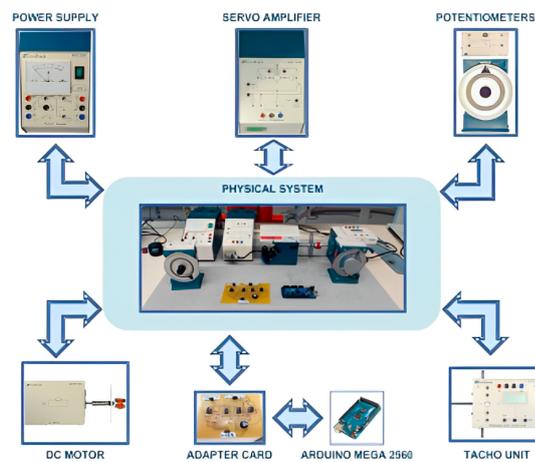


Figura 12 – Bancada didática (REGUERA et al., 2015).
Fonte: (REGUERA et al., 2015).

(FOTOVOLTAICA; SILVA, s.d.) dimensionou, projetou e montou uma maleta didática para estudos de geração de energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos, tanto conectados na rede de energia elétrica (*OnGrid*), como também fora dela (*OffGrid*), ver figura 13. A bancada experimental desenvolvida por (AMORIM, 2006) foi exclusivamente para o atendimento às disciplinas na área de controle de sistema mecânico. Trata-se de uma estrutura mecânica flexível que permite a simulação experimental de vários sistemas. O objeto de estudo foi o controle de um edifício de um andar. A estrutura permite aplicar um deslocamento na base do edifício e, controlando uma massa posicionada em seu topo, minimizar a vibração resultante, ver figura 14.

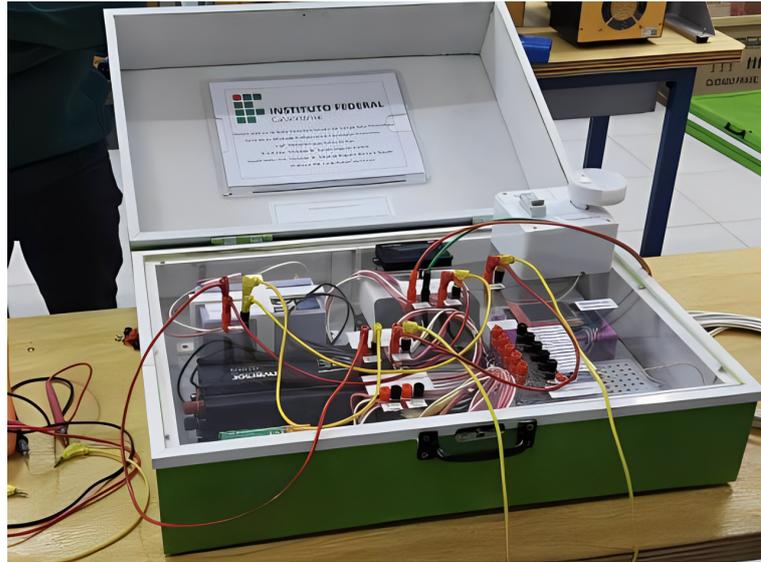


Figura 13 – Bancada didática (FOTOVOLTAICA; SILVA, s.d.).
Fonte: (FOTOVOLTAICA; SILVA, s.d.).

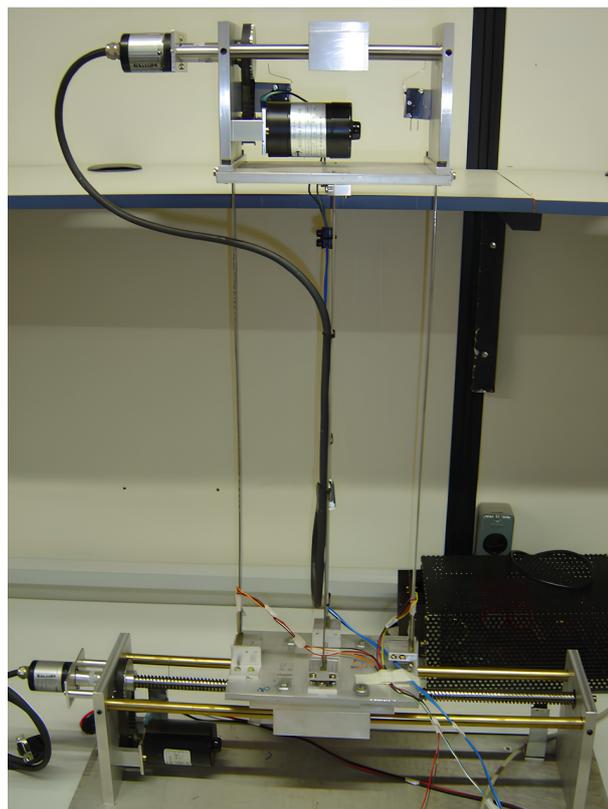


Figura 14 – Bancada didática (AMORIM, 2006).
Fonte: (AMORIM, 2006).

(CAVALCANTE, 2017) desenvolveu um trabalho que teve como objetivo o projeto, a fabricação, a montagem e o teste de uma bancada didática para simulações de problemas em máquinas rotativas com aplicações em cursos e disciplinas acadêmicas. Medições de vibração e potência consumida, nas condições de máquina alinhada/desalinhada e balanceada/desbalanceada, foram coletadas. Os resultados encontrados durante as análises são condizentes

com as literaturas referenciadas. Para obtenção de curvas de desempenho de módulos termoeletricos no que se refere a geração de energia pelo Efeito Seebeck e resfriamento através do Efeito Peltier, (IZIDORO, 2015) propôs um sistema que permite ler simultaneamente até 3 geradores termoeletricos, composto por dois circuitos eletrônicos. Os dados medidos são adquiridos para um computador com *software* customizado que permite o monitoramento das grandezas envolvidas (tensão, corrente, potência e temperatura). O projeto obteve êxito em sua utilização em sala de aula como ferramenta de ensino e contribuiu cientificamente demonstrando a eficiência dos módulos termoeletricos em vários gradientes de temperatura, sendo possível a comparação de dados fornecidos pelos fabricantes com os dados reais, dessa forma, cooperando a especificação dos módulos conforme a aplicação, ver figura 15.

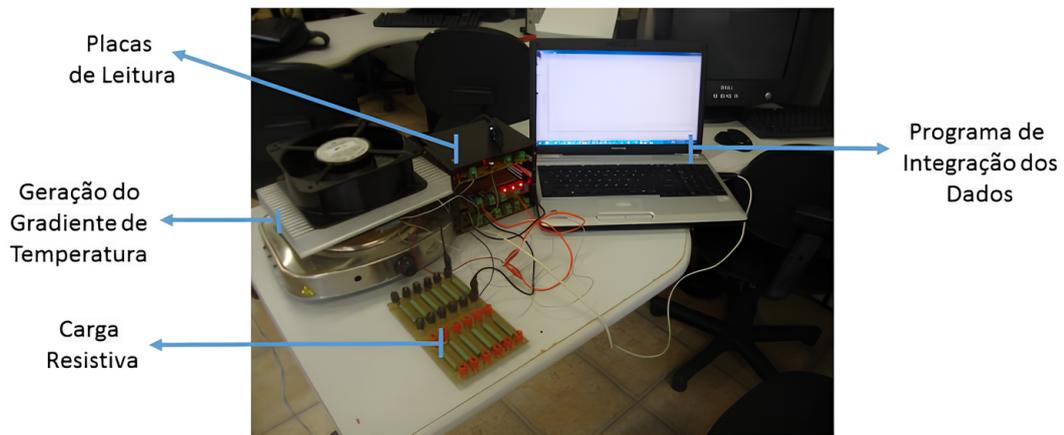


Figura 15 – Bancada didática (IZIDORO, 2015).
Fonte: (IZIDORO, 2015)

3 Plataforma Didática - BRAVUS

3.1 Estrutura

Para este trabalho, construiu-se uma plataforma didática-experimental, intitulada *BRAVUS*, confeccionada para ativar os atuadores de LMF do protótipo de perfil aerodinâmico de geometria variável de modo a permitir que o usuário estude seus movimentos e encontre possibilidades de controlar a geometria do perfil de aerofólio. Dentre suas características de projeto destaca-se a boa disposição dos componentes, sistema de ventilação para dissipação de calor do MOSFET, ajuste de *set points* por acionamento manual ou automatizado via código IDE, uma fonte de alimentação exclusiva e uma placa *Arduino*®*UNO*. A estrutura atual da plataforma experimental é apresentada na figura 16. A plataforma experimental é composta por elementos mecânicos, elementos eletroeletrônicos e elementos de integração e aquisição de dados.

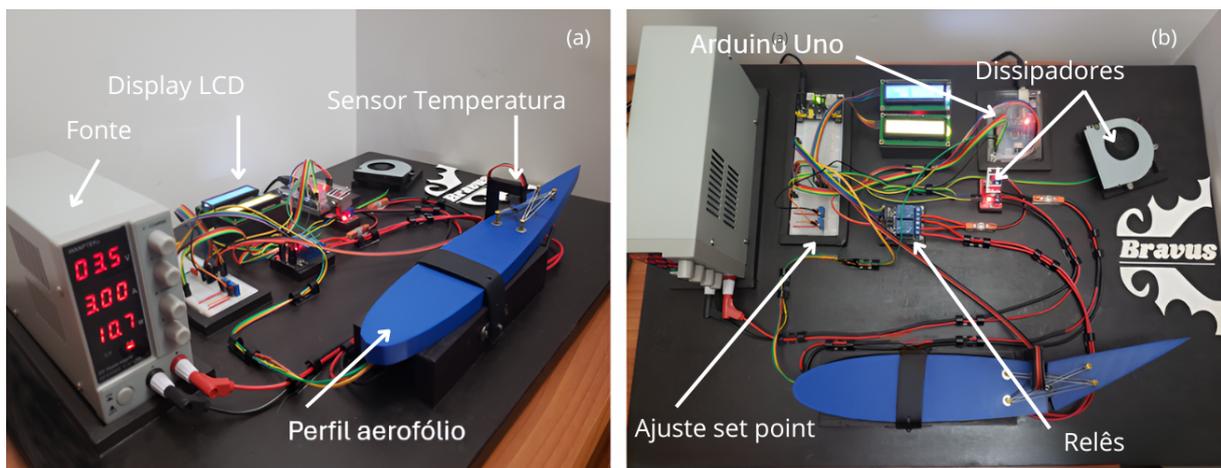


Figura 16 – (a) Plataforma BRAVUS, vista em perspectiva. (b) Plataforma BRAVUS, vista superior.
Fonte: A autora.

- Elementos Mecânicos
 - Base retangular de madeira com suporte de fixação dos componentes.
 - Caixa para transporte.
 - Fios de LMF fixados na superfície superior do protótipo de perfil aerodinâmico de geometria variável por meio de quatro parafusos do tipo gaiola.
 - Protótipo de perfil aerodinâmico de geometria variável.

- Elementos Eletroeletrônicos

- Uma plataforma *Arduino*®UNO.
- Uma *protoboard* de 830 pinos.
- Módulo de fonte ajustável para *protoboard* 3.3V e 5V para Arduino.
- Módulo de relés 2 canais 5 Volts.
- Módulo MOSFET IRF520N com dissipador de calor.
- Dois *diplays* lcd 1602 16x2 com módulo I2C acoplado.
- Fonte de alimentação de bancada Wanptek 306W 0-30V 0-6A.
- Sensor de temperatura lr mlx 90614.
- *Cooler* Sunon mf60120v1.
- Cabos *jumper* Mxm e Fxf.
- Capacitor 100nF.
- Resistor 1k ohms.
- Potenciômetro linear 10 k.
- Trimpot multivoltas 10 k.
- Conectores e fixadores de cabo elétrico.

- Elementos de Integração e Aquisição de Dados

- *Simulink Support Package for Arduino Hardware* da *MathWorks*®;
- *Streamer* de Dados da *Microsoft*®EXCEL.

3.2 O Projeto Mecânico

3.2.1 Base da Plataforma

Para o objetivo proposto, foi necessário confeccionar uma planta de experimento capaz de promover a variação de geometria do perfil de aerofólio por meio da ativação das ligas de memória de forma acionada por energia elétrica. A partir da definição de um modelo de bancada didática, foi concebida uma plataforma experimental que pudesse ser facilmente transportada. Para tanto, um caixote para o transporte da plataforma foi confeccionado e adaptado para promover fácil manuseio, conforme ilustra a figura 17. Para o desenvolvimento da bancada, uma base de madeira com dimensões de 650 mm

de comprimento, 440 mm de altura e 15 mm de largura, conforme figura 18, possui suportes de apoio para a fonte de alimentação, para a placa *protoboard*, para os dois *displays* de lcd, para a placa de *Arduino*®UNO, para o *cooler* e para os módulos de relés e MOSFET. Em evidência, na parte central inferior da base, o suporte para apoiar o protótipo do perfil aerodinâmico de geometria variável.



Figura 17 – Plataforma experimental - BRAVUS adaptada para transporte como plataforma didática.
Fonte: A autora.

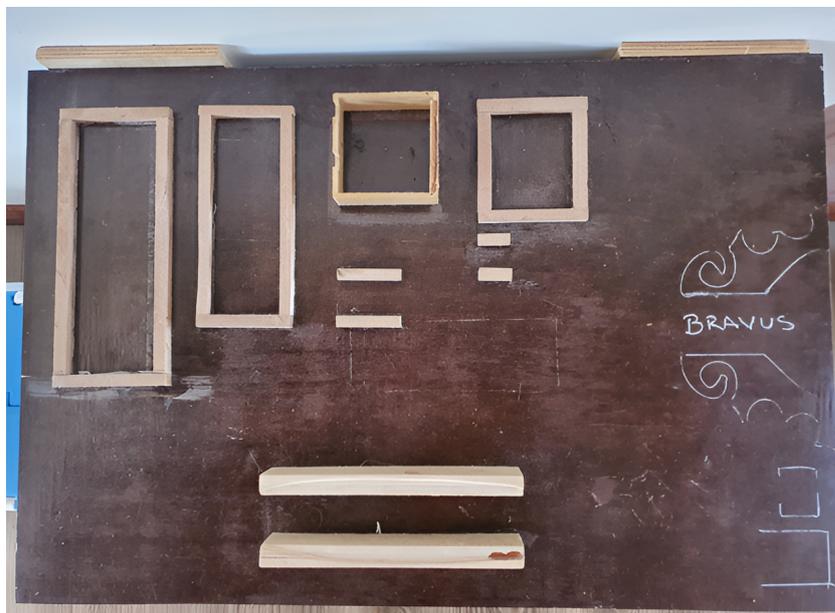


Figura 18 – Base da planta de experimento - BRAVUS.
Fonte: A autora.

3.2.2 Protótipo do Perfil Aerodinâmico de Geometria Variável

O protótipo do perfil de aerofólio de geometria variável modelo NACA 0015, ver figura 19, foi projetado e construído com as seguintes dimensões: 400 mm de corda, 60 mm

de espessura e 15 mm de largura. A definição pelo modelo foi estabelecida pela conveniência de uma linha de arqueamento de 0° , para tornar evidente o arqueamento no momento em que as ligas de memória de forma fossem acionadas. Além disso, a espessura máxima de 15% em relação à corda facilitou a instalação e fixação das LMF na superfície do objeto.

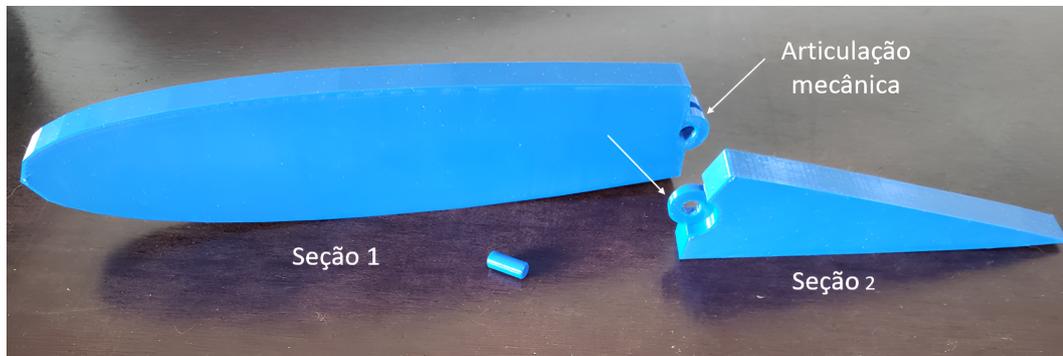


Figura 19 – Protótipo de perfil aerodinâmico de geometria variável.
Fonte: A autora.

O modelo tridimensional do perfil foi projetado utilizando o software da Autodesk®INVENTOR. Para essa etapa, o desafio foi definir a junção mecânica entre as duas seções do perfil de aerofólio que pudesse permitir, além da rotação entre as partes, o encaixe do sensor de posição proposto (potenciômetro linear). A figura 20 ilustra o processo de lubrificação, após método abrasivo, realizado para reduzir o atrito entre as superfícies de contato e garantir movimento livre de rotação da seção 2, o bordo de fuga do aerofólio.

Confeccionado pelo Laboratório Aberto de Brasília, situado no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, utilizando a técnica de fabricação aditiva a partir de um modelo tridimensional projetado pela própria autora. O material utilizado para a confecção do protótipo foi o PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) na cor azul.

3.2.3 Atuadores de LMF

Para o desenvolvimento desse estudo, uma liga binária contendo níquel e titânio foi adquirida por intermédio da empresa NexMetal Corporation, na forma de fio, ver figura 21. Dentre as características mecânicas da liga, podem-se destacar os parâmetros citados na tabela 2, parte fornecido por catálogo do fornecedor e por trabalhos correlatos. Para os atuadores do perfil de aerofólio, o comprimento de cada fio e os pontos de fixação no modelo foram definidos pelo método de tentativa e erro.

onde, d = diâmetro do fio, l = comprimento, S = área de superfície, V = volume, T_a mb = temperatura ambiente, m_{LMF} = massa, ρ = densidade, cp = coeficiente térmico, k = condutividade térmica, R_{LMF} = resistência e eh = coeficiente de convecção.

Dentre os desafios enfrentados na confecção do projeto mecânico, o maior deles foi a seleção dos parafusos para a fixação dos fios de memória de forma. As LMF não poderiam ter



Figura 20 – Processo de lubrificação utilizado.
Fonte: A autora.



Figura 21 – Liga de memória de forma para a realização do experimento.
Fonte: A autora.

contato entre si e nem com a superfície do protótipo, as situações afetariam o comportamento das ligas quando a corrente elétrica fosse acionada. Assim, o elemento de fixação selecionado foi um parafuso tipo gaiola, que melhor deu suporte às ligas, mantendo-as na posição e deformação inicial especificadas experimentalmente. Essa deformação foi necessária porque,

Tabela 2 – Caracterização da liga de Ni-Ti.

