



ESCOLA NAVAL

ta sainte & bief faire



David Manuel Lourenço Hermenegildo

Sistemas de Propulsão num Veículo Submersível: Um estudo comparativo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia
Naval Ramo de Mecânica



Alfeite

2025



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



David Manuel Lourenço Hermenegildo

*Sistemas de Propulsão num Veículo Submersível: Um
estudo comparativo*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo
de Mecânica

Orientação de: Hugo Filipe Diniz Policarpo

Co-orientação de: Pedro Filipe dos Santos Fonseca

Bruno Duarte Damas

O Aluno Mestrando,

O Orientador,

David Hermenegildo

Alfeite
2025

Hugo Policarpo

“We are continually faced by great opportunities brilliantly disguised as insoluble problems.”

Lee Iacocca

Dedico este trabalho ao meu pai, à minha mãe, ao meu avô e à minha avó.

Agradecimentos

A realização deste trabalho representa o culminar do meu percurso na Escola Naval, etapa que não teria sido possível concluir sem o apoio, incentivo e dedicação das pessoas que sempre estiveram ao meu lado, a quem expresso a minha mais sincera gratidão.

Aos meus pais e avós, a quem devo a pessoa em que me tornei, agradeço profundamente pela educação, pelos ensinamentos transmitidos e pelos valores que me guiaram até aqui.

À minha família e aos amigos mais próximos, pela constante presença, apoio e encorajamento nos momentos de maior dificuldade.

À minha namorada, que caminhou comigo nesta etapa, oferecendo sempre o seu carinho, paciência e apoio, ajudando-me a superar os desafios mais exigentes.

Aos meus orientadores, Sr. Professor Hugo Policarpo, CFR EN-MEC Santos Fonseca e Sr. Professor Bruno Damas pelo acompanhamento atento, pelas orientações fornecidas, pelo empenho, pela dedicação e pela disponibilidade demonstrada na resolução dos problemas que surgiram ao longo deste trabalho.

Aos meus camaradas do curso Fernão de Magalhães, pela amizade, companheirismo e entreaajuda partilhados, bem como pelas experiências inesquecíveis vividas durante estes seis anos.

Por fim, à Escola Naval, pela formação de excelência e pelos ensinamentos que contribuíram não só para o meu desenvolvimento académico, mas também para o meu crescimento pessoal.

Resumo

Este trabalho apresenta o estudo, análise e validação de perfis hidrodinâmicos NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) para aplicação no sistema propulsivo biomimético do veículo subaquático autônomo PETINGA dos projetos SABUVIS I & SABUVIS II. A investigação iniciou-se com a simulação numérica de cinco perfis distintos (NACA 2412, NACA 0015, NACA 0014, NACA 0012 e NACA 2408), recorrendo à Dinâmica de Fluidos Computacional (*CFD*, do inglês, *Computational Fluid Dynamics*), com o objetivo de identificar a solução mais eficiente em termos de razão sustentação/arrasto (C_L/C_D) e força de propulsão média (ou *thrust*).

Os resultados das simulações demonstraram que, embora os valores de *thrust* fossem semelhantes, o perfil NACA 0014 destacou-se pela maior eficiência hidrodinâmica, evidenciada pelo valor médio mais elevado de C_L/C_D . De seguida, foi realizada uma análise aprofundada da influência da frequência (0,5–2 Hz) e da amplitude de oscilação (10°–40°), concluindo-se que o movimento de 2 Hz e 40° gera o melhor compromisso entre força propulsiva e eficiência energética.

Para validar os resultados numéricos, foi desenvolvido um aparato experimental com aquisição de dados em tempo real através de um microcontrolador *Arduino*. Os ensaios experimentais, embora não tenham reproduzido os valores absolutos previstos pelas simulações, confirmaram qualitativamente as tendências observadas: maiores frequências e amplitudes potenciam maiores forças propulsivas.

Conclui-se que o perfil NACA 0014 é a solução mais robusta para ser implementada como barbatana oscilatória no PETINGA, assegurando uma conversão eficiente do movimento oscilatório em impulso hidrodinâmico, em consonância com os princípios da propulsão biomimética.

Palavras-chave: Propulsão biomimética, NACA 0014, CFD, Veículos subaquáticos autônomos, SABUVIS

Abstract

This dissertation presents a study, analysis, and validation of NACA hydrodynamic profiles for application in the biomimetic propulsion system of the autonomous underwater vehicle PETINGA of the SABUVIS I & SABUVIS II projects. The research began with the numerical simulation of five distinct profiles (NACA 2412, NACA 0015, NACA 0014, NACA 0012, and NACA 2408), using Computational Fluid Dynamics (*CFD*) with the aim of identifying the most efficient solution in terms of lift-to-drag ratio (C_L/C_D) and average thrust force.

Simulation results revealed that, although thrust values were similar, the NACA 0014 profile clearly stood out due to its higher hydrodynamic efficiency, expressed by the highest C_L/C_D ratio. Subsequently, a detailed analysis of the effects of oscillation frequency (0.5–2 Hz) and amplitude (10°–40°) showed that the motion at 2 Hz and 40° provides the optimal balance between thrust generation and energy efficiency.

To validate the numerical findings, an experimental apparatus was developed with real-time data acquisition through an *Arduino* microcontroller. Although the experimental tests did not fully reproduce the absolute thrust values predicted by CFD, they qualitatively confirmed the numerical trends: higher frequencies and amplitudes lead to greater propulsive forces.

The study concludes that the NACA 0014 profile represents the most suitable solution for integration as an oscillating fin in PETINGA, ensuring an efficient conversion of oscillatory motion into hydrodynamic thrust, fully aligned with the principles of biomimetic propulsion.

Keywords: Biomimetic propulsion, NACA 0014, CFD, Autonomous underwater vehicles, SABUVIS

Índice

1	Introdução	1
1.1	Estado da Arte	1
1.1.1	Introdução aos UUV	1
1.1.2	Autonomous Underwater Vehicle	2
	AUV com Propulsão Convencional	2
	AUV com Propulsão Biomimética	4
1.1.3	Barbatanas biomiméticas	5
	Tipos e funções	6
	Aplicações e estudos anteriores	6
1.2	Motivação	7
1.3	Desafios	8
1.4	Objetivos	9
1.5	Estrutura	9
2	Fundamentos Teóricos	11
2.1	Perfis NACA	11
2.1.1	Características Hidrodinâmicas dos Perfis NACA	12
2.1.2	Relevância dos Perfis NACA para o Design de Barbatanas	13
2.2	Fundamentos da Dinâmica de Fluidos	14
2.2.1	Equações Gerais do Escoamento	14
2.2.2	Tipos de Escoamento	15
2.2.3	Coeficientes, Forças e Momentos Hidrodinâmicos	17
2.2.4	Interação Fluido-Estrutura na Propulsão com Barbatanas Os- cilantes	19
2.3	Conceitos Fundamentais da Simulação <i>CFD</i>	21
2.3.1	Modelos Numéricos e Malhas	21
2.3.2	Modelos de Turbulência	22
2.3.3	Resultados <i>CFD</i>	22
3	Metodologia	25

3.1	Desenvolvimento de competências em <i>CFD</i> e implementação no <i>Ansys Fluent</i>	25
3.2	Seleção dos Perfis NACA e Definição do Modelo Geométrico	26
3.3	Movimento Oscilatório da Barbatana	28
3.3.1	Parâmetros de Oscilação	29
3.4	Simulações no <i>Ansys Fluent</i>	30
3.4.1	Geração da Malha	30
	Dimensões e fundamentação do domínio	31
	Estratégia de discretização	31
3.4.2	Configurações Física e Numérica	32
3.4.3	Malha Dinâmica e <i>UDF</i>	33
3.4.4	Parâmetros de Oscilação	33
3.4.5	Parâmetros Temporais e Convergência	33
3.4.6	Execução das Simulações	34
3.4.7	Seleção do Perfil Ótimo e Análise Paramétrica	34
3.5	Ensaio Experimental	35
	Programação e controlo do sistema.	39
4	Apresentação e Discussão de Resultados	43
4.1	Comparação dos Cinco Perfis NACA	43
4.2	Análise do Movimento Ótimo para o Perfil NACA 0014	46
4.2.1	Comparação Entre os Perfis NACA 0012 e NACA 0014 . . .	48
4.3	Ensaio Experimental do Movimento Ótimo	49
5	Conclusão e Perspetivas de Trabalho Futuro	53
5.1	Conclusões	53
5.2	Perspetivas de Trabalho Futuro	54
	Bibliografia	57
	Apêndices	61
A	Parâmetros de configuração no <i>Ansys Fluent</i>	61
B	<i>UDF</i> Implementadas no <i>Ansys Fluent</i>	69
C	Códigos do Arduino Uno	79
D	Gráficos de <i>Thrust</i> e Velocidade do perfil NACA 0014	81

Lista de Figuras

1.1	Exemplos de diferentes tipos de configuração estrutural de AUV retirados de J. Zhou, Si e Y. Chen 2023.	3
1.2	Vista de um BUV retirado de Szymak 2016	4
1.3	Evolução da configuração do AUV PETINGA com propulsão convencional (a) para um BUV com propulsão biomimética (b).	5
1.4	Hidrofólio com trajetória em "8" retirado de Costa Godinho 2014 . .	6
1.5	Veículo U-CAT retirado de Salumäe, Raag, Rebane, Ernits, Toming, Ratas e Kruusmaa 2014	7
1.6	Veículo "Ghost Swimmer" retirado de Golson 2014	8
2.1	Escoamento sobre o perfil NACA 4412. Adaptado de Donini 2014. .	13
2.2	Variáveis principais que atuam sobre uma barbatana submersa. Adaptado de Konno, Furuya, Mizuno, Hishinuma, Hirata e Kawada 2006.	18
3.1	Configuração geométrica do domínio e zona de refinamento local (imagens ilustrativas geradas no pré-processamento).	31
3.2	Configurações do hidrofólio no aparato experimental.	37
3.3	Servomotor digital à prova de água (MS-617).	38
3.4	Soldaduras realizadas no módulo HX711.	38
3.5	Ligação do sistema ao computador para programação e aquisição de dados.	40
3.6	Vista geral dos dois microcontroladores <i>Arduino Uno</i> e ligações elétricas.	41
4.1	Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e $thrust$ (dir.) para o perfil NACA 2412.	44
4.2	Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e $thrust$ (dir.) para o perfil NACA 0015.	44
4.3	Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e $thrust$ (dir.) para o perfil NACA 0014.	45
4.4	Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e $thrust$ (dir.) para o perfil NACA 0012.	45