Parâmetro	Valor
d	1 mm
l	90 mm
S	$2.84 \cdot 10^{-4} m^2$
V	$0.7 \cdot 10^{-8} m^3$
T_{amb}	a definir
m_{LMF}	$0.45 \cdot 10^{-4} kg$
ρ_{LM4F}	$6.450 kg/m^3$
cp	837 J/kg · K
k	1.800 W/(m · K)
R_{LMF}	29 Ω/m
h	150 W/m ² · °C

no tratamento termomecânico da liga, o fio e linear na memória de forma na fase austenita. A figura 22 ilustra as posições suportadas pelos parafusos, bem como as deformações iniciais das ligas de memória de forma.



Figura 22 – Posição de fixação e deformação dos fios de LMFs como atuadores do protótipo.
Fonte: A autora.

3.3 O Projeto Eletroeletrônico

3.3.1 O Arduino

Para o acionamento das LMF e a mudança de forma do perfil aerodinâmico, a ideia fundamental deste trabalho foi simular uma tensão estática variável por meio de modulação por largura de pulso - PWM.¹ Para tal, uma plataforma *Arduino*® UNO foi utilizada para gerenciar esse processo. O *Arduino*® é uma plataforma *open-source* de prototipagem eletrônica com *hardware* e *software* flexíveis e fáceis de usar. A linguagem de programação utilizada para escrever os códigos é baseada nas tradicionais C/C++ (com modificações) e bibliotecas que encapsulam a maioria da complexidade do microcontrolador. Os códigos para a simulação física do protótipo foram escritos no editor de texto IDE (*Integrated Development*

¹ do inglês, *Pulse Width Modulation*

Environment). Esse código é apresentado no Anexo A, encontrado no final da dissertação. A figura 23 mostra em detalhes o modelo utilizado.

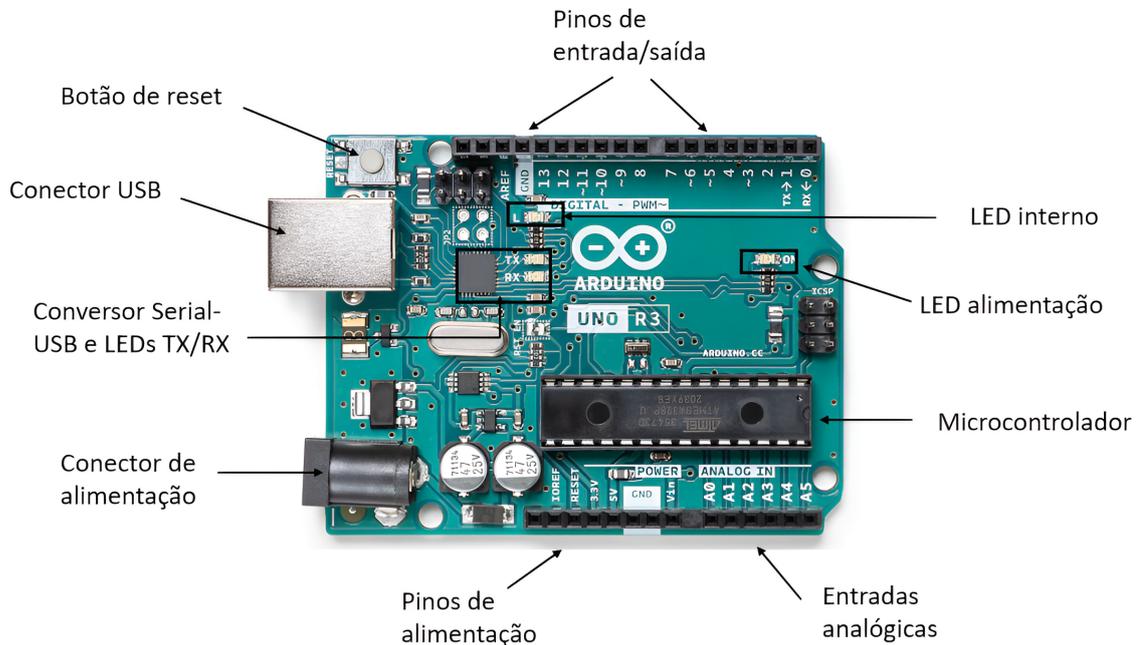


Figura 23 – Placa Arduino®UNO.
Fonte: Adaptado de <https://www.arduino.cc>.

O sinal PWM refere-se ao conceito de pulsar rapidamente um sinal digital em um condutor em forma de onda quadrada. A largura de pulso da onda quadrada pode ser variável e representa o tempo em que o sinal permanece ligado. Para efeito de cálculo, dois parâmetros são necessários, o período e a largura do pulso ou ciclo de trabalho², definida em valor percentual, como mostra a equação 3.1. Maiores detalhes serão apresentados mais adiante.

$$DutyCycle = 100 \times \frac{LarguraPulso}{Período} \quad (3.1)$$

3.3.2 O Sistema de Acionamento

A placa *Arduino*® possui pinos específicos para saídas PWM. Por meio do pino número 9, por exemplo, é possível usar o sinal PWM gerado pelo microcontrolador. No entanto, a tensão máxima de operação em cada pino é de 5 Volts, com corrente máxima de 40 mA. Nesta situação, recomenda-se utilizar um amplificador de tensão e corrente para acionar as LMF do protótipo de perfil aerodinâmico.

O módulo IRF520 - MOSFET³ de canal N foi selecionado por ser muito indicado para as aplicações PWM, ser o preferido nos projetos comerciais-industriais e pela compatibilidade

² do inglês, *Duty-Cycle*

³ do inglês, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transisto*

com a placa *Arduino*[®]. Os parâmetros relevantes para a seleção do componente podem ser representados na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do modelo mosfet IRF520N. Fonte: ALLDATASHEET.com.

Parâmetro	Valor
V_{gs}	10 V
V_t	2.0 V
V_{ds}	100 V
I_d	9.7 A
R_{ds}	0.2 Ω

Diferentemente de um transistor bipolar de junção (TBJ), o acionamento do MOSFET é feito por tensão e não corrente, o que torna o seu acionamento muito mais simples. Esse tipo de transistor tem em sua estrutura três terminais, sendo eles o Dreno⁴ (D), Fonte⁵ (F) e Porta⁶ (P). A tensão na porta é que determina se a corrente irá fluir entre os terminais da fonte e dreno. Assumindo o MOSFET de canal N polarizado com uma tensão V_{gs} de valor superior à sua tensão de *threshold*, é induzido o canal entre a fonte e o dreno do transistor. A diferença entre V_{gs} e V_t , ou seja, o excesso de tensão necessária para induzir o canal, é denominada como tensão de overdrive (V_{ov}).

Ao ser aplicada uma tensão V_{ds} , a tensão entre a porta e os pontos ao longo da extensão do canal deixa de ser constante, sendo o seu valor máximo junto à fonte e o mínimo junto ao dreno. A tensão junto à fonte é simplesmente V_{gs} , mas como existe diferença de potencial entre os extremos do canal, imposta por V_{ds} junto ao dreno, o valor da tensão é dado pela diferença entre essas tensões, como demonstra a equação 3.2.

$$V_{gd} = V_{gs} - V_{ds} = V_t + V_{ov} - V_{ds} \quad (3.2)$$

Continuando a aumentar V_{ds} , o canal vai estreitando cada vez mais junto ao dreno do transistor. Na situação limite, em que o valor da tensão V_{ds} iguala V_{ov} , ou seja, a tensão V_{gd} é igual a V_t , implica que não existe diferença de potencial suficiente entre a porta e o dreno para existir canal. A partir desse ponto, mesmo aumentando o valor de V_{ds} , a espessura do canal não é afetada, continuando a fluir corrente entre a fonte e o dreno. Esta forma de funcionamento do MOSFET pode ser representada na curva característica de saída, conforme figura 24. Na região de Triodo (ou região linear), o transistor é ligado e o canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. O MOSFET opera como um resistor, controlado pela tensão da porta. A corrente do dreno para a fonte é representada pela equação 3.3:

⁴ do inglês, *Drain*

⁵ do inglês, *Source*

⁶ do inglês, *Gate*

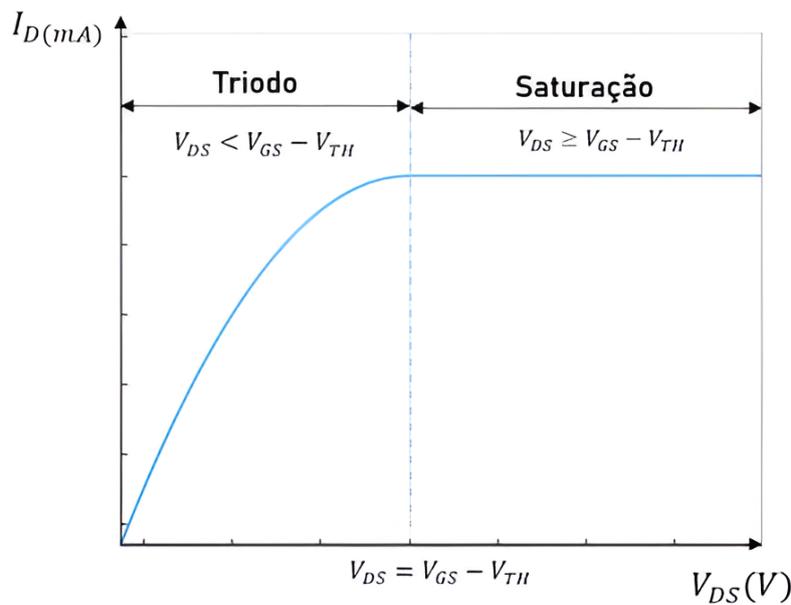


Figura 24 – Curva característica de saída de um MOSFET.
Fonte: (SEDRA, 2007).

$$I_d = K[2(V_{gs} - V_t)V_{ds} - V_{ds}^2] \quad (3.3)$$

onde $K = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$.

Na região de saturação, o transistor fica ligado e um canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Como a tensão de dreno é maior que a tensão na porta, uma parte do canal é desligada. A corrente de dreno é agora independente da tensão de dreno e é controlada somente pela tensão da porta, de tal forma que:

$$I_d = K(V_{gs} - V_t)^2 \quad (3.4)$$

O calor gerado pela passagem da corrente (efeito Joule) sob o efeito da camada de óxido enterrado no substrato (S_iO_2) torna a dissipação de calor no dispositivo mais complexa, pois o ácido enterrado, além de funcionar como um isolante elétrico, também opera como um isolante térmico. Para atenuar o efeito, um dissipador de calor associado a um sistema de ventilação para controle de temperatura foram instalados. A ideia foi prevenir que o componente fosse danificado. As figuras 25 e 26 representam os componentes físicos instalados na plataforma didática-experimental - BRAVUS.

Para melhor compreensão, o acionamento dos fios de LMF acontece no modo alterado. Em outras palavras, posicionados paralelamente, um em relação ao outro, na superfície do perfil de aerofólio, garantindo que cada uma das extremidades do fio estejam fixadas na seção do bordo de ataque e na seção do bordo de fuga, quando uma inclinação com ângulo de 20° é desejada, a corrente fluirá para o fio de LMF inferior enquanto o fio de LMF superior

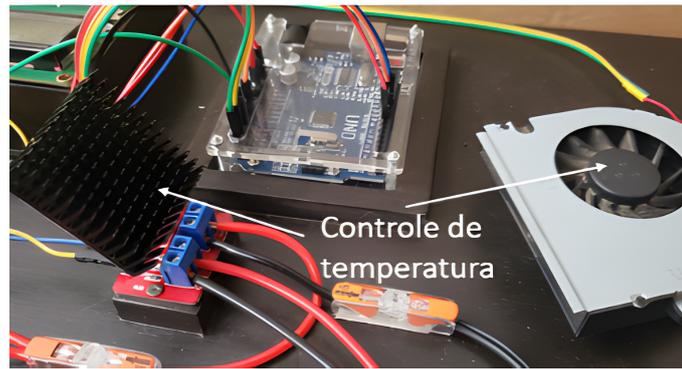


Figura 25 – Módulo mosfet IRF520N com sistema de ventilação. Em segundo plano, placa *Arduino*®.
Fonte: A autora.

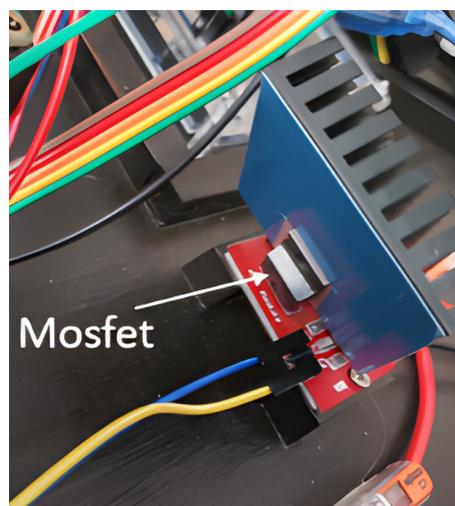


Figura 26 – Módulo mosfet IRF520N com dissipador de calor.
Fonte: A autora.

está desativado e resfriando. Quando um ângulo de 0° é desejado, a corrente fluirá para o fio de LMF superior, enquanto o fio de LMF inferior está desativado e resfriando.

Como parte dos requisitos do projeto, o acionamento das LMF e a variação de geometria do perfil aerodinâmico deve ser simulado na plataforma didática-experimental BRAVUS de modo automático, controlado por um sistema liga/desliga. Esse sistema é composto por um módulo de relés duplo, também selecionado por ser de fácil aquisição e por possuir módulo controlado pela placa *Arduino*®. Um relé é um interruptor eletromecânico com inúmeras aplicações possíveis em comutação de contatos elétricos. Neste trabalho, desempenha sua aplicação básica de permitir o acionamento das LMF no modo alternado, ora interrompendo, ora permitindo a passagem de corrente controlada pelo MOSFET, uma vez que os atuadores de LMF são acionados alternadamente. Uma característica específica deste modelo é que o módulo possui um fotoacoplador para cada relé, que desempenha a função de isolá-los do circuito de alimentação vindo da placa *Arduino*®, o que evita qualquer interferência no seu funcionamento. Programado por um código no IDE do *Arduino*®, o módulo de relés duplo mostrou boa eficiência no controle de acionamento automático. A

figura 27 mostra o componente na plataforma BRAVUS.

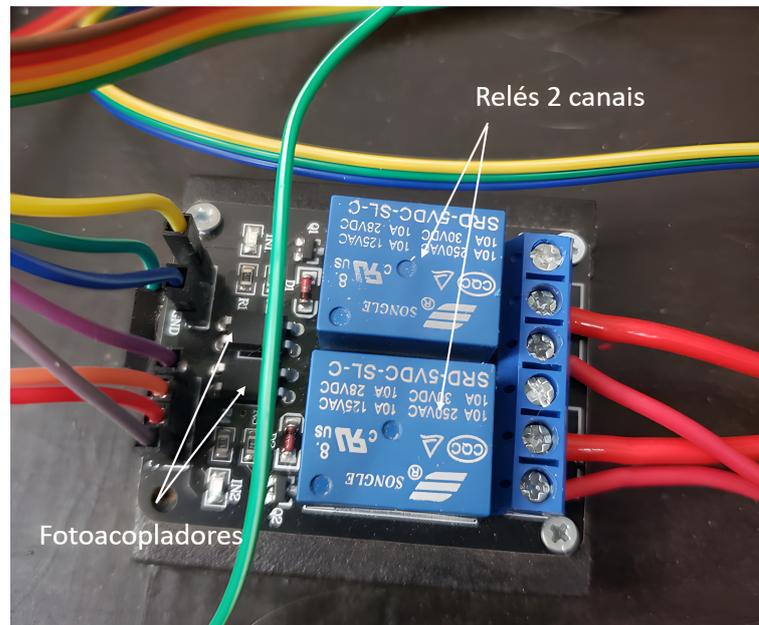


Figura 27 – Módulo de relés duplo e fotoacopladores.
Fonte: A autora.

3.3.3 Os Sinais de Controle

Existem basicamente dois tipos de controle para cargas de potência, os controles lineares e os controles pulsantes (PWM). Para os atuadores de liga de memória de forma, o controle por PWM foi adotado para variar a intensidade média da corrente nas ligas sem diminuir a tensão que lhes fossem aplicadas. Em outras palavras, se a tensão de entrada for de 5 Volts, as ligas recebem pulsos de 5 Volts, mas se comportam como se, em média, recebessem uma tensão de entrada menor. Diante disso, podem-se definir algumas propriedades do PWM:

- PWM é uma forma de controlar a quantidade de energia entregue às ligas de memória de forma ligando e desligando a tensão.
- O valor médio da quantidade de energia entregue será em função da razão entre o tempo ligado e o tempo total.
- A razão entre o tempo ligado e o tempo do ciclo pode ser ajustada por um dispositivo de monitoramento (sugestão para trabalhos futuros).

O sinal PWM nada mais é que uma onda retangular de frequência constante na qual o tempo ligado e desligado variam para estabelecer o ciclo de trabalho desejado. Existem várias formas de se criar esse tipo de sinal. Para este projeto, foi utilizada a placa *Arduino*[®], e

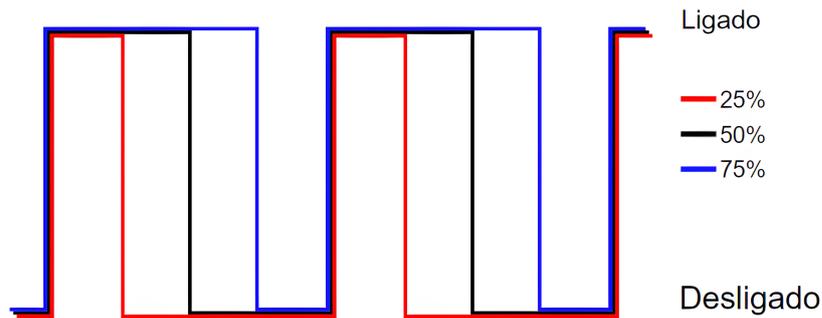


Figura 28 – Modulação por largura de pulsos com ciclos de trabalho definidos em 25%, 50% e 75%.
Fonte: <https://www.altanatubes.com.br>

os ciclos de trabalho selecionados para a pesquisa foram os valores de 50% e 75%. A figura 28 representa as características de onda assumidas pelos respectivos valores.

Dentre as vantagens do controle PWM, para esta pesquisa, especialmente, é que quando o MOSFET está na região de corte e, portanto, a corrente é zero (entre os pulsos), não há dissipação de calor. Da mesma forma, quando o MOSFET está na região de saturação para conduzir a corrente máxima, sua resistência é praticamente zero e a potência que ele dissipa é quase nula. Em outras palavras, o rendimento do circuito para energização das LMF e consequente aquecimento por controle pulsante é muito maior se comparado com um tipo de controle linear.