4.5	Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e <i>thrust</i> (dir.) para o perfil NACA 2408.	46
4.6	Campo de velocidades em torno do perfil NACA 0012 durante movimento oscilatório (2 Hz, $\pm 30^\circ$).	49
4.7	Campo de velocidades em torno do perfil NACA 0014 durante movimento oscilatório (2 Hz, $\pm 30^\circ$).	49
4.8	Registo experimental da evolução temporal do <i>thrust</i> para o movimento de 2 Hz e 40° (Ensaio 1).	50
4.9	Registo experimental da evolução temporal do <i>thrust</i> para o movimento de 2 Hz e 40° (Ensaio 2).	50
4.10	Registo experimental da evolução temporal do <i>thrust</i> para o movimento de 2 Hz e 40° (Ensaio 3).	51
A.1	<i>Fluent Launcher</i> (precisão dupla, leitura de malha após carregamento).	62
A.2	Definições gerais do solver: <i>Pressure-Based</i> , transiente, 2D <i>planar</i> , formulação absoluta.	62
A.3	Controlos de solução.	63
A.4	Métodos numéricos: acoplamento $p-U$, esquemas de discretização e formulação transiente.	64
A.5	Inicialização da solução: <i>Hybrid Initialization</i>	65
A.6	<i>Run Calculation</i> : parâmetros de avanço temporal e iterações por passo.	65
A.7	Condição de fronteira: <i>Velocity Inlet</i> (intensidade de turbulência 5%, razão de viscosidades 10).	66
A.8	Condição de fronteira: <i>Pressure Outlet</i> (pressão de referência 0 Pa; parâmetros de turbulência).	66
A.9	Condição de fronteira: <i>Walls</i> (parede estacionária, <i>no-slip</i> , rugosidade padrão).	67
D.1	Resultados para $f = 0,5$ Hz e $\theta = 10^\circ$	81
D.2	Resultados para $f = 0,5$ Hz e $\theta = 20^\circ$	81
D.3	Resultados para $f = 0,5$ Hz e $\theta = 30^\circ$	82
D.4	Resultados para $f = 0,5$ Hz e $\theta = 40^\circ$	82
D.5	Resultados para $f = 1$ Hz e $\theta = 10^\circ$	82
D.6	Resultados para $f = 1$ Hz e $\theta = 20^\circ$	83
D.7	Resultados para $f = 1$ Hz e $\theta = 30^\circ$	83
D.8	Resultados para $f = 1$ Hz e $\theta = 40^\circ$	83
D.9	Resultados para $f = 1,5$ Hz e $\theta = 10^\circ$	84
D.10	Resultados para $f = 1,5$ Hz e $\theta = 20^\circ$	84

D.11 Resultados para $f = 1,5$ Hz e $\theta = 30^\circ$	84
D.12 Resultados para $f = 1,5$ Hz e $\theta = 40^\circ$	85
D.13 Resultados para $f = 2$ Hz e $\theta = 10^\circ$	85
D.14 Resultados para $f = 2$ Hz e $\theta = 20^\circ$	85
D.15 Resultados para $f = 2$ Hz e $\theta = 30^\circ$	86
D.16 Resultados para $f = 2$ Hz e $\theta = 40^\circ$	86

Lista de Tabelas

4.1	Valores médios da razão C_L/C_D e da força de propulsão para os perfis NACA simulados.	43
4.2	Valores médios de <i>thrust</i> e velocidade para o perfil NACA 0014 em diferentes condições de frequência e amplitude.	47
4.3	Comparação do <i>thrust</i> médio dos perfis NACA 0012 e NACA 0014 para diferentes movimentos.	48
A.1	Resumo das principais definições utilizadas nas simulações no <i>ANSYS Fluent</i>	61

Lista de Equações

2.1	Equação da conservação da massa	15
2.2	Equação da conservação da quantidade de movimento	15
2.3	Equação da conservação da energia	15
2.4	Número de Reynolds	16
2.5	Número de Strouhal	17
2.6	Força de sustentação (Lift)	18
2.7	Força de arrasto (Drag)	18
2.8	Momento hidrodinâmico	18
2.9	Impulso total	19
2.10	Binário	19
2.11	Força total exercida pelo fluido sobre a superfície	20
3.1	Movimento oscilatório	28
3.2	Velocidade angular	29

Lista de Abreviaturas

AUV	A utonomous U nderwater V ehicle
BUV	B io-inspired U nderwater V ehicle
C_D	C oefficient of D rag
C_L	C oefficient of L ift
CFD	C omputational F luid D ynamics
D	D rag
FVM	F inite V olume M ethod
FSI	F luid– S tructure I nteraction
L	L ift
LES	L arge E ddy S imulation
NACA	N ational A dvisory C ommittee for A eronautics
PIV	P article I mage V elocimetry
PLA	P olylactic A cid
ROV	R emotely O perated V ehicle
SABUVIS	S warm of B iomimetic U nderwater V ehicles
SST	S hear S tress T ransport
UDF	U ser D efined F unction
UUV	U nmanned U nderwater V ehicle

Lista de Símbolos

A	Amplitude máxima <i>peak-to-peak</i> do movimento lateral [m]
c	Corda do perfil [m]
C_D	Coefficiente adimensional de arrasto [-]
C_L	Coefficiente adimensional de sustentação [-]
C_M	Coefficiente adimensional de momento [-]
D	Força de arrasto [N]
e_0	Energia total por unidade de massa [J/kg]
f	Frequência de oscilação [Hz]
L	Força de sustentação [N]
M	Momento [$N \cdot m$]
p	Pressão local [Pa]
R_0	Posição da raiz da barbatana [m]
R_t	Posição da ponta da barbatana [m]
Re	Número de Reynolds [-]
S	Área de referência da barbatana [m^2]
St	Número de Strouhal [-]
T	Tensor das tensões [Pa]
T_q	Binário (torque) [$N \cdot m$]
Th	Impulso total [N]
t	Tempo [s]
U	Velocidade característica ou de avanço [m/s]
$V(r)$	Velocidade local em função da posição radial [m/s]
$\vec{b}$	Forças de corpo por unidade de volume [N/m^3]
$\vec{F}$	Força total exercida pelo fluido [N]
$\vec{n}$	Vetor normal à superfície [-]
$\vec{\tau}$	Vetor das tensões tangenciais [Pa]
$\vec{V}$	Vetor velocidade do escoamento [m/s]
α	Ângulo de ataque [rad ou °]
γ	Ângulo de incidência do escoamento local [rad ou °]
$\dot{m}$	Taxa de variação da massa do fluido
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [$Pa \cdot s$]

ρ	Densidade do fluido [kg/m^3]
$\dot{q}$	Taxa volumétrica de geração/absorção de energia [W/m^3]
$\dot{q}_c$	Fluxo de calor por condução [W/m^3]
$\dot{q}_r$	Fluxo de calor por radiação [W/m^3]
$\theta(t)$	Ângulo instantâneo da barbatana [rad]
$\theta_{\max}$	Amplitude angular máxima [rad]
$\dot{\theta}(t)$	Velocidade angular instantânea [rad/s]

Capítulo 1

Introdução

Com a forte evolução da indústria de veículos não tripulados e os avanços tecnológicos que hoje testemunhamos, podemos afirmar que estamos perante uma nova “Era” onde os veículos submersíveis não são indiferentes. Devido à sua versatilidade e autonomia, conseguem desempenhar funções desde a superfície (assim como ações de vigilância e tráfego marítimo) até à exploração do fundo dos Oceanos, a largos metros de profundidade (António 2022).