Definido o sistema de acionamento e o tipo de controle aplicado, a etapa seguinte se refere à leitura para acompanhamento da variação de temperatura das LMF. A técnica adotada neste projeto foi a utilização de um sensor infravermelho IR MLX90614 desenvolvido para fazer medições em projetos com microcontroladores sem contato com o objeto a ser medido. A figura 29 mostra a posição do sensor em relação aos atuadores de LMF na plataforma didática-experimental - BRAVUS.

O desafio encontrado durante os testes experimentais foi a imprecisão das medidas de temperatura das LMF já que os valores apresentados correspondiam à temperatura do fio acionado mas também à temperatura dos objetos ao seu redor, pois, o sensor infravermelho é capaz de detectar e medir a radiação emitida pelos objetos em seu campo de visão de 90°. Assim, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se utilizar um sensor termopar de contato direto.

Como requisito final do projeto, um potenciômetro linear foi utilizado como sensor de posição angular da borda de fuga do aerofólio de geometria variável. A definição pelo componente foi pela vantagem de ser facilmente encaixado no eixo de junção das duas seções do aerofólio, além da simplicidade de operação e menor custo. Foi posicionado na superfície inferior do protótipo e apoiado por um suporte de fixação. Como um divisor de tensão variável, é composto por uma faixa de material resistivo (geralmente grafite) ligada entre seus dois terminais externos. Nesse material, desliza um cursor ligado diretamente

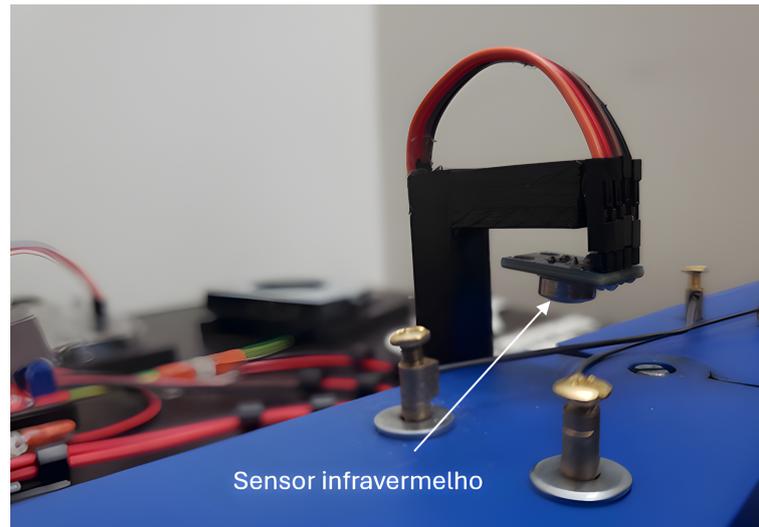


Figura 29 – Módulo de sensor de temperatura infravermelho posicionado acima das ligas de memória de forma.

Fonte: A autora.

ao terminal central do potenciômetro, que pode ser movimentado através do eixo rotativo. Quando a posição do cursor é alterada, também a resistência entre o terminal central e os dois terminais externos são alteradas. Seu giro (mais especificamente chamado de curso) é restrito em 270 °.

No projeto, seus terminais externos foram soldados e conectados em uma tensão positiva e negativa, conforme ilustra a figura 30. A tensão do terminal central varia entre esses dois valores e foi medida por meio do pino analógico A1 do *Arduino*®. Após conversão dos valores, a posição do bordo de fuga do protótipo de perfil de aerofólio pode ser controlada. No entanto, a técnica não se mostrou eficiente devido à imprecisão das medidas, discutido com detalhes no capítulo final desta dissertação.

De forma geral, os componentes essenciais para que o objetivo proposto por esta pesquisa de dissertação pudesse ser alcançado estão relacionados acima. No entanto, para uma melhor interação com o usuário, dois displays de LCD⁷ com módulo I2C acoplado, foram introduzidos ao projeto. A função dos componentes foi compartilhar informações visuais sobre a geometria desejada, definida computacionalmente, e a geometria medida do protótipo de perfil de aerofólio, definida pelo sinal do sensor de posição, ilustrado na figura 31.

Por fim, a figura 32 mostra o esquemático do circuito e suas conexões projetados no software *Proteus*®. No anexo A desta dissertação, o algoritmo desenvolvido no ambiente IDE do *Arduino*® para o funcionamento automatizado da plataforma didática-experimental.

⁷ do inglês, *Liquid Crystal Display*

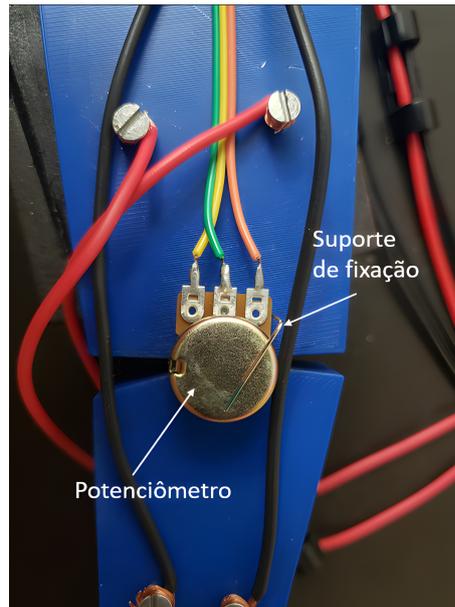


Figura 30 – Potenciômetro linear posicionado no eixo da articulação mecânica entre as duas seções do protótipo.

Fonte: A autora.

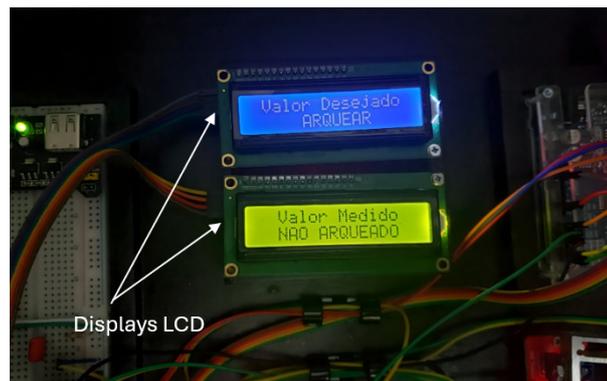


Figura 31 – Para melhor interação com o usuário, displays de lcd para informar a geometria desejada e a geometria medida do protótipo

Fonte: A autora.

3.4 Sistema de Integração e Aquisição de Dados

O sistema de integração e aquisição de dados foi desenvolvido no ambiente *Simulink*TM do *Matlab*[®]. A ferramenta permite criar e executar modelos integrados à placa *Arduino*[®] com disposição de uma biblioteca de blocos para configurar e acessar sensores, atuadores e interfaces de comunicação. Além disso, permite monitorar e ajustar algoritmos em execução na placa. Como o investimento para um sistema dedicado à aquisição de dados pode ser alto, a solução apresentada mostra-se como alternativa de baixo custo e grande potencial.

Como dito anteriormente, o *Arduino*[®] possui suporte a entradas e saídas e esses dados podem ser processados por meio de programação em linguagem C/C++. Muitas vezes o conhecimento dessa linguagem de programação torna-se um impedimento no desenvolvimento de aplicações utilizando a plataforma, podendo ser contornado quando o

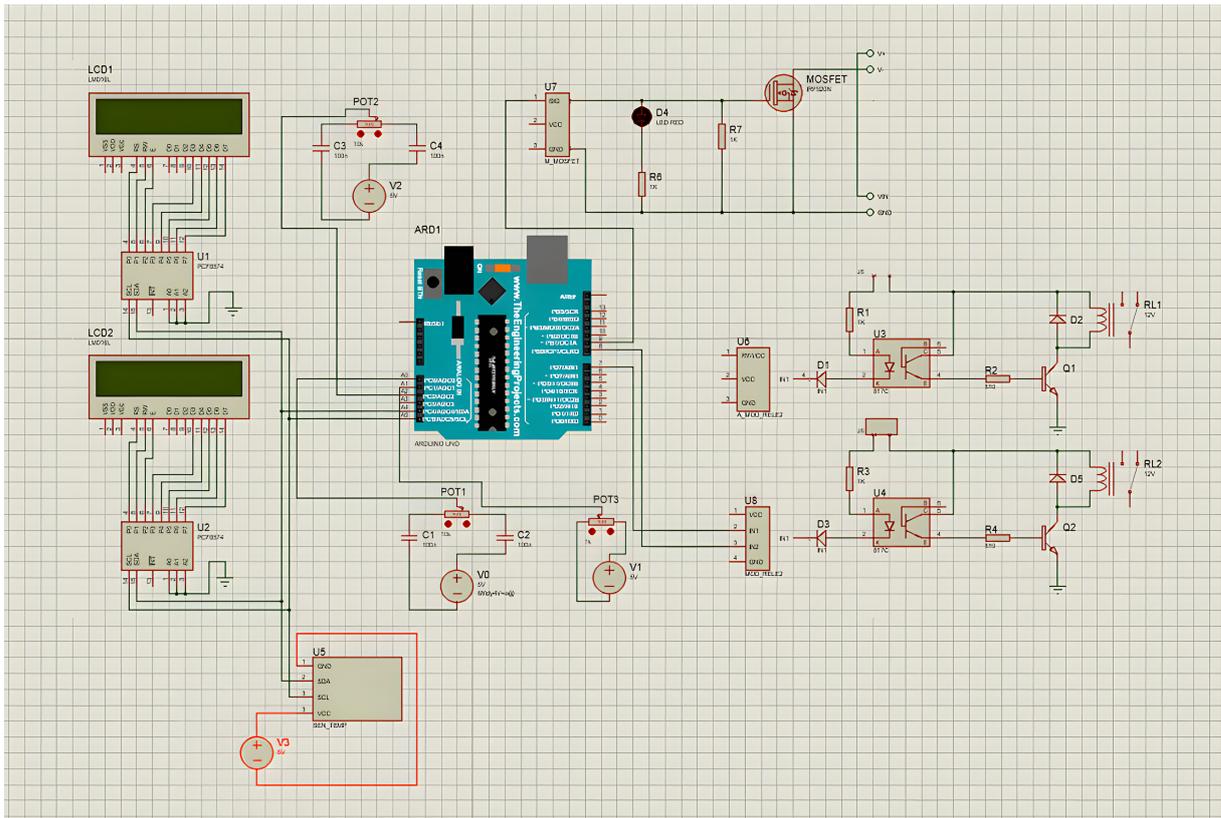


Figura 32 – Esquemático do circuito eletrônico montado na plataforma - BRAVUS, criado no software *Proteus*[®].

Fonte: A autora.

modelo físico e o modelo por blocos são integrados. A figura 33 apresenta uma configuração importante para que essa integração aconteça.

Outra opção muito viável para a aquisição dos dados de temperatura coletados pelo sensor MLX90614, foi a utilização do *Streamer* de Dados, disponível pela *Microsoft*[®] EXCEL. O *Streamer* de Dados é uma transferência de dados bidirecional que transmite dados em tempo real de um microcontrolador para o Excel ou vice-versa. Bastou conectar o *Arduino*[®] ao computador e abrir a pasta de trabalho para ativar a ferramenta e realizar a transferência de dados, ver figura 34.

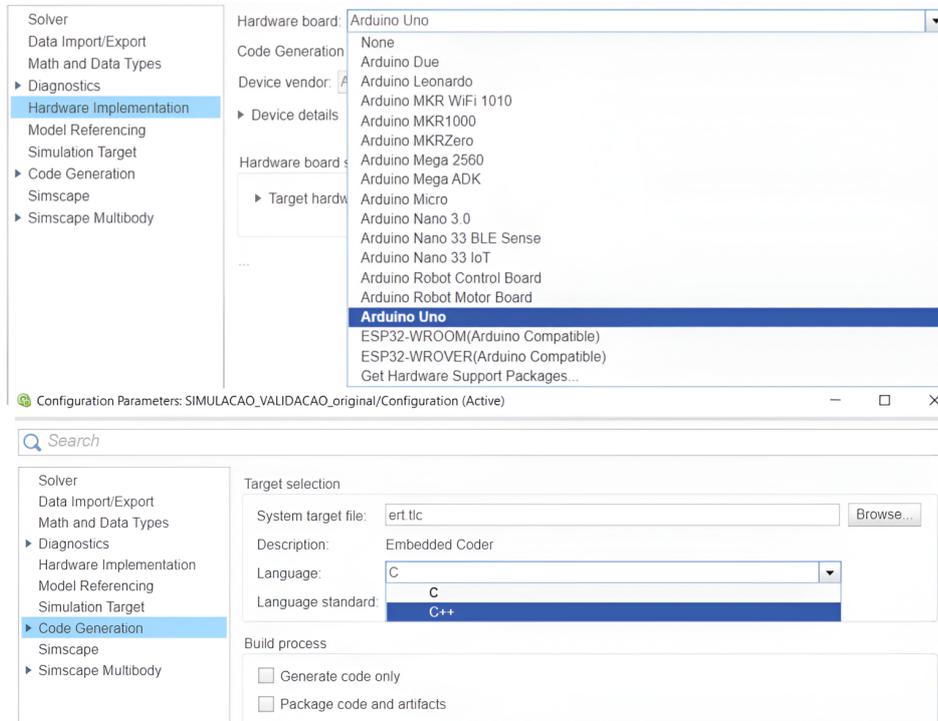


Figura 33 – Configuração da placa de hardware e da linguagem de programação
Fonte: A autora.

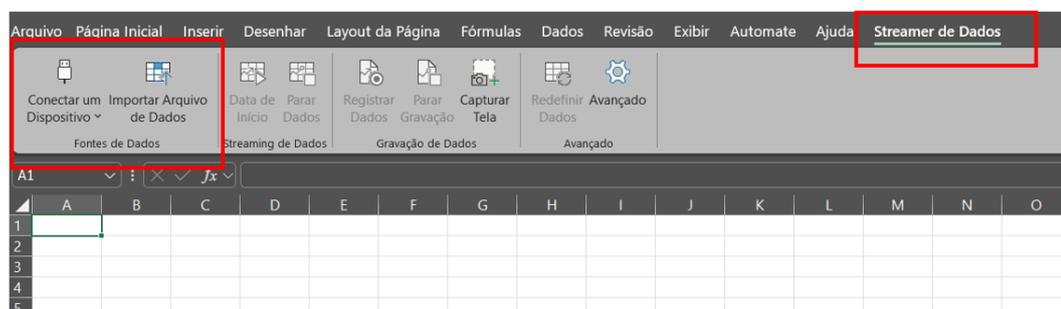


Figura 34 – *Streamer* de Dados Excel.
Fonte: A autora.

4 Modelagem do Sistema

A modelagem sempre foi necessária para conhecer a dinâmica do processo e assim poder propor novas implementações. Existem duas maneiras de se obter o modelo de um sistema: pela modelagem fenomenológica e pela identificação de sistemas. A primeira é aquela feita estabelecendo-se as equações constitutivas (dos componentes do sistema) e as equações de conservação (das quantidades de massa, energia, etc.). Neste trabalho, a técnica de identificação de sistemas que constrói modelos matemáticos de processos dinâmicos a partir de dados experimentais e pode, resumidamente, ser descrita pelas etapas a seguir, conforme (PARRA, 2013).

- Testes dinâmicos e coleta de dados, verificando aspectos importantes como a escolha dos sinais de excitação e a escolha do tempo de amostragem.
- Escolhe-se a representação matemática a ser usada, as equações diferenciais são normalmente utilizadas. Sistemas não lineares podem ser linearizados e a transformada de Laplace pode simplificar o método de solução, obtendo-se a função de transferência do sistema.
- Estimam-se os parâmetros do sistema, escolhendo-se o algoritmo a ser utilizado;
- Por fim, realiza-se a validação do modelo para verificar se ele representa ou não as características do sistema original.

O sistema em estudo é uma bancada didática composta por elementos elétricos e eletrônicos, alimentados por uma fonte de tensão, que controlam a corrente elétrica aplicada aos fios de liga de memória de forma que, por sua vez, provocam um movimento de rotação de até 20° no bordo de fuga do protótipo de perfil aerodinâmico. Esse movimento produz uma variação de geometria do perfil de aerofólio detectada por um potenciômetro.

4.1 Modelagem Matemática

Conforme citado no capítulo 2, este trabalho foi fundamentado no modelo matemático apresentado por (JAYENDER et al., 2008), que pode representar o comportamento das LMF. O modelo do atuador de fio de LMF pode ser dividido nos seguintes subsistemas: modelo da mudança de fase e o modelo do sistema mecânico.

A transformação de fase nas ligas de memória de forma está diretamente relacionada à variação de temperatura. Sendo assim, a plataforma didática-experimental - BRAVUS está

equipada com um sensor de temperatura infravermelho que coleta os dados de variação de temperatura emitidos pelos atuadores do protótipo. Além disso, este trabalho apresenta o modelo do perfil aerodinâmico projetado no ambiente de simulação multicorpo¹ para sistemas mecânicos 3D da MathWorks®), que será discutido nas próximas seções. Para melhor compreensão, o diagrama de blocos que representa o sistema físico é apresentado na figura 35 e o diagrama de blocos que representa o sistema modelado é apresentado na figura 36.

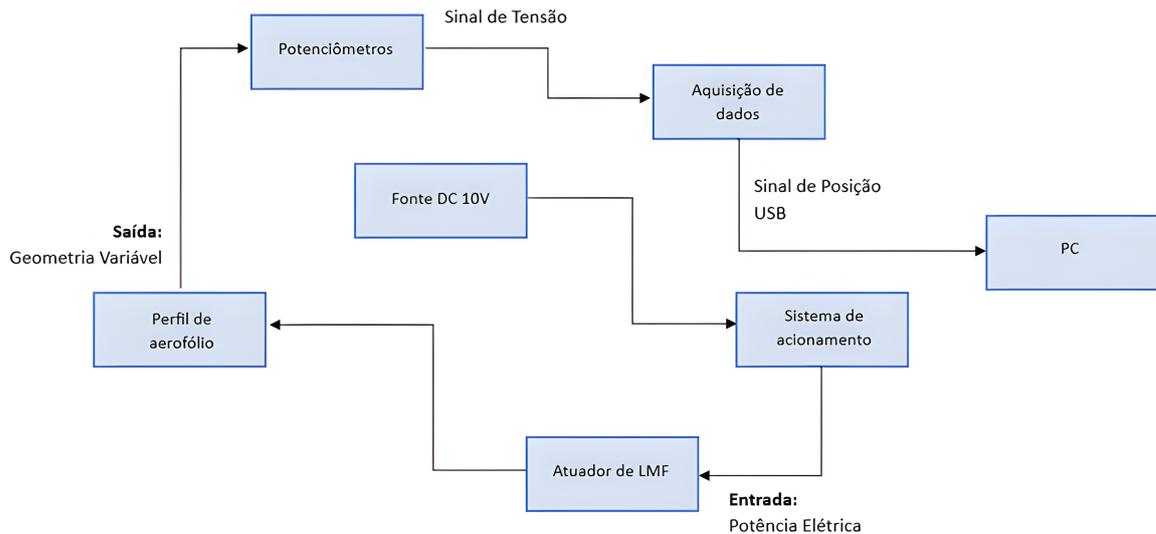


Figura 35 – Diagrama de blocos do sistema físico.
Fonte: Adaptado de (BARROSO, 2019).