A principal razão para o desenvolvimento do Veículo Não-tripulado de Subsuperfície (UUV, do inglês *Unmanned Underwater Vehicle*) é que há muitos benefícios militares a serem obtidos, devido à maior dificuldade em ser detetado por parte dos inimigos e de apresentar menores sinais acústicos e magnéticos. Além disso, este veículo pode ser enviado para cumprir missões de cariz mais hostil e perigosas sem ter presente o receio de perder vidas humanas (Budiyo 2009).

Para que este veículo seja eficiente e tenha autonomia suficiente para o cumprimento das suas missões, tem vindo a ser alvo de estudo por parte de diversos investigadores e especialistas nesta temática, com o intuito de desenvolverem modelos matemáticos que auxiliem a otimização do submersível, programas de simulação para a obtenção de dados provenientes de um ensaio e tentativamente, procederem à concretização do projeto (António 2022).

1.1 Estado da Arte

1.1.1 Introdução aos UUV

Nas últimas décadas, tem-se vindo a intensificar o interesse, por parte de civis e militares, no design, desenvolvimento e testes de veículos subaquáticos não tripulados. Foram produzidos vários tipos de veículos com o acompanhamento de

abordagens inovadoras afim de melhorar o desempenho de UUV. Esses avanços tecnológicos, incluem células de combustível, comunicação subaquática, fusão de sensores e otimização das baterias (Budiyo 2009).

Os UUV, são todo o tipo de veículos autónomos subaquáticos que são operados com o mínimo ou sem intervenção de um operador humano. Estes veículos dividem-se essencialmente em dois tipos, os ROV (Remotely Operated Vehicle) e os AUV (Autonomous Underwater Vehicle). O ROV é um veículo operado remotamente e tem sido implementado principalmente para tarefas de instalação, inspeção e reparação de sistemas subaquáticos. Possui grandes vantagens em relação ao ser humano, uma vez que consegue praticar maiores profundidades e tem maior resistência. Este tipo de veículos pode estabelecer comunicações com um operador que esteja por exemplo num porto ou numa embarcação, por meio de um cabo ou link acústico. O AUV, é um veículo subaquático autónomo e difere do ROV pelo facto de ser mais independente de um operador, ou seja, não necessita de estabelecer constantemente uma ligação à estação de comando e controlo (Budiyo 2009).

1.1.2 Autonomous Underwater Vehicle

Os AUV, começaram a ser desenvolvidos na década de 1950 pela Universidade de Washington. Com o desenvolvimento da tecnologia de computadores e a crescente maturidade da tecnologia eletrónica, no final da década de 1990, o desenvolvimento dos AUV entrou num estágio de rápido aperfeiçoamento. Dada a sua versatilidade, os AUV têm vindo a ser alvos de estudos e investigações, possibilitando o seu avanço, entrando numa nova Era de desenvolvimento a partir do início do século XXI (J. Zhou, Si e Y. Chen 2023).

Dentro do panorama dos AUV, é possível verificar que alguns possuem um hélice como sistema de propulsão (propulsão convencional) e outros apresentam um agente propulsor inspirado em animais marinhos (propulsão biomimética).

AUV com Propulsão Convencional

Os AUV tradicionais apresentam um formato de torpedo e um hélice que o possibilita deslocar-se. O projeto e o desenvolvimento de AUV contempla três pontos-chave: a estrutura do corpo principal adaptada ao veículo, o desempenho de movimento ágil que se adapta a ambientes subaquáticos complexos e a tecnologia de comunicação e posicionamento acústico subaquático. Os AUV tradicionais em forma de torpedo são principalmente sistemas subacionados com forte não-linearidade e acoplamento num sistema de controlo. Quando o AUV é exposto ao ambiente do

fundo do mar, considerando a complexidade da ação do fluido do fundo do mar e a incerteza dos parâmetros do modelo, o controle do AUV torna-se mais desafiante. Com o desenvolvimento da tecnologia subaquática e a expansão dos cenários de aplicação, o AUV surgiu apresentando várias formas estruturais (J. Zhou, Si e Y. Chen 2023).

Embora o formato de torpedo seja o mais comum devido à sua eficiência hidrodinâmica e simplicidade construtiva, existem também AUV com geometrias alternativas, adaptadas a missões específicas. A Figura 1.1 apresenta exemplos retirados de J. Zhou, Si e Y. Chen 2023, onde se observa que a configuração estrutural pode variar significativamente:

- **Formato circular/disco** — utilizado em veículos de inspeção de curta distância ou manobras em espaços confinados, oferecendo elevada estabilidade e possibilidade de rotação no próprio eixo.
- **Configuração tipo catamarã** — composta por dois flutuadores paralelos ligados por uma estrutura central, ideal para operações de superfície e transição para mergulho.
- **Casco alongado multi-módulo** — semelhante ao torpedo, mas segmentado em módulos que podem ser reconfigurados para diferentes cargas e sensores.
- **Estruturas compactas de baixa assinatura** — projetadas para missões discretas em águas rasas, reduzindo o arrasto e o ruído.

Estas variações mostram que, mesmo dentro da categoria de AUV com propulsão convencional (normalmente à base de hélices), a geometria global pode ser adaptada de acordo com requisitos de manobrabilidade, autonomia, capacidade de carga ou tipo de missão.

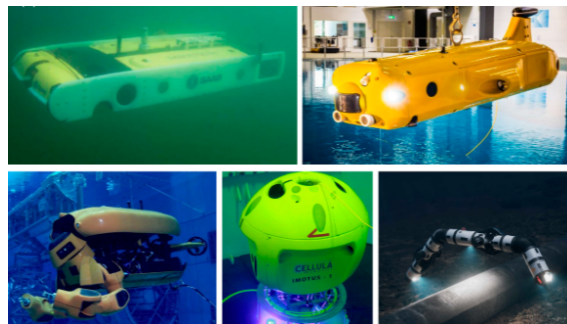


FIGURA 1.1: Exemplos de diferentes tipos de configuração estrutural de AUV retirados de J. Zhou, Si e Y. Chen 2023.

AUV com Propulsão Biomimética

A propulsão biomimética deriva de percepções da natureza na ciência e na engenharia. A biomimética, especificamente para veículos subaquáticos, estuda as formas e comportamentos eficientes de criaturas aquáticas como peixes, golfinhos e baleias, levando a projetos inovadores de veículos subaquáticos com velocidade, impulso, manobrabilidade e arrasto reduzido. Enquanto isso, a bioinspiração, adotando uma perspectiva mais ampla, procura inspiração abstrata na natureza, influenciando diversos campos. Aplica os princípios da natureza para promover a inovação, indo além da replicação direta dos sistemas naturais (Z. Zhang, Q. Wang e S. Zhang 2024).

A utilização de hélices tradicionais como atuadores para robôs nadadores pode causar danos consideráveis ao meio ambiente. O movimento de rotação das hélices pode ferir ou matar os peixes devido ao impacto ou a alterações de pressão e produz ruído que pode assustar os peixes e forçá-los a retirarem-se do seu habitat natural. As observações mostram que um peixe num ambiente natural pode atingir uma grande eficiência propulsiva, uma excelente manobrabilidade e um baixo desempenho em termos de ruído através do movimento coordenado do seu corpo, barbatanas e cauda. Estas vantagens podem apresentar grandes benefícios para aplicações nas áreas de operação subaquática, desenvolvimento oceânico, investigação oceânica e proteção ambiental.

Uma vez que os peixes são nadadores inatos, parece ser razoável copiar um elemento propulsivo sob a forma de barbatana caudal para o movimento dos robôs nadadores, como ilustrado na Figura 1.2, que apresenta a vista de um Biomimetic Underwater Vehicle (BUV). Por esta razão, nos últimos anos, tem existido um acrescido interesse na literatura sobre peixes robóticos biomiméticos (Apalkov, Fernández, Fontaine, Akinfiev e Armada 2012).

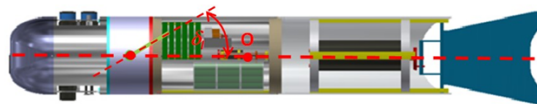


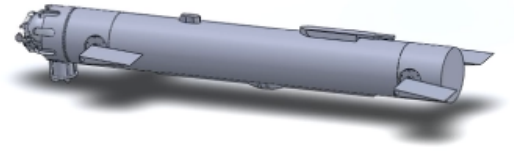
FIGURA 1.2: Vista de um BUV retirado de Szymak 2016

Assim, o AUV com propulsão biomimética, devido a uma assinatura acústica semelhante aos peixes, é mais difícil de ser detetado, fazendo dele um veículo premiado com algum grau de furtividade.

Tanto no projeto SABUVIS I (2015–2018) como na configuração inicial do SABUVIS II (2023–2026), o veículo PETINGA apresentava duas barbatanas peitorais e uma barbatana caudal (contract No B-746-ESM1-GP). No início do presente trabalho, foi decidido substituir a barbatana caudal e duas peitorais por quatro barbatanas oscilantes — duas a vante e duas a ré — inspiradas no movimento das tartarugas marinhas, com o objetivo de aumentar a manobrabilidade a baixas velocidades e reduzir a assinatura acústica, como ilustrado na Figura 1.3.



(a) PETINGA, com hélice (propulsão convencional).



(b) Configuração modificada do PETINGA (SolidWorks), com quatro barbatanas oscilantes (propulsão biomimética).

FIGURA 1.3: Evolução da configuração do AUV PETINGA com propulsão convencional (a) para um BUV com propulsão biomimética (b).

1.1.3 Barbatanas biomiméticas

O veículo PETINGA do SABUVIS II, irá dispor de quatro barbatanas (como já mencionado anteriormente) e, por este motivo, o seu sistema de propulsão será fortemente inspirado nas tartarugas.

A escolha deste tipo de propulsão foi motivada pela necessidade de obter alta manobrabilidade a baixas velocidades e menor assinatura acústica, características já reconhecidas em estudos anteriores sobre veículos com barbatanas oscilantes (Apalkov, Fernández, Fontaine, Akinfiev e Armada 2012; Z. Zhang, Q. Wang e S. Zhang 2024; J. Zhou, Si e Y. Chen 2023). Os hélices, embora eficientes a altas velocidades, geram turbulência, ruído hidrodinâmico e risco de danos à fauna marinha, enquanto as barbatanas permitem um movimento mais silencioso e eficiente para operações de inspeção e monitorização.

Tipos e funções

Existem três grupos de agentes propulsores neste caso em específico: hidrofólios, palmípedes e barbatanas oscilantes.

As barbatanas anteriores, nas tartarugas marinhas, são designadas de hidrofólios se possuírem dois graus de liberdade e apresentarem uma trajetória em "8", como ilustrado na Figura 1.4. As palmípedes têm um papel secundário na propulsão, servindo para auxiliar no direcionamento. As barbatanas oscilantes, irão ter uma oscilação repetida com uma certa amplitude e frequência de movimento, gerando propulsão (Costa Godinho 2014).