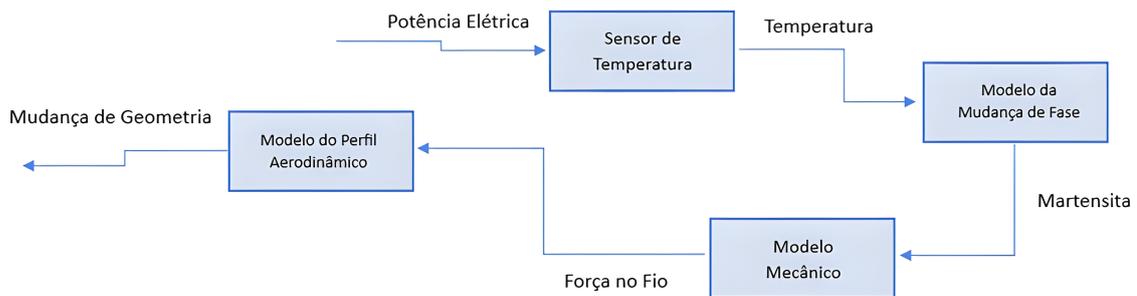


Figura 36 – Diagrama de blocos do sistema modelado
Fonte: Adaptado de (BARROSO, 2019).

A potência elétrica fornecida pelo sistema de acionamento (módulo MOSFET), produz uma corrente elétrica que percorre os fios de memória de forma, elevando sua temperatura (T), por efeito *Joule*, até promover a mudança de fase na sua estrutura microscópica. Essa transformação é caracterizada pela porcentagem de martensita (ξ) presente, sendo $\xi = 1$ (100%) para a fase fria (Martensita), e $\xi = 0$ (0%) para a fase quente (Austenita). Essa fração martensítica determina a deformação do atuador de fio LMF que provoca o movimento rotacional do bordo de fuga do perfil de aerofólio, detectado por um potenciômetro.

¹ do inglês, *Simscape Multibody*TM

4.2 O Modelo de Mudança de Fase

A LMF possui uma histerese na relação entre a fração martensítica ξ e a temperatura T , conforme apresentado na figura 37. Essa histerese está relacionada com a dissipação e assimilação do calor latente, devido à mudança de fase, que tende a retardar o aquecimento e o resfriamento (VELÁZQUEZ; PISSALOUX, 2012). As temperaturas de transição (M_f , M_s , A_s , A_f), já definidas no capítulo 2 desta dissertação, foram obtidas por meio de catálogo do fabricante e são apresentadas na Tabela 4.

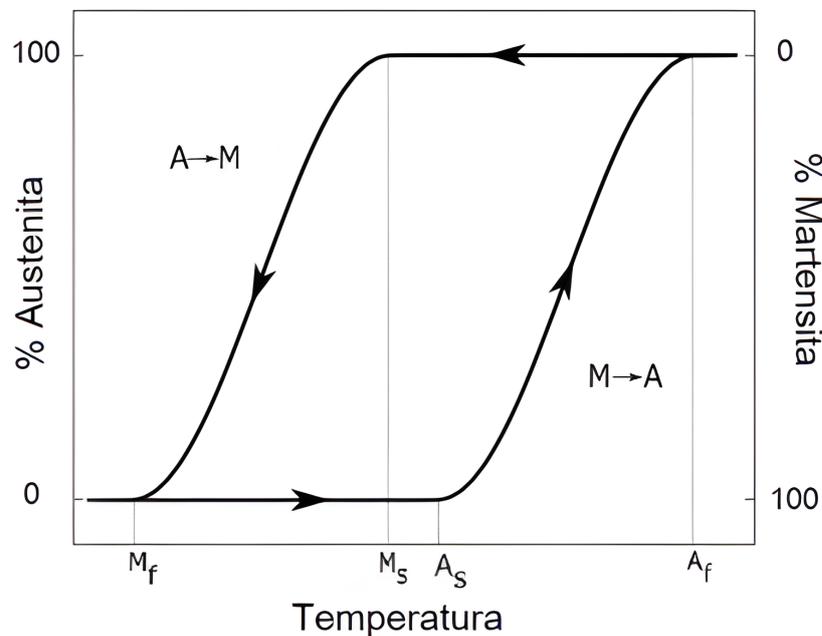


Figura 37 – Curva de histerese na LMF.
Fonte: Adaptado de (BARROSO, 2019).

Tabela 4 – Temperaturas de transição do fio de LMF utilizado no projeto. Fonte: Catálogo NEXTEL.

Temperatura	Valor
M_f	25°C
M_s	38°C
A_s	32°C
A_f	40°C

O modelo apresentado é baseado em uma relação empírica que utiliza a teoria de estatística Fermi-Dirac, utilizada em diversos trabalhos, como em (ABDELAAL; NAGIB, 2014), que descrevem a fração martensítica $\xi(T)$ durante o aquecimento, equação 4.1, e o resfriamento, equação 4.2, do fio em função apenas das temperaturas M_s , M_f , A_s e A_f , aplicando cargas constantes.

$$\xi_a(T) = \begin{cases} 0, & T > A_f \\ 0,5[\cos(\pi \frac{T-A_s}{A_f-A_s}) + 1] & A_s < T < A_f \\ 1, & T < A_s \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\xi_r(T) = \begin{cases} 0, & T > M_s \\ 0,5[\cos(\pi \frac{T-M_f}{M_s-M_f}) + 1] & M_f < T < M_s \\ 1, & T < M_f \end{cases} \quad (4.2)$$

onde $\xi_a(T)$ é a fração martensítica no aquecimento e $\xi_r(T)$ é a fração martensítica no resfriamento.

4.3 Modelo do Sistema Mecânico

Ainda conforme (BARROSO, 2019), a mudança de fase, expressa pela fração martensítica calculada ξ , permite estimar o trabalho mecânico (W) e o movimento do fio, gerados pela variação de calor (temperatura). A deformação (ϵ) é modelada por uma equação diferencial de primeira ordem bem fundamentada na literatura, a equação 4.3, conforme (ABDELAAL; NAGIB, 2014).

$$\epsilon + \tau_{mec} \frac{d\epsilon}{dt} = \epsilon[1 - \xi(T)] \quad (4.3)$$

onde ϵ é a máxima deformação recuperável da LMF, disponível em (AGGARWAL, 2022), e τ_{mec} é a constante de tempo mecânica que depende do diâmetro do fio.

De acordo com (JAYENDER et al., 2008), desconsiderando a super elasticidade (SE) do material e mantendo apenas o efeito de memória de forma (EMF), o módulo de elasticidade do fio com LMF pode ser aproximado pela equação 4.4.

$$E_{LMF} = \frac{E_a + E_m}{2} \quad (4.4)$$

onde E_a e E_m são os módulos de elasticidade para a fase austenítica e martensítica, respectivamente, conforme os resultados apresentados por (JAYENDER et al., 2008) e (ABDELAAL; NAGIB, 2014).

Outra abordagem feita por (XIAO GUANG et al., 2017), mantendo-se as duas propriedades (SE e EMF), foi demonstrado que é válida a equação 4.5. Assim, a força do fio F_{LMF} ao se deformar por efeito Joule é dada em função de E_{LMF} , ϵ e da área transversal do fio A_t , conforme equação 4.6.

$$E_{LMF} = \xi * E_m + (1 - \xi) \cdot E_a \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{LMF} &= E_{LMF} \cdot \varepsilon \\ F_{LMF} &= E_{LMF} \cdot \varepsilon \cdot A_t \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.4 Modelo do Perfil de Aerofólio

4.4.1 Visão Geral do Simscape Multibody™

Esta seção apresenta alguns detalhes da modelagem do perfil de aerofólio de geometria variável utilizando o *Simscape Multibody*™. Para um melhor entendimento de como funciona o ambiente de simulação e modelagem de sistemas físicos *Simscape*™ do *Matlab*®, é interessante citar que o processo de criação consiste em conectar diferentes blocos configurados para atender uma função associada. Depois que o modelo é construído e configurado, ele pode ser simulado em tempo de amostra discreto ou contínuo.

Diferentemente dos blocos do *Simulink*™ que representam operações matemáticas, os blocos do *Simscape*™ representam as partes geométricas e permitem que essas conexões sejam feitas de forma análoga à conexão de componentes reais, inclusive por meio de diferentes tipos de juntas que restringem o movimento relativo dos corpos em diferentes direções. De forma ainda mais específica, pode ser introduzida uma conexão que represente um sinal físico intrínseco ao processo, como, por exemplo, atrito, torque ou força gravitacional.

Adicionalmente, existem blocos que funcionam como sensores e permitem a medição do movimento resultante do sistema. Desta forma, pode-se medir deslocamentos, velocidades, acelerações, entre outras variáveis de cada componente do sistema em relação a uma referência fixa ou até mesmo em relação a outro componente. Também vale ressaltar que o *Simscape*™ gera os modelos dentro do ambiente *Simulink*™, permitindo a interação entre os modelos criados nos dois ambientes.

Uma vez modelado o sistema, o *Simscape Multibody*™ resolve as equações de movimento para o sistema mecânico e permite que uma animação 3D seja gerada para a visualização da dinâmica do sistema. Foi neste contexto que o modelo do perfil aerodinâmico de geometria variável foi projetado. Beneficiado pela funcionalidade da ferramenta em permitir a importação de projetos CAD², oriundos do software *Autodesk Inventor*®, o modelo foi criado e testado sob procedimentos rápidos que serão discutidos a seguir.

² do inglês, *Computer Aided Design*

4.4.2 As Etapas da Construção do Modelo

De maneira geral, quatro etapas foram estabelecidas para a construção do modelo do perfil de aerofólio de geometria variável, são elas: estudar o sistema, modelar os corpos, montar o sistema e especificar e medir as variáveis.

A primeira etapa de estudo compreendeu a identificação dos corpos, as juntas cinemáticas e as restrições a serem incorporadas ao modelo. De fato, na prática, esta etapa aconteceu de modo natural ao longo do processo de confecção desta pesquisa. Trabalhos relevantes na mesma área trouxeram o conhecimento básico para ajudar na definição e identificação das partes relacionadas. Por exemplo, foi definido que o nível de complexidade de movimento do protótipo do perfil seria reduzido a um grau de liberdade, por se tratar de um estudo experimental utilizando ligas de memória de forma como atuadores ao nível de maturidade tecnológica ainda baixo. Um grau de liberdade exige apenas uma junta cinemática, cujo modelo foi definido ao considerar uma necessária estabilidade do movimento relativo entre os dois corpos que, por sua vez, foi restrito a uma variação angular de aproximadamente 20°.

A segunda etapa englobou a construção da geometria de cada corpo do sistema. Nessa etapa, utilizou-se o *Autodesk*® *INVENTOR* para construir o modelo tridimensional dos corpos do sistema, compostos pela seção 1 (bordo de ataque) e seção 2 (bordo de fuga), conforme ilustram a figura 38 e a figura 39. A funcionalidade do *Simscape Multibody*™ permitiu fazer a importação desses modelos tridimensionais para seu próprio ambiente de simulação.

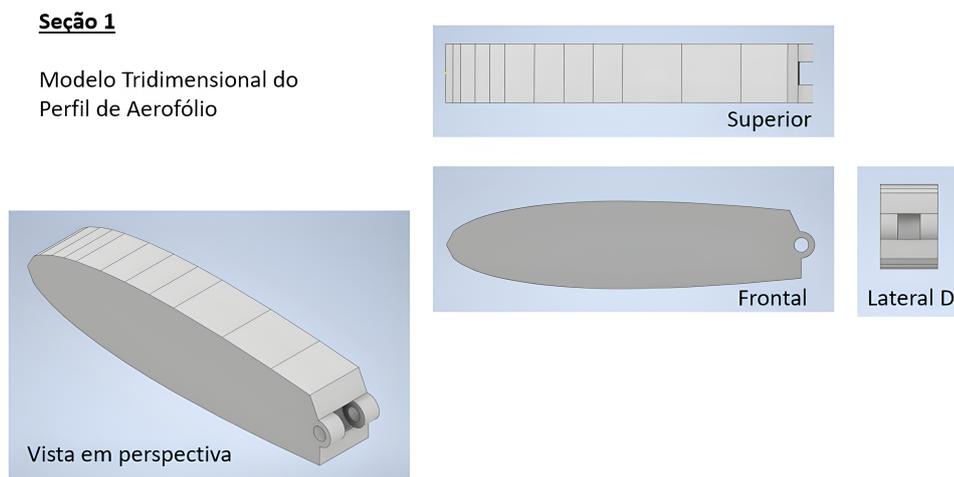


Figura 38 – Modelo tridimensional da seção 1 do protótipo.

Fonte: A autora.

A terceira etapa consiste na montagem do sistema utilizando os blocos específicos que representam cada funcionalidade. Dentre eles, os blocos que representam os corpos criados e a junta cinemática mais apropriada. Além destes, em todos os modelos físicos do *Simscape Multibody*™, são introduzidos os blocos que representam: o (*Mechanism Configuration*) que fornece os parâmetros mecânicos e de simulação para o sistema, incluindo o valor numérico

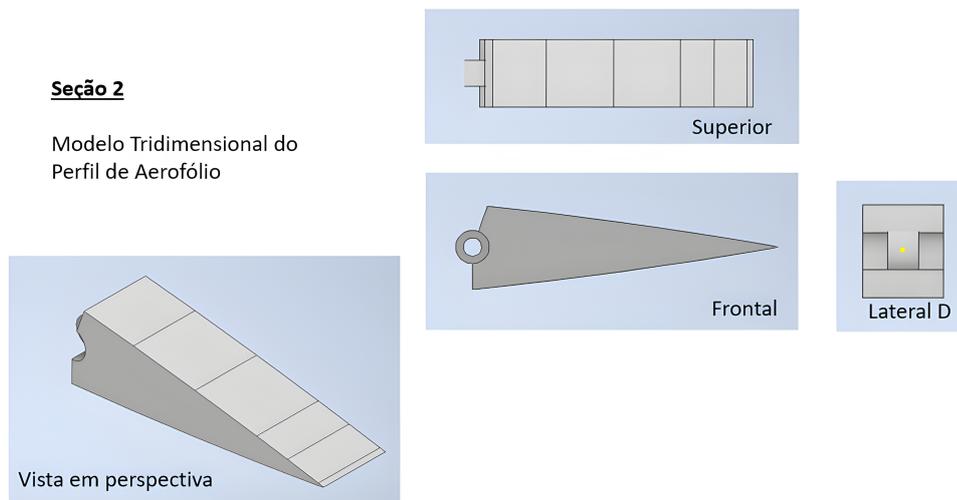


Figura 39 – Modelo tridimensional da seção 2 do protótipo.
Fonte: A autora.

para a aceleração da gravidade; (*World Frame*) que fornece acesso ao frame que representa o solo, ou seja, outro bloco imóvel e ortogonal que serve de referência para os demais blocos do sistema; o (*Solver Configuration*) que define as configurações do solucionador a ser utilizado na simulação; e o (*Rigid Transform*) que define uma transformação rígida tridimensional entre dois frames. Todos os blocos representados na figura 40 do modelo de perfil aerodinâmico de geometria variável criado. Na página seguinte, a figura 41 mostra o modelo após rodar a simulação.

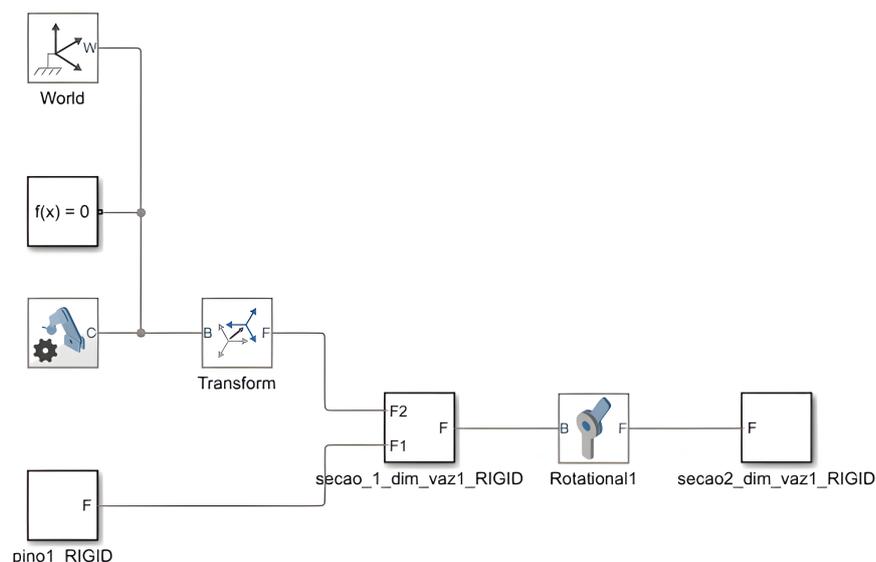


Figura 40 – Modelo do perfil aerodinâmico criado no **Simscape Multibody™**.
Fonte: A autora.

Por fim, a etapa de especificação e adoção das variáveis dinâmicas do sistema incluiu as forças externas e restrições. O mais importante nesta etapa é manter as características

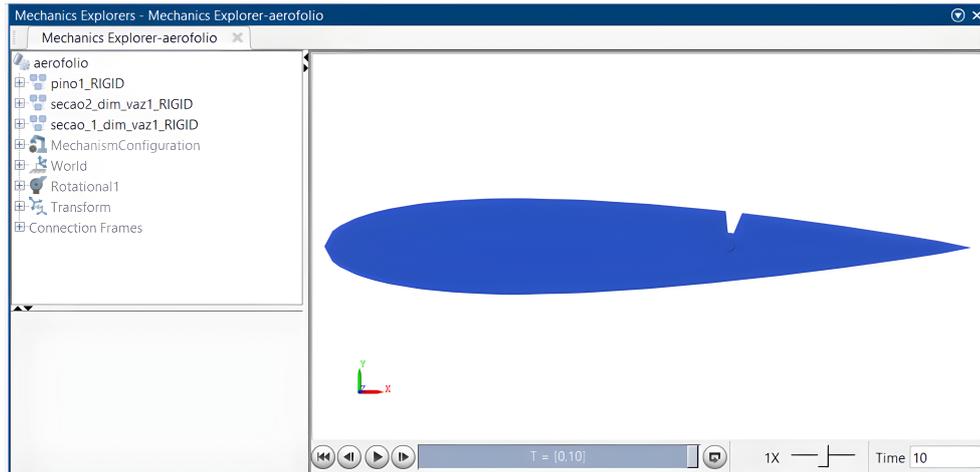


Figura 41 – Modelo do perfil aerodinâmico representado graficamente na simulação computacional.
Fonte: A autora.

do protótipo físico real. Conhecendo essas características, no momento em que o modelo foi criado tridimensionalmente no CAD, elas podem ser inseridas no projeto. Desta forma, grande parte das restrições impostas foram herdadas no modelo final. Em contrapartida, no bloco *Revolution Joint*, que representa a junta cinemática selecionada, foi necessário especificar a posição inicial e final do bordo de fuga para restringir sua variação angular. Os demais parâmetros que representam as forças intrínsecas ao sistema, como coeficiente de amortecimento e rigidez, foram adotados os valores padrão do *software*.