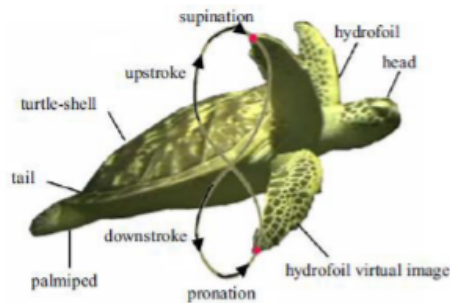


FIGURA 1.4: Hidrofólio com trajetória em "8" retirado de Costa Godinho 2014

Aplicações e estudos anteriores

O veículo U-CAT ilustrado na Figura 1.5, tem como principal objetivo auxiliar os arqueólogos na exploração de naufrágios. Utiliza um sistema de propulsão constituído por quatro barbatanas oscilantes, inspirado na locomoção de animais aquáticos (tartarugas), permitindo-lhe elevada manobrabilidade. Para além de reduzir a suspensão de sedimentos, a propulsão com barbatanas proporciona uma movimentação muito mais silenciosa em comparação com hélices, permitindo que haja uma melhor captura de vídeo e uma preservação do ambiente ao redor do veículo (Salumäe, Raag, Rebane, Ernits, Toming, Ratas e Kruusmaa 2014).

No trabalho Yao et al. 2013, foi desenvolvido um veículo subaquático bioinspirado com morfologia semelhante à de uma tartaruga marinha, onde utiliza quatro barbatanas oscilantes (à semelhança do veículo U-CAT referido anteriormente). Entre outros aspetos, apresenta a capacidade de navegação e aquisição de dados em ambiente real, como foi possível comprovar durante a 29.^a expedição chinesa à Antártida.



FIGURA 1.5: Veículo U-CAT retirado de Salumäe, Raag, Rebane, Ernits, Toming, Ratas e Kruusmaa 2014

1.2 Motivação

Os UUV, são cada vez mais utilizados para a exploração do meio sub-marino numa vertente mais recreativa (aplicação civil), mas também são bastante requisitados para fins militares. Apesar destes veículos apresentarem inúmeras vantagens, nomeadamente a salvaguarda da vida humana, verificou-se que a utilização de sistemas de propulsão convencionais (com hélices), nalgumas situações têm um desempenho insuficiente correspondente à sua manobrabilidade reduzida, quando se praticam baixas velocidades. Para minimizar esta lacuna mantendo a eficiência energética, os estudos e modelos experimentais que visam a otimização do modo de locomoção dos peixes, deram origem aos veículos autónomos biomiméticos (António 2022). Estes BUV são projetados para se assemelharem a animais tais como peixes e mamíferos. Nos últimos anos, têm sido criados vários designs de veículos submersíveis, que apresentam uma aparência e modo de locomoção bastante idêntico a seres marinhos, nomeadamente aos peixes.

A Marinha dos Estados Unidos da América, como ilustrado na Figura 1.6, possui um veículo subaquático biomimético que se denomina "Ghost Swimmer", precisamente por exibir uma propulsão mais silenciosa e eficiente em termos energéticos do que um sistema de propulsão tradicional com hélices (Szymak 2016). Os BUV, pela sua capacidade de atingir um baixo espectro hidroacústico e elevada eficiência energética em comparação com os AUV de hélices rotativos convencionais, tornaram-se populares nos últimos tempos, sendo atualmente alvo de estudos por parte de vários países (Piskur, Szymak, Kitowski e Flis 2020).

Logo, esta dissertação de mestrado insere-se no âmbito do trabalho a desenvolver no projeto do SABUVIS II (que consiste em desenvolver um veículo submarino biomimético heterogéneo, com duas barbatanas a vante e duas barbatanas a ré), procedendo-se aqui ao desenvolvimento preliminar de uma barbatana funcional.



FIGURA 1.6: Veículo "Ghost Swimmer" retirado de Golson 2014

1.3 Desafios

A característica principal que difere um veículo biomimético submersível de um AUV convencional, é o seu sistema de propulsão. Dispondo de uma barbatana como agente responsável pela sua deslocação, o BUV apresenta aspeto e forma de locomoção biologicamente inspirados, neste caso semelhante a peixes.

Um dos desafios principais, prende-se com o facto de ser necessário compreender as limitações da natureza. Para se desenvolver um sistema de propulsão inspirado em animais marinhos, há a necessidade de uma análise cuidada ao comportamento dos peixes e de seguida proceder a uma simulação. No entanto, os resultados da simulação podem não estar de acordo com o comportamento real devido aos desafios em simular fatores naturais complexos, como por exemplo as propriedades fisiológicas e a influência ambiental no comportamento dos peixes (Z. Zhang, Q. Wang e S. Zhang 2024).

Como, nos dias de hoje, há uma variedade enorme de artigos científicos sobre os veículos biomiméticos, por vezes não é acessível recolher e afunilar toda a informação de forma a ir, eficientemente, ao encontro dos objetivos que se pretendem alcançar.

Assim, após delimitar a geometria, dimensões e material da barbatana, será necessário a utilização de um *software* específico que permita modelar este sistema de propulsão e simular o seu comportamento para, posteriormente, ser efetuada a recolha e tratamento de dados.

Depois dos estudos em *software* deste sistema de propulsão biomimético, vai iniciar-se o seu desenvolvimento (caso os resultados da simulação correspondam ao pretendido), onde serão necessários meios e materiais para a sua construção e por isso, poderão existir alguns constrangimentos quer a nível financeiro ou até mesmo em encontrar os materiais com as características desejadas.

Em todo o caso, irão ser feitos os possíveis para superar estes desafios, de modo a que esta dissertação contribua de forma positiva para o projeto SABUVIS II.

1.4 Objetivos

No âmbito do projeto SABUVIS II e, tendo em conta todas as premissas apresentadas anteriormente, pretende-se contribuir para o desenvolvimento do PETINGA, sendo o sistema de propulsão o principal objeto de estudo.

O objetivo desta dissertação de mestrado prende-se em desenvolver um estudo preliminar de uma barbatana com base em simulações de *CFD* e, posteriormente, testada experimentalmente em ambiente controlado. Para este sistema de propulsão, podem ainda ser considerados diferentes parâmetros como os tipos de materiais e as dimensões do engenho propulsor.

Tratando-se também de um trabalho experimental, pretende-se desenvolver e implementar um sistema que permita aferir as eficiências, em função dos diferentes parâmetros, de forma a propor uma solução mais eficiente.