A força que promove o movimento do bordo de fuga e conseqüentemente sua variação angular em relação à seção 1 deve ser proveniente da ação dos atuadores de LMF quando submetidos à corrente elétrica e elevação de temperatura pelo efeito *Joule*. Assim sendo, para essa força externa atuar, o bloco que representa a junta cinemática do modelo deve possuir uma porta específica para um sinal físico, como dito anteriormente. Para configurá-la, bastou acessar a aba (*Actuation*) e definir o torque como entrada. O movimento foi calculado pelo solver do programa, segundo o padrão da dinâmica direta. Os resultados da simulação podem ser plotados conforme a necessidade do projeto. Se o objetivo é controlar a posição do atuador, então um sensor de posição deve existir e uma porta para saída de dados também foi selecionada na configuração do bloco.

Apesar da baixa complexidade do modelo, a ferramenta se mostrou bastante versátil por oferecer recursos abrangendo vários domínios com equações para a rede de componentes mecânicos, dentre outros. É importante mencionar que não foi objeto de estudo definir os parâmetros das forças intrínsecas e dissipativas de atrito entre os componentes do perfil de aerofólio de geometria variável, podendo servir de sugestão para trabalhos futuros.

5 Simulação e Validação da Plataforma Didática - BRAVUS

5.1 Experimento em Malha Aberta

Um experimento em malha aberta representa um sistema sem realimentação. Assim sendo, aplicou-se um sinal elétrico nos dois fios de LMF, alternadamente, esperando-se que o bordo de fuga do perfil de aerofólio alcançasse uma posição desejada. Com este propósito, um código e algoritmo baseados na utilização de bibliotecas, comandos de leitura e escrita de dados, bem como comandos para controle de variáveis foram desenvolvidos no Ambiente IDE do *Arduino*[®]. Optou-se também pelo acréscimo de um filtro de média móvel exponencial para amenizar os ruídos elétricos na entrada analógica do pino A1 do *Arduino*[®], responsável pela leitura do potenciômetro instalado entre as duas seções do perfil de aerofólio (sensor de posição).

Após todos os esforços para fazer com que a plataforma didática-experimental - BRAVUS pudesse alcançar o objetivo proposto, os testes experimentais foram iniciados. Os resultados demonstraram a dinâmica das variáveis de entrada e saída, definidas previamente. A entrada, o sinal elétrico de acionamento PWM, e a saída, a variação de geometria do perfil de aerofólio. Os parâmetros de *set point* para o limite máximo e limite mínimo de deslocamento do perfil de aerofólio foram ajustados no ambiente de programação, apesar da plataforma didática-experimental - BRAVUS permitir que esse ajuste seja feito manualmente, bastando programar o código para receber essa instrução.

Sendo assim, o objetivo do experimento foi avaliar como a variação de geometria do perfil de aerofólio se comportaria em frente ao sinal de entrada modificado. A figura 42, na página seguinte, apresenta a plataforma didática-experimental - BRAVUS no momento de um dos testes. A aquisição dos dados foi realizada utilizando o *Streamer de Dados* da *Microsoft*[®] EXCEL, que permite a transferência de dados da placa *Arduino*[®] em tempo real.

5.1.1 Avaliação da Dinâmica das Variáveis

O ciclo de trabalho do sinal PWM, gerado pelo pino 5 do *Arduino*[®], foi enviado ao módulo MOSFET IRF520N. Ciclos de 100%, 75% e 50% foram simulados, situação que contribuiu para variar o valor da corrente elétrica geradora de calor por efeito *Joule* nas LMF e, conseqüentemente, a movimentação do bordo de fuga do perfil de aerofólio. Com a intenção de introduzir perturbações ao sistema, testes foram realizados durante o dia e a noite, por apresentarem diferentes condições de temperatura ambiente, podendo interferir no aquecimento das LMF. O tempo de simulação foi de 420 segundos, suficiente para gerar

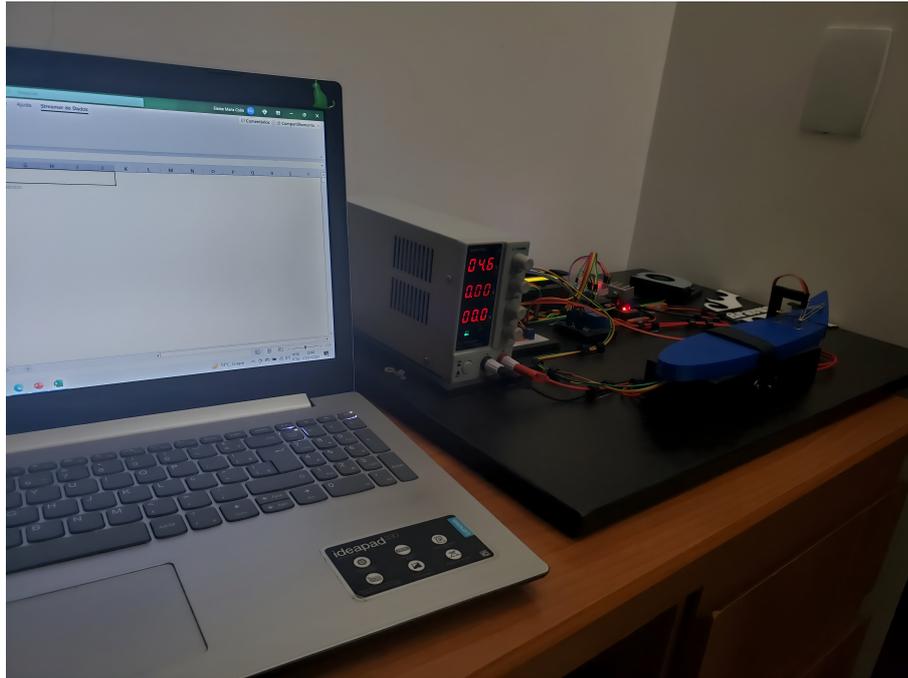


Figura 42 – Testes sendo realizados na plataforma didática-experimental - BRAVUS.
Fonte: A autora.

uma sequência de movimentos cíclicos do bordo de fuga do perfil aerodinâmico. Cada movimento de subida e descida, correspondendo a um ciclo.

No primeiro teste, realizou-se a simulação para um ciclo de trabalho PWM de 100%, significando dizer que foi ajustada uma tensão de 5 Volts na fonte de alimentação. Assim, uma tensão de 5 V estava disponível para energizar as LMF, desprezadas as perdas existentes. O gráfico representado na figura 43 demonstra o resultado obtido. A temperatura ambiente medida era de 25°C.

Destaca-se que os dois fios de LMF são posicionados paralelamente entre si e que as extremidades da esquerda, de ambos os fios, são fixadas na seção 1 (bordo de ataque) do perfil de aerofólio, enquanto as extremidades da direita, de ambos os fios, são fixadas na seção 2 (bordo de fuga). Dessa maneira, quando a inclinação máxima fosse requerida, o módulo de relés abria caminho para a corrente energizar o fio de LMF superior, e quando a inclinação mínima fosse requerida, esse mesmo módulo abria caminho para a corrente energizar o fio de LMF inferior, de forma alternada e temporalizada.

No gráfico, é possível analisar o comportamento da temperatura dos fios de LMF, captado pelo sensor infravermelho, e também o deslocamento da seção 2 do perfil de aerofólio (bordo de fuga). Percebe-se que nos primeiros segundos de experimento, devido à influência da temperatura ambiente, a corrente elétrica provoca um aquecimento gradativo e lento nos fios de LMF, até que, no tempo de 109 segundos, a temperatura atingiu um valor máximo de 32°C aproximadamente. Nesse momento, o fio de LMF inferior passou pelo processo de transformação de fase e aplicou uma força de deslocamento ao bordo de fuga do perfil de

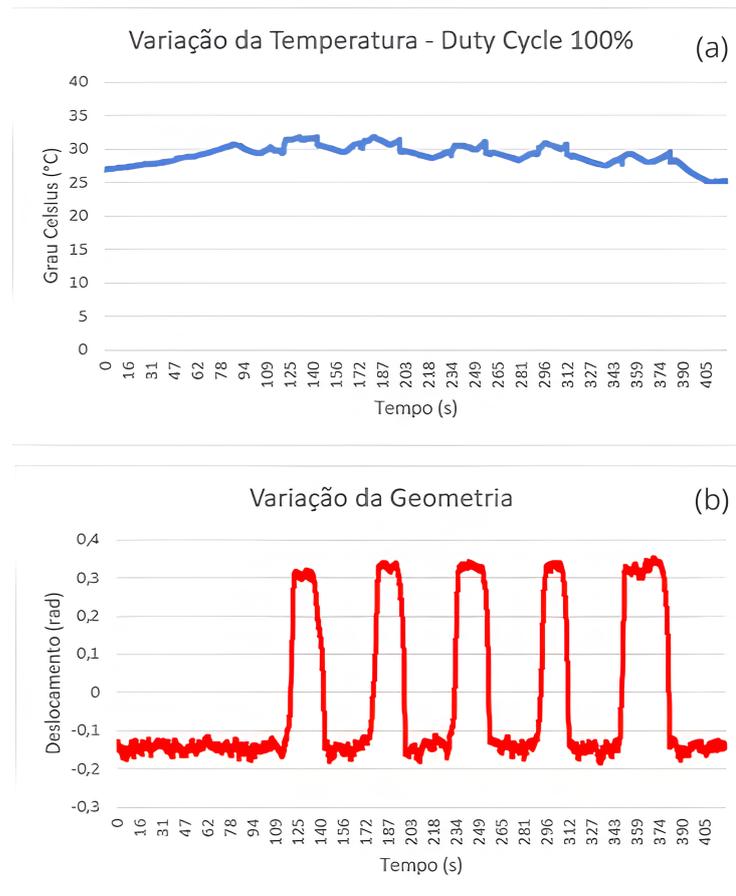


Figura 43 – (a) Variação da temperatura das LMF e (b) Variação da geometria do perfil de aerofólio mediante um sinal PWM de 100% equivalente a 5 Volts.

Fonte: A autora.

aerofólio de modo a projetá-lo para a condição de arqueado (20° de inclinação). No tempo de 125 segundos, o arqueamento do bordo de fuga atingiu sua inclinação máxima e permaneceu nessa condição até que o tempo de resfriamento do fio de LMF inferior fosse decorrido, e a transformação de fase do fio de LMF superior pudesse aplicar uma força de deslocamento ao bordo de fuga do perfil de aerofólio de modo a projetá-lo para a condição de não-arqueamento (0° de inclinação).

O algoritmo criado no ambiente IDE do *Arduino*[®] permite que essa sequência de deslocamentos aconteça no modo contínuo. No entanto, no tempo de 420 segundos decorridos, a simulação foi interrompida. Percebe-se, como resultado, uma sequência de deslocamentos com tempos de arqueamento e não-arqueamento muito bem definidos, e com deslocamento máximo para todos os movimentos representados no período. Essas características afirmam uma boa resposta dos fios de LMF para uma tensão de 5 Volts e Duty Cycle 100% nessa condição.

No segundo teste, realizou-se a simulação para um ciclo de trabalho PWM de 75%, significando dizer que, ajustada uma tensão de 5 Volts na fonte de alimentação, uma tensão de 3,75 Volts, aproximadamente, estava disponível para energizar as LMF, desprezadas

as perdas existentes. O gráfico representado na figura 44 demonstra o resultado obtido. A temperatura ambiente medida era de 25°C.

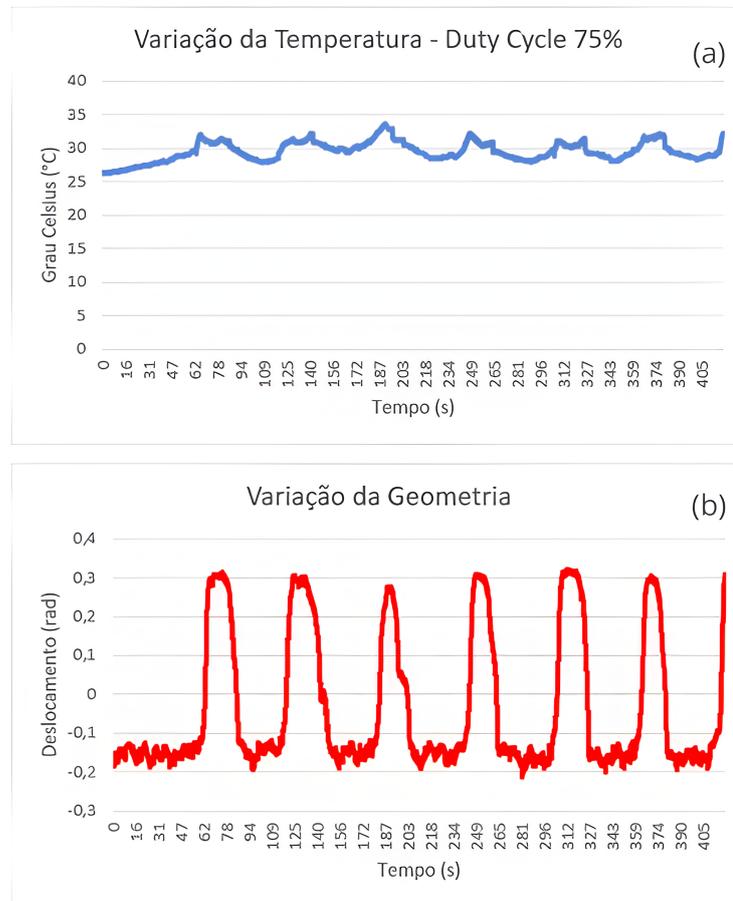


Figura 44 – (a) Variação da temperatura das LMF e (b) Variação da geometria do perfil de aerofólio mediante um sinal PWM de 75% equivalente a 3,75 Volts.

Fonte: A autora.

No gráfico, também é possível analisar o comportamento da temperatura dos fios de LMF, captado pelo sensor infravermelho, e também o deslocamento da seção 2 do perfil de aerofólio (bordo de fuga). Percebe-se que nos primeiros segundos de experimento, devido à influência da temperatura ambiente, a corrente elétrica provoca um aquecimento gradativo e mais rápido nos fios de LMF, em relação à simulação anterior. A temperatura atingiu um valor máximo de 32°C no tempo decorrido de 65 segundos, aproximadamente. Nesse momento, o fio de LMF inferior passou pelo processo de transformação de fase e aplicou uma força de deslocamento ao bordo de fuga do perfil de aerofólio de modo a projetá-lo para a condição de arqueado (20° de inclinação). No tempo de 68 segundos, o arqueamento do bordo de fuga atingiu sua inclinação máxima e permaneceu nessa condição até que o tempo de resfriamento do fio de LMF inferior fosse decorrido, e a transformação de fase do fio de LMF superior pudesse aplicar uma força de deslocamento ao bordo de fuga do perfil de aerofólio de modo a projetá-lo para a condição de não-arqueamento (0° de inclinação) no tempo de 95 segundos.

Percebe-se, como resultado, uma sequência de deslocamentos com tempos de aquecimento e não-aquecimento bem definidos, no entanto, com deslocamento máximo comprometido no segundo e terceiro ciclos de movimento. Essas características afirmam ainda uma resposta satisfatória dos fios de LMF para uma tensão de 5 Volts e Duty Cycle 75% nessa condição.

No terceiro teste, realizou-se a simulação para um ciclo de trabalho PWM de 50%, significando dizer que, ajustada uma tensão de 5 Volts na fonte de alimentação, uma tensão de 2,5 Volts, aproximadamente, estava disponível para energizar as LMF, desprezadas as perdas existentes. O gráfico representado na figura 45 demonstra o resultado obtido. A temperatura ambiente medida era de 28°C.

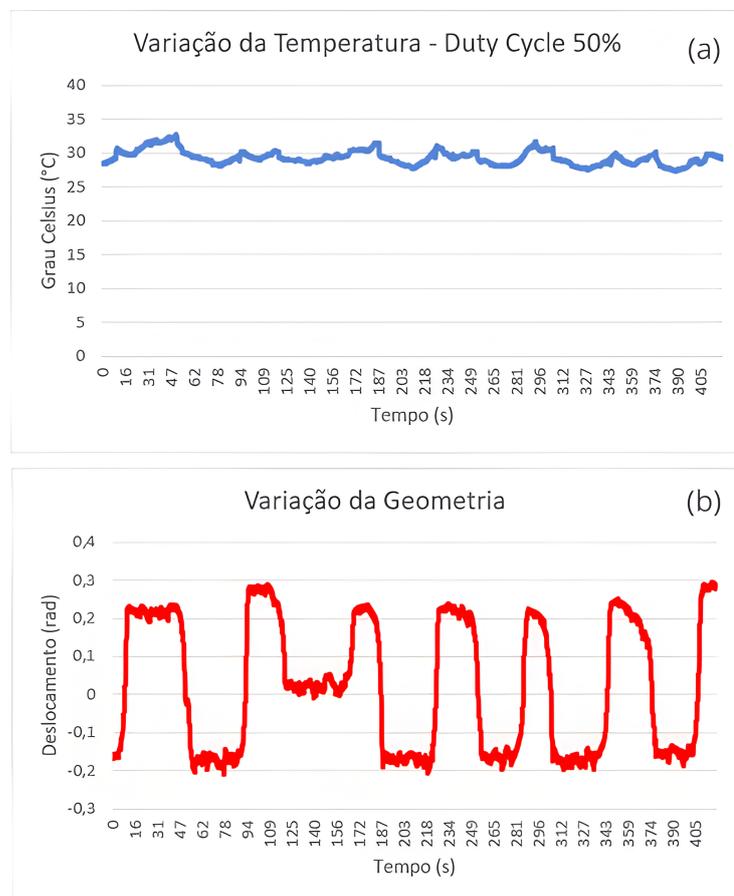


Figura 45 – (a) Variação da temperatura das LMF e (b) Variação da geometria do perfil de aerofólio mediante um sinal PWM de 50% equivalente a 2,5 Volts.

Fonte: A autora.