1.5 Estrutura

Neste capítulo introdutório procedeu-se a uma breve apresentação do projeto, abordando-se conceitos fundamentais que vão desde UUV até às barbatanas biomiméticas, as quais podem ser aplicadas como sistemas propulsivos em AUV.

Expôs-se igualmente a motivação que esteve na base do desenvolvimento deste trabalho, identificaram-se os principais desafios que se perspetivam ao longo da investigação e definiram-se os objetivos a alcançar. Para além desta componente inicial de enquadramento, a dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

Capítulo 2, Fundamentos Teóricos, é realizada uma revisão da literatura, onde se aborda o enquadramento teórico e científico relativo à propulsão biomimética, aos perfis hidrodinâmicos NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), às metodologias numéricas e experimentais aplicadas em estudos semelhantes. Este capítulo permite consolidar os fundamentos necessários para o desenvolvimento do trabalho e identificar lacunas de investigação que justificam a sua realização.

Capítulo 3, Metodologia, descreve a metodologia adotada, apresentando detalhadamente as ferramentas computacionais e experimentais utilizadas. São discutidos os parâmetros implementados no *ANSYS Fluent*, as *UDF* (User Defined Function) desenvolvidas em C++, bem como o aparato experimental concebido, incluindo a instrumentação, o sistema de aquisição baseado em *Arduino* e os procedimentos experimentais aplicados.

Capítulo 4, Apresentação e Discussão de Resultados, procede-se à apresentação e discussão dos resultados. Primeiramente, são comparados os diferentes resultados dos perfis NACA simulados, identificando-se o perfil mais promissor para aplicação no PETINGA. Seguidamente, analisa-se a influência dos diferentes movimentos oscilatórios no desempenho hidrodinâmico, com especial enfoque no perfil NACA 0014. É também efetuada uma comparação entre os resultados obtidos por simulação computacional e os obtidos experimentalmente, discutindo-se as convergências e divergências observadas.

Capítulo 5, Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro, apresenta as conclusões gerais do trabalho, sintetizando os principais contributos alcançados e confirmando a adequação do perfil NACA 0014 para a propulsão por barbatana oscilatória no PETINGA. São igualmente indicadas perspetivas de trabalhos futuros, que incluem o aperfeiçoamento da metodologia experimental, a exploração de novos perfis e geometrias, bem como a validação em protótipos de maior escala.

Por fim, a dissertação inclui ainda um conjunto de apêndices, onde se apresentam os parâmetros implementados nas simulações, os códigos desenvolvidos e os registos gráficos complementares, de modo a garantir a reprodutibilidade e transparência do trabalho realizado.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Perfis NACA

As primeiras séries de perfis aerodinâmicos desenvolvidas pela NACA, nomeadamente as séries de quatro e cinco dígitos, bem como as suas versões modificadas, basearam-se inicialmente em equações analíticas. Estas equações descreviam geometricamente a curvatura da linha média (linha central geométrica) e a distribuição de espessura ao longo do comprimento do perfil. Posteriormente, surgiram séries mais complexas, como as de seis, sete e oito dígitos, que recorreram a métodos teóricos, focados na especificação detalhada da distribuição de pressão desejada (Cantwell 2008).

Historicamente, o desenvolvimento destes perfis era empírico e arbitrário, apoiando-se principalmente em experiências anteriores com geometrias já conhecidas e em ensaios experimentais que implicavam pequenas modificações. Contudo, a publicação de relatórios técnicos pela NACA no início da década de 1930 levou à introdução de uma metodologia sistemática baseada em formulações matemáticas. Este avanço permitiu a criação de famílias completas de perfis aerodinâmicos de forma mais estruturada e precisa (Cantwell 2008).

Os perfis da série de quatro dígitos, que foram os primeiros a serem desenvolvidos, têm uma nomenclatura simples. O primeiro dígito indica a curvatura máxima em percentagem da corda (comprimento do perfil), o segundo especifica a posição da curvatura máxima em décimos da corda e os últimos dois dígitos representam a espessura máxima, também em percentagem da corda.

Na série de cinco dígitos, embora se utilizem as mesmas formas de distribuição de espessura da série de quatro dígitos, a definição da linha média apresenta uma complexidade adicional. O primeiro dígito, multiplicado por um fator de $\frac{3}{2}$, fornece o coeficiente de sustentação de projeto (C_L) em décimos. Os dois dígitos

seguintes, divididos por dois, indicam a posição da curvatura máxima em décimos da corda, enquanto os dois últimos dígitos indicam novamente a espessura máxima, expressa em percentagem da corda.

Já os perfis da série de seis dígitos derivam de um método teórico mais avançado, que permite projetar perfis com base na especificação rigorosa da distribuição de pressão desejada sobre a superfície do perfil. O objetivo central deste método era maximizar a região de fluxo laminar sobre a superfície, contribuindo para uma redução significativa do arrasto. Devido às suas diversas variações e parâmetros específicos, esta série apresenta uma convenção de nomenclatura particularmente complexa (Cantwell 2008).

A série de sete dígitos resultou de uma tentativa específica para maximizar as regiões de fluxo laminar, diferenciando as localizações de pressão mínima nas superfícies superior e inferior do perfil. Por último, os perfis NACA de oito dígitos constituem uma evolução das séries anteriores (seis e sete dígitos), sendo projetados especialmente para aplicações em regime de voo com velocidades supercríticas. Tal como a série de sete dígitos, o objetivo primordial foi maximizar independentemente a extensão das regiões de fluxo laminar nas superfícies superior e inferior (Cantwell 2008).

2.1.1 Características Hidrodinâmicas dos Perfis NACA

O comportamento hidrodinâmico dos perfis NACA em escoamentos submersos é fortemente influenciado pelo ângulo de ataque, fator determinante na geração da sustentação, no arrasto e nas características do escoamento ao longo da superfície do perfil. A análise detalhada destas características é fundamental para diversas aplicações em engenharia naval.