No gráfico, também é possível analisar o comportamento da temperatura dos fios de LMF, captado pelo sensor infravermelho, e também o deslocamento da seção 2 do perfil de aerofólio (bordo de fuga). Percebe-se que, nos primeiros segundos de experimento, devido à influência da temperatura ambiente, a corrente elétrica provoca um aquecimento rápido nos fios de LMF, em relação às simulações anteriores. A temperatura atingiu um valor máximo de 32°C no tempo decorrido de 10 segundos, aproximadamente. Nesse momento, o

fio de LMF inferior passou pelo processo de transformação de fase e aplicou uma força de deslocamento ao bordo de fuga do perfil de aerofólio de modo a projetá-lo para a condição de arqueado máximo (20° de inclinação). No entanto, o arqueamento do bordo de fuga não atingiu sua inclinação máxima e permaneceu nessa condição até que o tempo de resfriamento do fio de LMF inferior fosse decorrido, e a transformação de fase do fio de LMF superior pudesse aplicar uma força de deslocamento ao bordo de fuga do perfil de aerofólio de modo a projetá-lo para a condição de não-arqueamento (0° de inclinação) no tempo de 62 segundos.

Percebe-se, como resultado, uma sequência de deslocamentos com tempos de arqueamento e não-arqueamento bastante irregular, com deslocamento máximo comprometido em todos os ciclos de movimento, inclusive incompleto entre o segundo e terceiro ciclos. Essas características afirmam uma resposta insatisfatória dos fios de LMF para uma tensão de 5 Volts e Duty Cycle 50% nessa condição.

Por fim, para observar a variação de geometria do perfil de aerofólio sob condições adversas mais críticas, o quarto teste foi realizado. Representa uma condição de baixa temperatura ambiente, 13°C, com set point de limite superior reduzido em 75% do valor original, mantendo a tensão de 5 Volts com Duty Cycle de 100%. Adotado o tempo padrão de 420 segundos, o teste foi executado.

Na prática, a simulação teve como objetivo observar o comportamento do deslocamento do bordo de fuga do perfil de aerofólio quando induzido por uma corrente elétrica de 5 Volts que provocaria um aquecimento dos fios de LMF, mas sob forte influência da temperatura de ambiente. O fenômeno atrasou, consideravelmente, a transformação de fase das ligas. Além disso, a mudança do valor de *set point* máximo significa dizer que se esperava uma inclinação máxima de 15° do bordo de fuga do perfil de aerofólio e não mais de 20°, como sugerido pela construção geométrica do dispositivo. Os resultados são observados no gráfico da figura 46. Comprovaram uma redução significativa nos valores de temperatura, permanecendo a maioria do tempo abaixo dos valores de transformação de fase da liga. Como consequência, deslocamentos irregulares e ciclos de movimento com intervalos muito prolongados. Assim, sugerindo que a construção geométrica do dispositivo exerce uma forte influência, impedindo que o sistema de controle fosse eficaz.

5.2 Validação dos Resultados - Simulação do Modelo Híbrido

Uma ideia central envolvida no estudo do comportamento dinâmico de um sistema real é a de um modelo do sistema. Modelos são construções simplificadas e abstratas usadas para prever o comportamento de sistemas de interesse. Para isso, naturalmente, um modelo matemático é por vezes feito concomitantemente com a construção do modelo físico. Primeiramente, as relações constitutivas, que caracterizam o comportamento dos elementos

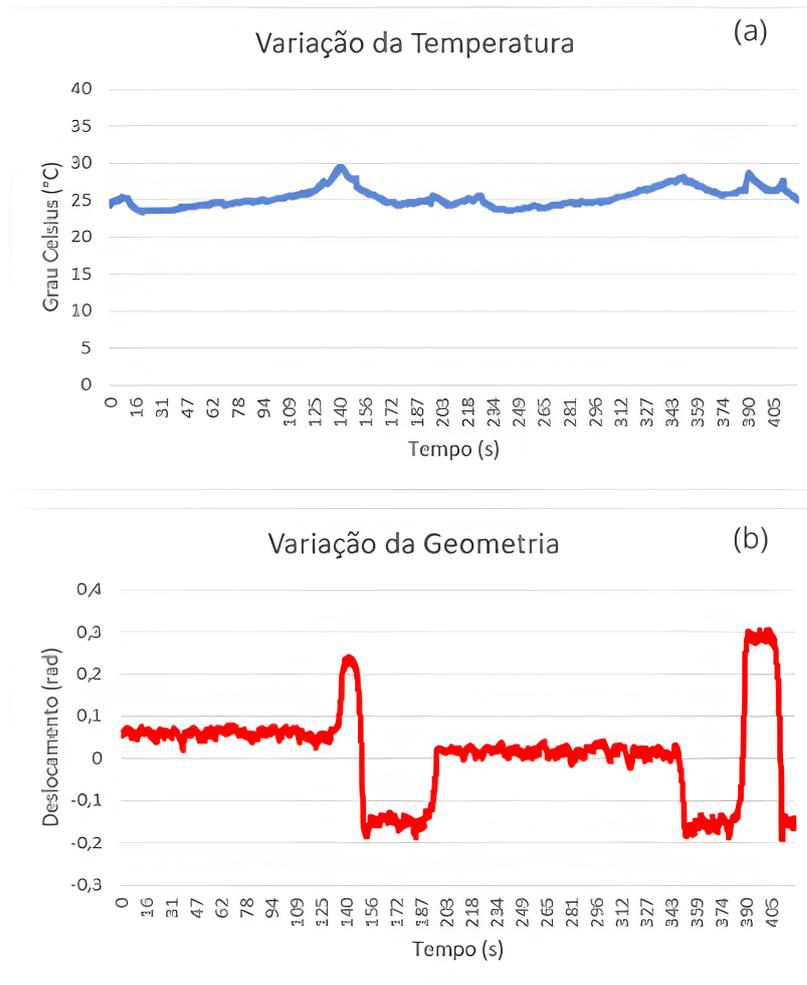


Figura 46 – (a) Variação da temperatura das LMF e (b) Variação da geometria do perfil aerodinâmico sob condições de temperatura ambiente mais crítica e *setpoint* máximo reduzido.

Fonte: A autora.

do sistema, são definidas. Por último, são introduzidas as relações de compatibilidade e de continuidade para que se tenha o modelo do sistema completo. A definição dos modelos analíticos para o comportamento termomecânico e deformação das LMF contribuiu para que um modelo computacional híbrido pudesse ser concebido e, por meio de comparação, os resultados da plataforma didática-experimental - BRAVUS pudessem ser validados.

Nesta dissertação, foi utilizado o software de programação *Matlab*[®] R2023a e a ferramenta de modelagem e simulação *Simulink*[™] para construir o modelo híbrido em malha aberta. A vantagem e o motivo pelo qual a ferramenta foi selecionada é que o *Simulink*[™] *Support Package for Arduino*[®] permite desenvolver e simular algoritmos em conexão simultânea à plataforma física gerenciada por uma placa *Arduino*[®] UNO. Representados por blocos, os sinais de entrada inseridas no sistema físico, bem como o sinal de saída que define a posição geométrica do perfil de aerofólio, foram introduzidos à modelagem computacional em conjunto com o modelo de transformação de fase, o modelo de deformação mecânica e o modelo do perfil de aerofólio de geometria variável, na seção anterior, por isso a expressão

modelagem híbrida, conforme figura 47.

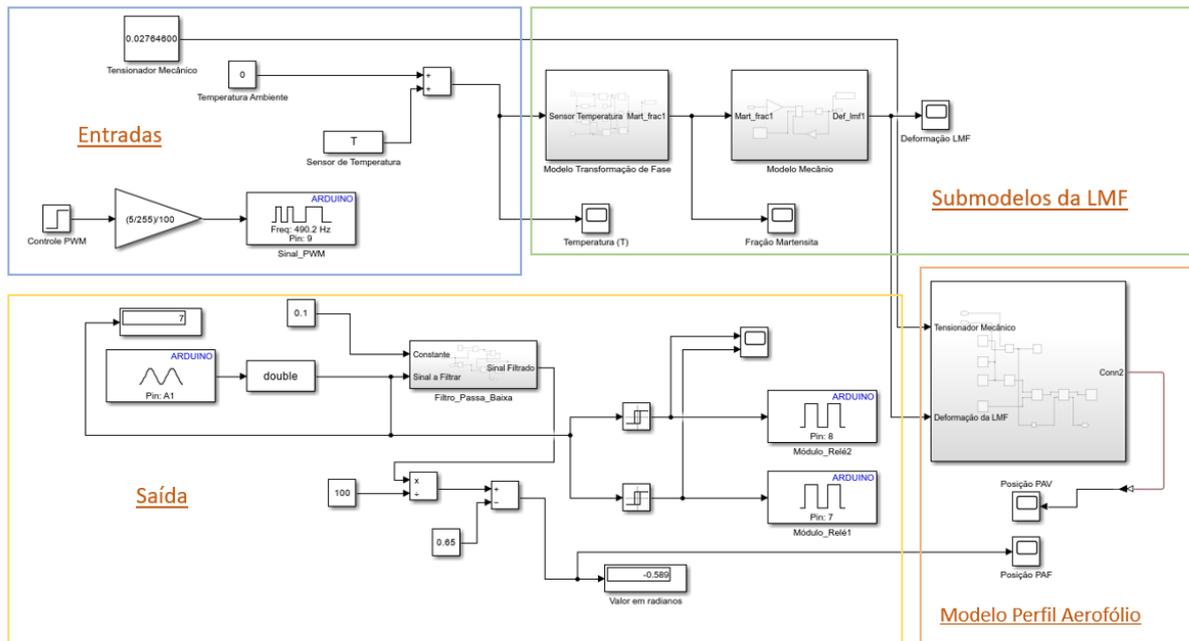


Figura 47 – Modelo híbrido em malha aberta utilizando plataforma didática-experimental - BRAVUS e Simulink™.

Fonte: A autora.

• Entradas do Sistema

Subgrupo formado especialmente pelo módulo MOSFET IRF520N, este não possui modelagem e, para melhor garantir compatibilidade, todos os resultados foram gerados com a utilização do componente físico. Sua funcionalidade e características foram discutidas no capítulo 3 desta dissertação. O sinal PWM é representado no subsistema pelo símbolo gráfico do pino número 9, alimentado pelo bloco de entrada *Step* que possibilita ao usuário definir o valor do ciclo de trabalho (Duty Cycle) desejado. Uma constante representando os tensionadores mecânicos da estrutura física do perfil de aerofólio e uma constante representando a temperatura ambiente. O valor da força gerada pelos tensionadores mecânicos foi definido pelo método de tentativa e erro durante as simulações.

• Submodelos da LMF

Subgrupo formado pelo modelo de mudança de fase e modelo mecânico, representa a deformação das ligas de memória de forma quando aquecidas por efeito *Joule*, ao acioná-las por corrente elétrica. O modelo da mudança de fase foi definido pelas equações 4.1 e 4.2 que consideram a histerese do material na transformação entre as fases austenítica (fase quente) e martensítica (fase fria). As equações foram modeladas utilizando os valores de temperaturas M_s , M_f , A_s e A_f dispostas no catálogo do fornecedor e apresentadas na tabela

4. O modelo é representado na figura 48. Os blocos de *função 1* e *função 2* representam as equações governantes do modelo. O diagrama do modelo mecânico é definido pela equação 4.3 e representado pela figura 49.

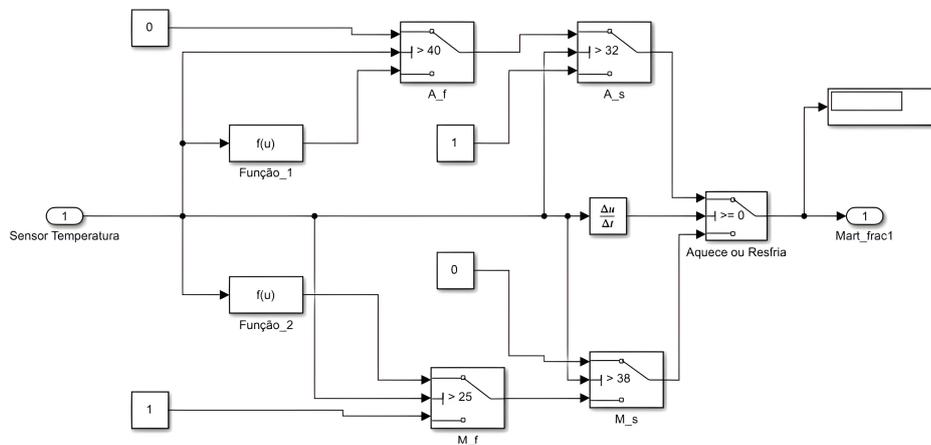


Figura 48 – Diagrama do modelo de mudança de fase criado no *Simulink*®.

Fonte: A autora.

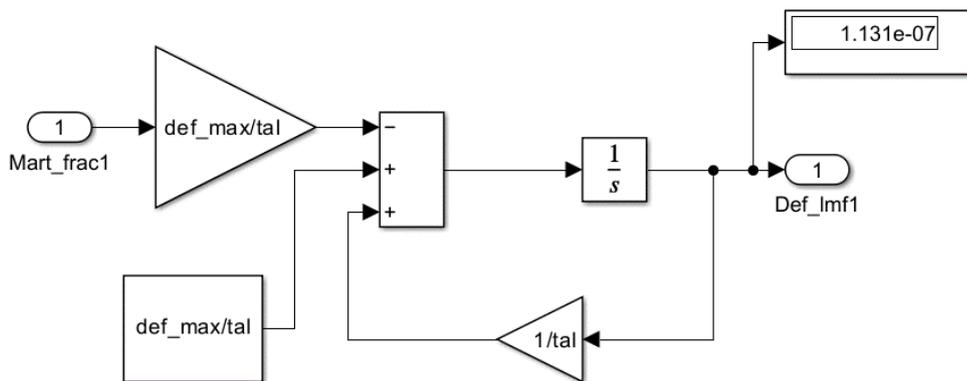


Figura 49 – Diagrama do modelo mecânico criado no *Simulink*®.

Fonte: A autora.

• Saída do Sistema

O subgrupo é representado especialmente pelo sensor de posição utilizado no projeto, o potenciômetro linear, que, no diagrama, é reproduzido pelo símbolo gráfico do pino A1 do *Arduino*®. Para amenizar os efeitos do campo elétrico sobre o sinal emitido pelo componente, o filtro passa-baixa do tipo média móvel exponencial, introduzido ao código de programação na simulação física, também foi modelado. Todos os componentes são representados na figura 50. Para automatizar o processo de variação de geometria do perfil de aerofólio via modelo híbrido, o sistema de controle liga/desliga também foi modelado.

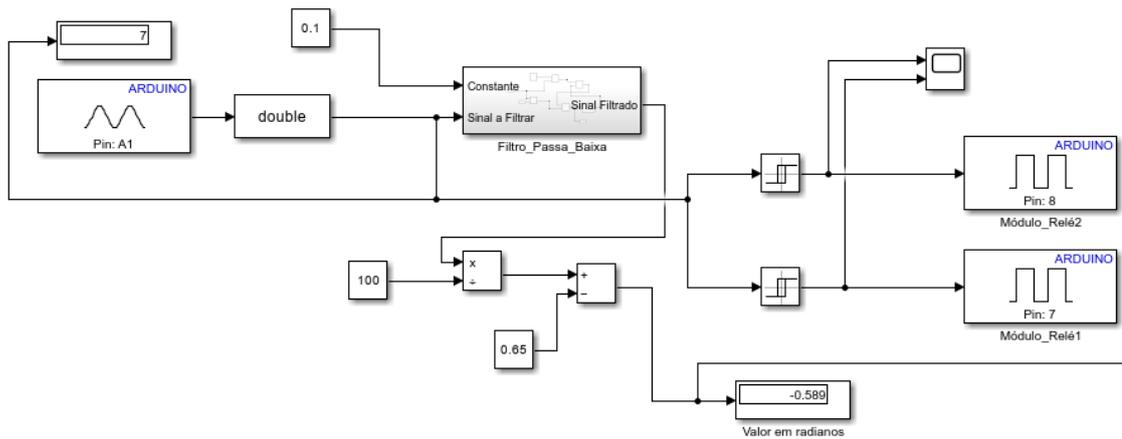


Figura 50 – Diagrama de blocos do sinal de saída criado no *Simulink*®.
Fonte: A autora.

Para melhor compreensão, o filtro passa-baixa para um sinal Y pode ser calculado conforme a equação 5.1. Seu diagrama de blocos está representado na figura 51.

$$S(T) = \begin{cases} Y(0), & t = 0 \\ \alpha Y(t) + (1 - \alpha)S(t - 1), & t > 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

onde:

- o coeficiente α é um fator suavizado entre 0 e 1;
- $Y(t)$ é o valor do sinal a filtrar em um período de tempo t ;
- $S(t)$ é o valor da média móvel exponencial em qualquer período de tempo (t);
- $S(t-1)$ é o valor da média móvel exponencial no período de tempo $t-1$ (passado).

o coeficiente α é um fator suavizado entre 0 e 1;

5.3 Comparação dos Resultados

Para buscar os resultados mais próximos aos da simulação física da plataforma didática-experimental - BRAVUS apresentados na subseção 5.1, os dados de temperatura foram importados ao modelo híbrido para simular a mesma condição de temperatura ambiente e de aquecimento das ligas enquanto o teste era executado, valores representados na figura 52. No entanto, para efeito de comparação de resultados e análise de desempenho da plataforma didática-experimental, somente o deslocamento do bordo de fuga foi investigado nesta etapa.

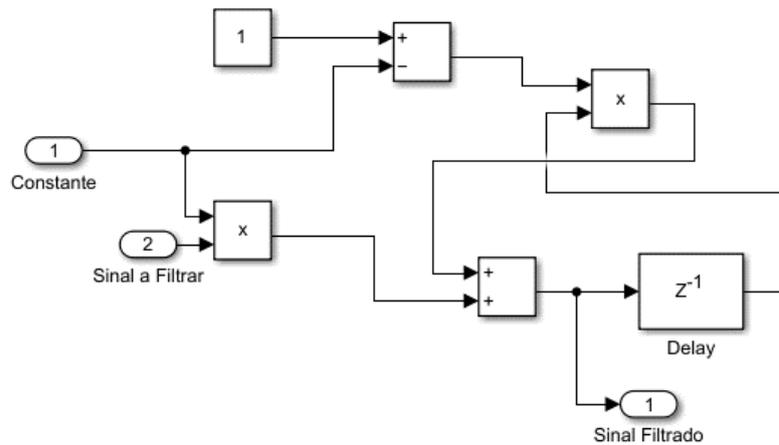


Figura 51 – Diagrama de blocos do filtro passa baixa criado no *Simulink*[®].
Fonte: A autora.

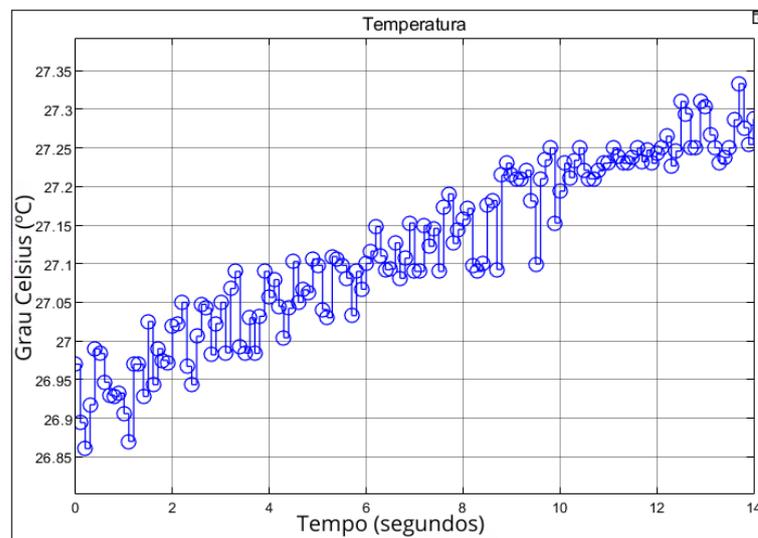


Figura 52 – Valores de temperatura importados ao modelo.
Fonte: A autora.

O MOSFET IRF520N, como principal elemento de acionamento do circuito, atuou na simulação híbrida, recebendo e transmitindo sinais concomitantemente ao processo. Seu módulo, alimentado pela placa *Arduino*[®], produziu uma corrente elétrica de maior capacitância na saída para energizar as LMF e, por efeito, *Joule*, induzir seu aquecimento e deformação. Observou-se coerência nos dados apresentados. Primeiramente, tendo como referência o gráfico de temperatura que apresenta uma tendência de crescimento mesmo no período curto de simulação, podendo ser característico de material de boa condutividade elétrica.

A intermitência do sinal gerado expressa a condição de que os dados de temperatura correspondentes aos valores máximos não ultrapassaram o valor de A_f , mas que, no entanto, foram suficientes para ocasionar uma deformação na liga e provocar variação de geometria no perfil de aerofólio. O gráfico do modelo de transformação de fase é representado na figura

53. Em seguida, a representação gráfica da deformação mecânica na figura 54. O sinal de função exponencial indica a não linearidade do processo de mudança de forma.

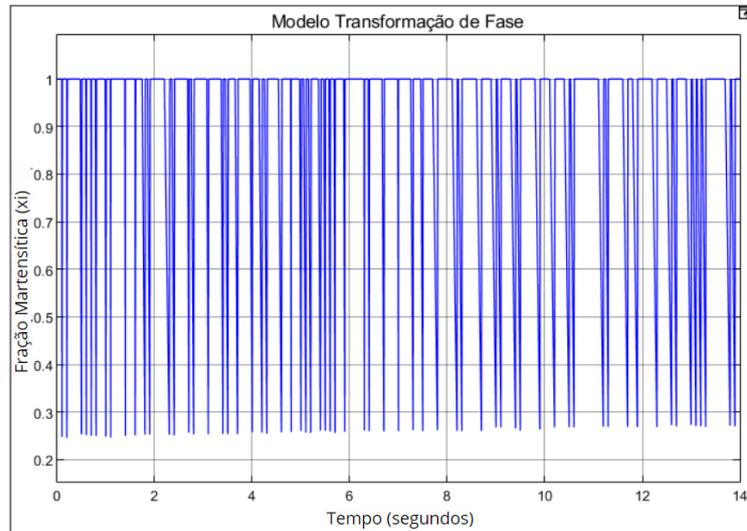


Figura 53 – Gráfico da representação de transformação de fase gerado pelo modelo.
Fonte: A autora.

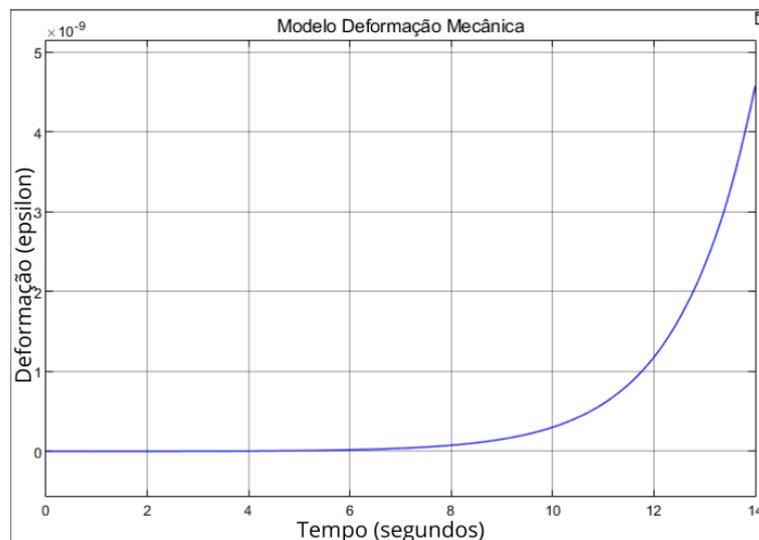


Figura 54 – Gráfico da representação de deformação mecânica dos fios de memória de forma gerado pelo modelo.
Fonte: A autora.

Para concluir, importante etapa para validação do desempenho da plataforma didática-experimental - BRAVUS, executou-se o modelo híbrido construído no ambiente *Simulink*TM, introduzindo a técnica de variação de tensão por equivalência por meio do sinal PWM com ciclo de trabalho em 50% e 75%.

É possível comparar os resultados de deslocamento gerados pela plataforma física e pelo modelo híbrido criado no ambiente Simulink. A figura 55 mostra o deslocamento do bordo de fuga do protótipo de aerofólio quando submetido a um sinal PWM de tensão 5 Volts com ciclo de trabalho de 50%. Como previsto na simulação física e discutida anteriormente,

o protótipo de aerofólio na bancada experimental, quando submetido a essa condição, o deslocamento pretendido e definido nos valores de *set point* não é alcançado. No entanto, quando esse deslocamento é comparado ao deslocamento do aerofólio virtual, gerado pelos modelos de transformação de fase e deformação mecânica, percebe-se a compatibilidade dos movimentos com tempo de atraso de 3,5 segundos aproximadamente. Perfeitamente aceitável quando o sistema está sujeito a perturbações diversas.

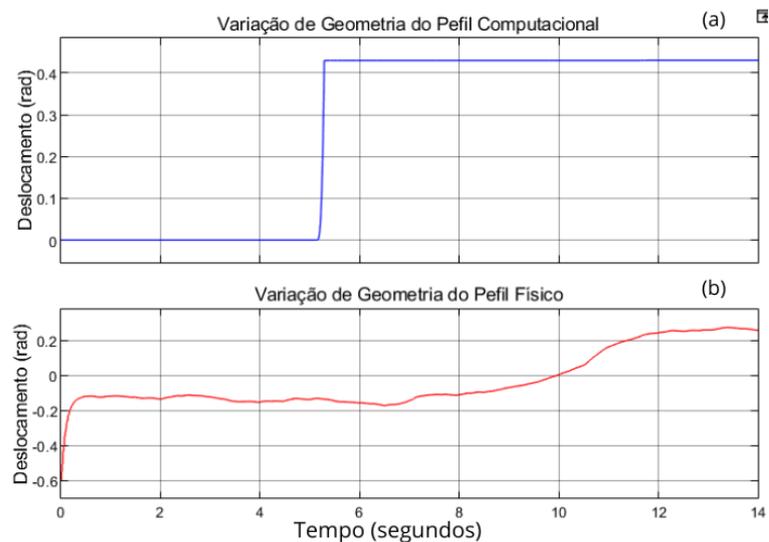


Figura 55 – (a) Deslocamento angular do perfil de aerofólio computacional. (b) Perfil de aerofólio físico. Ambos sujeitos a sinal de tensão PWM de 50%.

Fonte: A autora.

Por fim, o gráfico da figura 56 representa os movimentos de deslocamento angular do protótipo físico do perfil de aerofólio na plataforma didática-experimental e o deslocamento angular gerado pelo modelo computacional quando submetidos ao sinal de tensão PWM de 75%.

É possível também comparar os resultados de deslocamento gerados pela plataforma física e pelo modelo híbrido. O deslocamento do bordo de fuga do protótipo de aerofólio quando submetido a um sinal PWM de tensão 5 Volts com ciclo de trabalho de 75%. Como previsto na simulação física e discutida anteriormente, o protótipo de aerofólio na bancada experimental, quando submetido a essa condição, alcança o deslocamento pretendido. Quando esse deslocamento é comparado ao deslocamento do aerofólio virtual, gerado pelos modelos de transformação de fase e deformação mecânica, percebe-se a compatibilidade dos movimentos com pouco atraso, mesmo com perturbações diversas no modelo físico. A figura 57 representa o modelo computacional após a execução deste último teste.

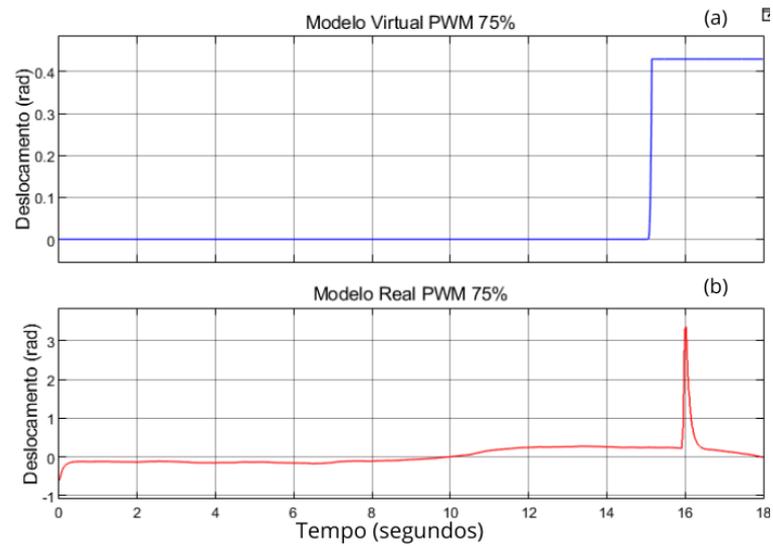


Figura 56 – (a) Deslocamento angular do perfil de aerofólio computacional. (b) Perfil de aerofólio físico. Ambos sujeitos a sinal de tensão PWM de 75%.
Fonte: A autora.

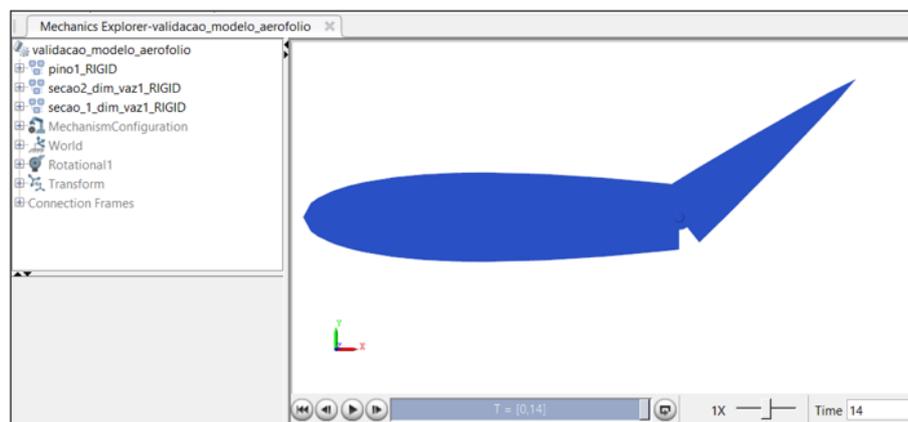


Figura 57 – Perfil de aerofólio de geometria variável em simulação, utilizando *Simulink Multibody*TM.
Fonte: A autora.

6 Discussões e Conclusão

6.0.1 A Bancada Experimental BRAVUS

Esta pesquisa de dissertação teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma bancada experimental de baixo custo, didaticamente utilizada para avaliar e controlar a variação de geometria de um perfil de aerofólio NACA 0015 quando acionado por ligas de memória de forma e ativadas por tensão elétrica controlada, PWM. A motivação por trás desse trabalho estava na necessidade de concentrar esforços na melhoria do processo de ensino e aprendizagem nas escolas que, na maioria das vezes, não possuem laboratórios estruturados para o desenvolvimento de uma pesquisa.

O trabalho foi concretizado por meio de objetivos específicos, dentre os principais, pode-se citar: o projeto e a confecção do protótipo do perfil de aerofólio modelo NACA 0015; a utilização dos fios de memória de forma como atuadores do deslocamento do bordo de fuga do perfil de aerofólio, o gerenciamento de tarefas utilizando uma plataforma *Arduino*[®] UNO, o MOSFET IRF520 como controlador de potência e a integração de sistemas de coleta de dados de custo acessível. A plataforma didática-experimental - BRAVUS pode ser definida como um conjunto de elementos mecânicos, eletroeletrônicos e de integração e aquisição de dados capaz de gerar variação de tensão aplicada e consequente variação de temperatura nas LMF e, conseqüentemente, o deslocamento do bordo de fuga do protótipo de perfil de aerofólio.

Dentre os desafios encontrados ao longo do desenvolvimento do projeto e que poderiam ser contornados, o primeiro deles foi o modelo de junção mecânica entre as duas seções do aerofólio (seção 1 e seção 2, definidas, bordo de ataque e bordo de fuga). A conexão proposta foi selecionada e desenvolvida pelo fato de acomodar com maior facilidade o potenciômetro linear, cuja função foi detectar a variação de posição do bordo de fuga do perfil de aerofólio quando qualquer um dos fios de LMF fossem ativados por corrente elétrica. Além disso, servir de apoio móvel ao bordo de fuga suspenso na plataforma. No entanto, apresentou dificuldades quanto ao excesso de atrito nas suas superfícies de contato, sendo necessário um árduo trabalho para reduzi-lo ao utilizar técnicas de abrasão e lubrificação. A composição do seu material, o PETG, mostrou-se bastante resistente à exposição de temperaturas elevadas, característica de extrema importância já que as ligas de memória de forma estavam em constante contato com a superfície do material.

Os fios de memória de forma do fabricante *NEXMETAL Corporation*, de composição Níquel e Titânio com 1 mm de espessura e transição de fase a temperaturas próximas de 40°C, mostraram-se muito promissores na estimulação de forças mecânicas em dispositivos adjacentes. Além disso, resistentes a vários ciclos de aquecimento e resfriamento, tendo sido

necessário fazer a substituição dos fios apenas uma vez ao longo dos testes de deslocamento do bordo de fuga do perfil de aerofólio, devido à fadiga do material. De fato, pode servir de referência para projetos semelhantes.

O principal componente do sistema eletroeletrônico, o *Arduino*[®] como gerenciador das tarefas, apresentou bom desempenho e durabilidade sob condições de uso adequados. Seu baixo custo de aquisição, com ambiente de desenvolvimento integrado, fácil linguagem de programação e uma gama de tutoriais e bibliotecas disponíveis, identifica um componente indispensável para projetos de baixo custo e nível de maturidade tecnológica em ascensão. Seus 14 pinos de entrada/saída digitais (6 saídas PWM) e 6 entradas analógicas permitem conectar mais periféricos e, assim, existe a possibilidade de incluir mais funções à bancada didática. Importante frisar que pode não ser a única opção viável disponível no mercado.

Como controlador de potência com sinal PWM, o MOSFET IRF520 mostrou-se eficiente. No entanto, precisou ser substituído algumas vezes por não suportar altas temperaturas quando o tempo das simulações de acionamento do perfil de aerofólio fosse mais longo. Essa condição contribuiu para a decisão de adicionar à bancada o *Cooler Sunon mf60120v1*, com a função de potencializar a dissipação de calor do dispositivo.

Por fim, os gráficos de deslocamento do bordo de fuga do perfil de aerofólio que permitiram a análise e a validação da bancada experimental BRAVUS, foram gerados pelo suplemento *Streamer* de Dados da *Microsoft*[®] EXCEL e pelo *Simulink Support Package for Arduino Hardware* da *MathWorks*[®]. A transferência em tempo real dos valores analógicos do potenciômetro linear, posicionado na junta mecânica entre as seções 1 e 2 do protótipo de perfil de aerofólio, comprovou a eficácia das ferramentas em fazer uma integração perfeita entre os sistemas reais e virtuais, além da simplicidade na aquisição dos dados. Tais características tornam-se atrativas para projetos de baixo custo.

6.0.2 Experimentos Sugeridos

De modo geral, os componentes utilizados e os circuitos desenvolvidos apresentaram bom desempenho, podendo ser considerados adequados para o propósito da pesquisa. No entanto, para adaptações futura, recomenda-se projetar e fabricar uma junção mecânica que ofereça menor atrito entre as partes, mas que também atenda às restrições de movimento do bordo de fuga do perfil de aerofólio. E por fim, o sinal de saída transmitido pelo potenciômetro linear de 10 K, definido como sensor de deslocamento para o bordo de fuga, atendeu ao objetivo proposto, mas apresentou deficiências, portanto, recomenda-se a sua substituição por um sensor de maior precisão.

Feito isso, é possível sugerir os seguintes experimentos utilizando a plataforma experimental - BRAVUS:

- Inserir um controle de processo para ajustar os erros da saída e buscar os valores de

set point.

- Programar intervalos maiores de tempo entre os ciclos de deslocamento para o resfriamento das LMF e, assim, estudar seus efeitos.
- Estudar o comportamento das ligas de memória de forma quando submetidas a outros valores de tensão elétrica.
- Implementar um controlador do tipo PID no microcontrolador do *Arduino* e observar seus efeitos no controle do deslocamento do bordo de fuga do perfil aerodinâmico.
- Testar os modelos mediante outras perturbações de cargas externas.
- Substituir o perfil de aerofólio NACA 0015 por outro modelo de perfil aerodinâmico.
- Testar a mudança de geometria para um perfil de aerofólio com maior número de seções.

6.0.3 Aerofólio de Geometria Variável

O contexto adotado para a elaboração do tema dessa bancada experimental teve como foco as abordagens de engenharia e sustentabilidade aplicadas à avaliação de sistemas de energia renovável desenvolvidos no Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília. Dentre os principais estudos, pode-se observar o desenvolvimento de turbinas de eixo horizontal envoltas por difusor, o qual potencializa sua eficiência na geração de energia elétrica, ao assumir variadas formas geométricas. O ponto alto do planejamento e elaboração desse projeto se deu ao fato desse conceito estar alinhado à tendência dos materiais inteligentes assumirem um espaço no desenvolvimento de processos tecnológicos sustentáveis.

A revisão bibliográfica para identificar as iniciativas e experimentos publicados sobre difusores de geometria variável na captação de energia sustentável contribuiu para conhecer os estudos de maior relevância e na identificação dos principais conceitos relacionados ao tema. Sendo assim, a variação de geometria de um perfil de aerofólio NACA, quando acionado por ligas de memória de forma ativadas por tensão elétrica, exigiu-se um prévio conhecimento em transformação de fase das ligas de memória de forma, como podem ser representadas matematicamente em uma modelagem virtual e como poderiam ser utilizadas na mudança de geometria de um aerofólio de turbina horizontal.

Nesse sentido, pode-se concluir que o protótipo de aerofólio adaptativo acionado por fios de memória de forma apresentado mostra-se promissor quando comparado a outros mecanismos que propõem a alteração da linha de arqueamento de perfis aerodinâmicos, uma vez que durante os ensaios experimentais da bancada didática foi possível a alteração do ângulo entre as duas seções do aerofólio. Essa configuração de geometria bipartida foi

competente para implementar uma mudança na linha de arqueamento do perfil, embora outros estudos possam incluir geometrias mais complexas. .

6.0.4 Trabalhos Publicados

Com este trabalho produziram-se os seguintes artigos:

Publicado:

- *Variable Geometry Diffuser for Turbines in Capture and Production of sustainable energy: A Systematic Review*. 26th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM) 2021. doi://10.26678/ABCM.COBEM2021.COB2021-1433

Em processo de publicação:

- *Experimental Teaching Bench For Studying Variable Geometry Airfoil Profile Driven By Shape Memory Alloys*. 12th Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM) 2024. ID CONEM2024-0875

Referências

- ABDELAAL, W. G. A.; NAGIB, G. Modeling and simulation of sma actuator wire. In: IEEE. 2014 9th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES). 2014. P. 401–405. Citado nas pp. 30, 55, 56.
- ABREU, G. L. C. M. de; MAESTA, M. F.; LOPES JUNIOR, V.; DE MARQUI JUNIOR, C.; FARIA, C. T.; INMAN, D. J. Active angular control of a sectioned airfoil using shape memory alloys and fuzzy controller. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Springer, v. 37, n. 5, p. 1555–1567, 2015. Citado na p. 19.
- AGGARWAL, A. **Technical Characteristics of Flexinol, Dynalloy, Inc.** Jun. 2022. [ur-
lhttps://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf](https://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf). Citado na p. 56.
- AMORIM, M. J. Desenvolvimento de bancada didático-experimental de baixo custo para aplicações em controle ativo de vibrações. **Campinas: Universidade Estadual de Campinas**, 2006. Citado nas pp. 34, 35.
- BAGHERI-SADEGHI, N.; HELENBROOK, B. T.; VISSER, K. D. Ducted wind turbine optimization and sensitivity to rotor position. **Wind Energy Science**, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 3, n. 1, p. 221–229, 2018. Citado na p. 18.
- BARBARINO, S.; AMEDURI, S.; LECCE, L.; CONCILIO, A. Wing shape control through an SMA-based device. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 20, n. 3, p. 283–296, 2009. Citado na p. 19.
- BARBOSA, T.; CERQUEIRA, J.; LIMA, A. Shape memory alloy modeling using experimental procedure to estimate the heat exchange coefficient. In: CONGRESSO Nacional de Engenharia Mecânica-CONEM. 2016. Citado na p. 30.
- BARROSO, A. J. S. **Caracterização, modelagem e controle de um atuador de liga de memória de forma.** 2019. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Citado nas pp. 29, 54–56.
- BIL, C.; MASSEY, K.; ABDULLAH, E. J. Wing morphing control with shape memory alloy actuators. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 24, n. 7, p. 879–898, 2013. Citado na p. 19.
- BOYD, J. G.; LAGOUDAS, D. C. A constitutive model for simultaneous transformation and reorientation in shape memory materials. **Mechanics of phase transformations and shape memory alloys**, p. 159–177, 1994. Citado na p. 30.

- BUEHLER, W. J.; WANG, F. E. A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 105–120, 1968. Citado na p. 25.
- CASTILHO, W. S. Contribuição à influência de tratamento criogênico em propriedades térmicas e mecânicas das ligas NiTi austenítica e martensítica com memória de forma, 2017. Citado na p. 25.
- CAVALCANTE, L. M. **Bancada didática para testes e estudos das vibrações em máquinas rotativas acopladas**. 2017. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Citado na p. 35.
- CHANG, L. C.; READ, T. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals—The gold-cadmium beta phase. **Jom**, Springer, v. 3, p. 47–52, 1951. Citado na p. 25.
- COELHO, M.; NETO, J. M.; SPACEK, A. D.; ANDO, O. Learning improvement in electronics disciplinary using a didactic workbench. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 14, n. 1, p. 83–88, 2016. Citado na p. 33.
- DE PAULA SALES, T.; RADE, D. Uma revisão sobre a tecnologia de aeronaves de geometria adaptativa. In: SIMPÓSIO do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2014. P. 4. Citado na p. 19.
- DHANALAKSHMI, K. et al. Shape memory alloy wire for force sensing. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 17, n. 4, p. 967–975, 2016. Citado na p. 30.
- DUERIG, T. W.; MELTON, K.; STÖCKEL, D. **Engineering aspects of shape memory alloys**. Butterworth-heinemann, 2013. Citado na p. 26.
- ELAHINIA, M. H. **Shape memory alloy actuators: design, fabrication, and experimental evaluation**. John Wiley & Sons, 2016. Citado na p. 26.
- EMILIAVACA, A. **Smart Morphing Wing: Um protótipo de asa adaptativa acionada por micromolas de liga de memória de forma**. 2016. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Citado na p. 32.
- FARIA, C. T. d. **Controle da variação do arqueamento de um aerofólio utilizando atuadores de memória de forma**. 2010. Mestrado Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista (Unesp). Citado nas pp. 20, 25, 27, 32.
- FOREMAN, K.; GILBERT, B.; OMAN, R. Diffuser augmentation of wind turbines. **Solar Energy**, Elsevier, v. 20, n. 4, p. 305–311, 1978. Citado na p. 18.
- FOTOVOLTAICA, E. S.; SILVA, L. T. da. Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente. Citado nas pp. 34, 35.
- GANDHI, M. V.; THOMPSON, B. **Smart materials and structures**. Springer Science & Business Media, 1992. Citado na p. 25.

- GRENINGER, A. B.; MOORADIAN, V. G. Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-Ti alloys. **Aime Trans**, v. 128, p. 337–369, 1938. Citado na p. 25.
- GRIGORIE, T. L.; BOTEZ, R. M.; POPOV, A. V.; MAMOU, M.; MÉBARKI, Y. A hybrid fuzzy logic proportional-integral-derivative and conventional on-off controller for morphing wing actuation using shape memory alloy Part 1: Morphing system mechanisms and controller architecture design. **The Aeronautical Journal**, Cambridge University Press, v. 116, n. 1179, p. 433–449, 2012. Citado na p. 19.
- HU, J.-F.; WANG, W.-X. Upgrading a shrouded wind turbine with a self-adaptive flanged diffuser. **Energies**, MDPI, v. 8, n. 6, p. 5319–5337, 2015. Citado na p. 19.
- HUTAPEA, P.; KIM, J.; GUION, A.; HANNA, C.; HEULITT, N. Development of a smart wing. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, Emerald Group Publishing Limited, 2008. Citado na p. 32.
- IGRA, O. Research and development for shrouded wind turbines. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 13–48, 1981. Citado na p. 18.
- IKUTA, K.; TSUKAMOTO, M.; HIROSE, S. Mathematical model and experimental verification of shape memory alloy for designing micro actuator. In: IEEE. [1991] Proceedings. IEEE Micro Electro Mechanical Systems. 1991. P. 103–108. Citado na p. 30.
- IZIDORO, C. L. Desenvolvimento de uma bancada didática para estudo dos efeitos termoe-létricos aplicados na engenharia, 2015. Citado na p. 36.
- JANOCHA, H. et al. **Adaptronics and smart structures**. Springer, 1999. Citado na p. 25.
- JAYENDER, J.; PATEL, R. V.; NIKUMB, S.; OSTOJIC, M. Modeling and control of shape memory alloy actuators. **IEEE transactions on control systems technology**, IEEE, v. 16, n. 2, p. 279–287, 2008. Citado nas pp. 30, 53, 56.
- JOHARI, M. K.; JALIL, M.; SHARIFF, M. F. M. Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). **International Journal of Engineering and Technology**, v. 7, n. 4.13, p. 74–80, 2018. Citado na p. 17.
- JUNIOR, A.; VAN ELS, R.; SALOMON, L. R.; OLIVEIRA, T.; PAULA, A. Turbina Hidrocinética Geração 3. In: IV CONGRESSO. 2005. Citado nas pp. 17, 18.
- KHANDELWAL, A.; BURAVALLA, V. Models for shape memory alloy behavior: an overview of modeling approaches. **The International Journal of Structural Changes in Solids**, v. 1, n. 1, p. 111–148, 2009. Citado na p. 31.
- KIM, S.; CHO, M. A simple smart wing actuator using Ni-Ti SMA. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Springer, v. 24, p. 1865–1873, 2010. Citado na p. 26.

- KO, S.-H.; BAE, J.-S.; RHO, J.-H. Development of a morphing flap using shape memory alloy actuators: the aerodynamic characteristics of a morphing flap. **Smart materials and structures**, IOP Publishing, v. 23, n. 7, p. 074015, 2014. Citado nas pp. 26, 32.
- KURDJUMOV, G.; KHANDROS, L. First reports of the thermoelastic behaviour of the martensitic phase of Au-Cd alloys. **Doklady Akademii Nauk SSSR**, v. 66, n. 1949, p. 211–213, 1949. Citado na p. 25.
- LEO, D. J. **Engineering analysis of smart material systems**. John Wiley & Sons, 2007. Citado na p. 25.
- LIANG, C.; ROGERS, C. The multi-dimensional constitutive relations of shape memory alloys. In: 32ND Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 1991. P. 1165. Citado na p. 30.
- LILLEY, G.; RAINBIRD, W. A preliminary report on the design and performance of ducted windmills. College of Aeronautics, Cranfield, 1956. Citado na p. 17.
- MACHAIRAS, T.; KONTOGIANNIS, A.; KARAKALAS, A.; SOLOMOU, A.; RIZIOTIS, V.; SARAVANOS, D. Robust fluid-structure interaction analysis of an adaptive airfoil using shape memory alloy actuators. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 27, n. 10, p. 105035, 2018. Citado na p. 26.
- MAESTA, M. F. **Controle nebuloso aplicado em asas adaptativas utilizando ligas de memória de forma**. 2012. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp). Citado na p. 20.
- MAESTÁ, M. F. et al. **Controle angular ativo de um aerofólio adaptativo utilizando fios de liga de memória de forma**. 2016. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp). Citado nas pp. 27, 29, 30, 33.
- MUSZYŃSKI, T.; STRZELCZYK, P. Experimental investigation of a variable geometry ducted propeller. **Advances in Science and Technology. Research Journal**, Polish Society of Ecological Engineering (PTIE), v. 7, n. 17, p. 56–61, 2013. Citado na p. 19.
- NASCIMENTO, M.; DE ARAÚJO, C.; DE ALMEIDA, L.; ROCHA NETO, J. da; LIMA, A. A mathematical model for the strain–temperature hysteresis of shape memory alloy actuators. **Materials & Design**, Elsevier, v. 30, n. 3, p. 551–556, 2009. Citado na p. 30.
- NASUTION, A.; PURWANTO, D. W. Optimized curvature interior profile for Diffuser Augmented Wind Turbine (DAWT) to increase its energy-conversion performance. In: IEEE. 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CET). 2011. P. 315–320. Citado na p. 18.
- NUNES, M. M.; MENDES, R. C.; OLIVEIRA, T. F.; JUNIOR, A. C. B. An experimental study on the diffuser-enhanced propeller hydrokinetic turbines. **Renewable energy**, Elsevier, v. 133, p. 840–848, 2019. Citado na p. 18.

- OHYA, Y.; KARASUDANI, T. A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology. **Energies**, Molecular Diversity Preservation International, v. 3, n. 4, p. 634–649, 2010. Citado na p. 18.
- ÖLANDER, A. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. **Journal of the American Chemical Society**, ACS Publications, v. 54, n. 10, p. 3819–3833, 1932. Citado na p. 25.
- OMAN, R.; FOREMAN, K.; GILBERT, B. A progress report on the diffuser augmented wind turbine. In: PROC. 3rd biennial conference and workshop on wind energy conversion systems, Washington, DC, USA. 1975. P. 819–826. Citado na p. 18.
- OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. **Shape memory materials**. Cambridge university press, 1999. Citado nas pp. 25, 26.
- PAI, A.; RIEPOLD, M.; TRACHTLER, A. A model extended temperature and strain controller modulated with PWM for precision position control of shape memory alloy actuators. In: IEEE. 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 2016. P. 442–447. Citado na p. 30.
- PANDINI, M.; SPACEK, A. D.; NETO, J.; ANDO, O. Design of a didactic workbench of industrial automation systems for engineering education. **IEEE Latin america transactions**, IEEE, v. 15, n. 8, p. 1384–1391, 2017. Citado nas pp. 33, 34.
- PARRA, L. A. **Sistema de controle com compensação de tempo morto aplicado à geração de vento em tanque de prova**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado na p. 53.
- PHILLIPS, D.; RICHARDS, P.; FLAY, R. CFD modelling and the development of the diffuser augmented wind turbine. **Wind & structures**, v. 5, n. 2, p. 267–276, 2002. Citado na p. 18.
- QUACKENBUSH, T.; CARPENTER, B.; GOWING, S. Design and testing of a variable geometry ducted propulsor using shape memory alloy actuation. **AIAA paper**, v. 1077, p. 2005, 2005. Citado na p. 18.
- REGUERA, P.; GARCÍA, D.; DOMÍNGUEZ, M.; PRADA, M.; ALONSO, S. A low-cost open source hardware in control education. case study: Arduino-feedback ms-150. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier, v. 48, n. 29, p. 117–122, 2015. Citado na p. 34.
- RODRIGUES, L. E. M. J. Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com aplicações ao projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho. **Salto/SP**, v. 1, 2014. Citado nas pp. 31, 32.
- SANTOS, A. **Concepção e avaliação experimental de aerofólio com variação de arquetipo utilizando molas torcionais com efeito de memória de forma**. 2019. Mestrado Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Citado nas pp. 26, 30, 31.

- SEDRA, A. S; **Smith, KC Microeletrônica**. São Paulo: Pearson, 2007. Citado na p. 45.
- SIAVASH, N. K.; NAJAFI, G.; HASHJIN, T. T.; GHOBADIAN, B.; MAHMOODI, E. An innovative variable shroud for micro wind turbines. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 145, p. 1061–1072, 2020. Citado na p. 19.
- TANAKA, K. Thermomechanical sketch of shape memory effect. **Res Mechanica**, v. 18, p. 251, 1986. Citado na p. 30.
- VELÁZQUEZ, R.; PISSALOUX, E. E. Modelling and temperature control of shape memory alloys with fast electrical heating. **Int. J. Mech. Control**, v. 13, n. 2, p. 1–8, 2012. Citado nas pp. 30, 55.
- XIAOGUANG, L.; DAOHUI, Z.; XINGANG, Z.; HAN, J. Modeling and control of shape memory alloy actuator using feedback linearization. In: IEEE. 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). 2017. P. 1222–1227. Citado nas pp. 30, 56.
- XIMENES, F. S. Design de difusor aerodinâmico compacto para uma turbina eólica de pequena escala, 2018. Citado nas pp. 17, 18.

Anexos

ANEXO A – ANEXOS

A.1 Código de Programação no Ambiente IDE do Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SparkFunMLX90614.h>

#define endereco1 0x27
#define colunas1 16
#define linhas1 2
#define endereco2 0x26
#define colunas2 16
#define linhas2 2
//#define pin_valor_desejado1 A0
//#define pin_valor_desejado2 A2
#define pin_valor_medido A1
#define pin_mosfet 9
#define pin_lmf1 7
#define pin_lmf2 8

IRTherm therm;
LiquidCrystal_I2C lcd1(endereco1, colunas1, linhas1);
LiquidCrystal_I2C lcd2(endereco2, colunas2, linhas2);

unsigned long tempoAnterior = 0;

int valor_medido, mosfet, status_lmf1, status_lmf2;
int valor_desejado1 = 255;
int valor_desejado2 = 0;
float Y = 0.0;
float alpha = 0.5;
float S = Y;
```

```
void Setup() Serial.begin(9600);

//pinMode(pin_valor_desejado1,INPUT);
//pinMode(pin_valor_desejado1,INPUT);
//pinMode(pin_valor_medido,INPUT);
//pinMode(pin_mosfet,OUTPUT);
//pinMode(pin_lmf1,OUTPUT);
//pinMode(pin_lmf2,OUTPUT);
//pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);

Wire.begin();

therm.setUnit(TEMP_C);
if (therm.begin() == false)
Serial.println("Qwiic IR thermometer did not acknowledge");
while(1);

lcd1.init();
lcd2.init();
lcd1.backlight();
lcd2.backlight();
lcd1.clear();
lcd2.clear();

void loop()
lcd1.setCursor(0,0);
lcd2.setCursor(0,0);
lcd1.print("Valor Desejado");
lcd2.print("Valor Medido");
lcd1.setCursor(0,1);
lcd2.setCursor(0,1);

if (valor_medido < 70)
lcd1.print("ARQUEAR");
lcd2.print("NAO ARQUEADO");
```

```
        if(valor_medido > 95) lcd1.print("NAO ARQUEAR");  
        lcd2.print("ESTA ARQUEADO");
```

```
        //valor_desejado1 = (analogRead(pin_valor_desejado1));  
        //valor_desejado2 = (analogRead(pin_valor_desejado2));  
        valor_medido = (analogRead(pin_valor_medido));  
        Y = (float)valor_medido;  
        S = (alpha * Y) + ((1 - alpha) * S);
```

```
        Serial.print("Setpoint_Sup: ");  
        Serial.print(95);  
        Serial.print(", ");
```

```
        Serial.print("Setpoint_Inf: ");  
        Serial.print(70);  
        Serial.print(", ");
```

```
        Serial.print("Geometria_Pefil: ");  
        Serial.print(S);  
        Serial.print(", ");
```

```
        unsigned long tempoAtual = millis();
```

```
        if(tempoAtual - tempoAnterior < 2000)  
        tempoAnterior = millis(); mosfet = map(analogRead(valor_desejado1), 0, 1023, 255, 0);  
        analogWrite(pin_mosfet, mosfet);
```

```
        Serial.print(mosfet);  
        Serial.print(", ");
```

```
        if(valor_medido < 70)  
        status_lm2 = 1; digitalWrite(pin_lm2, status_lm2);
```

```
        if(tempoAtual - tempoAnterior > 15000)  
        tempoAnterior = millis();
```

```
status_lmf1 = 0;  
digitalWrite(pin_lmf1, status_lmf1);
```

```
    if (valor_medido > 95)  
status_lmf1 = 1; digitalWrite(pin_lmf1, status_lmf1);
```

```
    if (tempoAtual - tempoAnterior > 15000)  
tempoAnterior = millis();  
status_lmf2 = 0;  
digitalWrite(pin_lmf2, status_lmf2);
```

```
    if (therm.read() Serial.print(String(therm.object(),2));  
Serial.print(", ");  
Serial.println();  
Serial.println("°");
```

```
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
```