Para ângulos de ataque próximos de zero graus (como é apresentado na Figura 2.1), o escoamento permanece aderido à superfície do perfil, permitindo uma interação fluida, estável e controlada. À medida que o ângulo de ataque aumenta progressivamente, verifica-se inicialmente um crescimento nos coeficientes de sustentação e arrasto. Contudo, ao atingir-se um ângulo crítico, ocorre a separação do escoamento, levando à formação de regiões de recirculação e a um significativo aumento da produção de turbulência. Este fenómeno resulta numa diminuição abrupta do coeficiente de sustentação e num aumento substancial do arrasto, comprometendo assim o desempenho hidrodinâmico do perfil (Donini 2014).

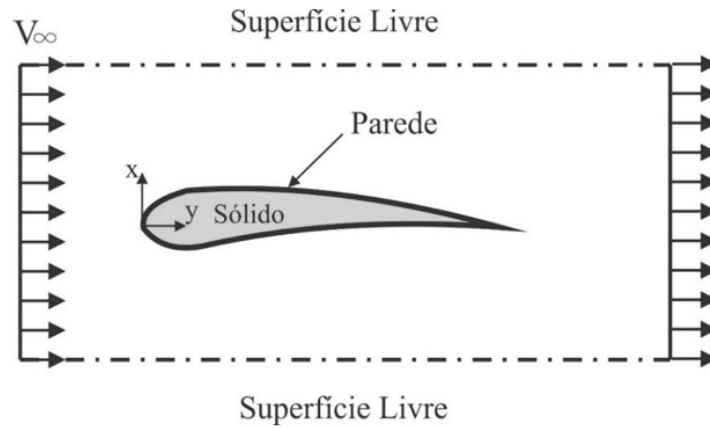


FIGURA 2.1: Escoamento sobre o perfil NACA 4412. Adaptado de Donini 2014.

Deste modo, conclui-se que o desempenho hidrodinâmico dos perfis NACA depende diretamente não apenas da sua geometria, mas também, e sobretudo, do ângulo de ataque sob o qual operam.

2.1.2 Relevância dos Perfis NACA para o Design de Barbatanas

A série NACA de quatro dígitos, particularmente os perfis simétricos, caracteriza-se pela simplicidade das suas formulações matemáticas, facilitando a geração e o dimensionamento das suas coordenadas geométricas (Katti, Bilawar, Agasagi e Patil 2024). Além disso, esta série é amplamente apoiada por extensas bases de dados experimentais obtidas em ensaios realizados em túneis de vento e canais hidráulicos desde a década de 1930, nomeadamente aquelas compiladas por Abbott e von Doenhoff (1959). Estes dados permitem a validação rigorosa de modelos numéricos e proporcionam uma previsão relativamente precisa do comportamento hidrodinâmico (Wu, X. Zhang, X. Tian, Xin Li e Lu 2020).

Os perfis simétricos, em particular, apresentam um momento de arfagem (*heaving*) nulo quando submetidos a um ângulo de ataque igual a zero graus, característica vantajosa para barbatanas com movimentos oscilatórios cíclicos, uma vez que minimizam momentos indesejados (Techet, Hover e M. S. Triantafyllou 2004).

Estudos recentes, tais como os realizados com o Tunabot Flex (C. H. White, Lauder e Bart-Smith 2021) e com uma barbatana inspirada em tartarugas (Font, Tresanchez, Siegentahler, Pallejà, Teixidó, Pradalier e Palacin 2011), demonstraram que os perfis NACA simétricos de quatro dígitos são capazes de alcançar relações

elevadas entre os coeficientes de sustentação e arrasto, apresentando assim um desempenho hidrodinâmico favorável. Deste modo, a adoção destes perfis em veículos submarinos biomiméticos confirma a sua eficácia prática para aplicações de propulsão subaquática.

2.2 Fundamentos da Dinâmica de Fluidos

A dinâmica de fluidos é a disciplina científica que estuda o comportamento dos líquidos e gases em movimento, desempenhando um papel fundamental na compreensão e modelação das forças que atuam sobre superfícies submersas, tais como as barbatanas de veículos biomiméticos. Uma análise mais rigorosa destes fenómenos recorre, habitualmente, à formulação das equações de Navier–Stokes, as quais expressam matematicamente a conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia no fluido (F. M. White 2011).

2.2.1 Equações Gerais do Escoamento

As equações gerais de um escoamento são determinadas pelos princípios físicos fundamentais subjacentes ao problema em estudo. De acordo com Ganesh Ram et al. (Ram, Cooper, Bhatia, Karthikeyan e Periasamy 2014) e Wang et al. (J. Wang, Han, Deng, Dong, Akoç e Moored 2018), numa análise de *CFD* aplicada a barbatanas, software como o *ANSYS Fluent* - que utiliza volumes finitos - assim como outros métodos numéricos baseados em fronteiras imersas (*Immersed Boundary Methods*), resolvem as três equações fundamentais: a conservação da massa, a conservação da quantidade de movimento e a conservação da energia.

No estudo realizado por Wang et al. (J. Wang, Han, Deng, Dong, Akoç e Moored 2018), no qual foi analisado numericamente um perfil hidrodinâmico (*foil*) em movimento oscilatório sinusoidal e em regime *burst-and-coast*, recorreu-se explicitamente às equações de Navier–Stokes incompressíveis. A abordagem empregou uma malha cartesiana combinada com um método de fronteira imersa, demonstrando-se eficaz na simulação da interação fluido-estrutura (FSI, do inglês *Fluid-Structure Interaction*) e na análise detalhada da formação de estruturas vorticosas complexas, essenciais para avaliar o desempenho hidrodinâmico de barbatanas oscilantes em veículos biomiméticos subaquáticos.

A equação da conservação da massa, também denominada equação da continuidade, pode ser expressa pela seguinte relação matemática:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \dot{m} \quad (2.1)$$

onde ρ é a densidade do fluido, t representa o tempo, $\vec{V}$ é o vetor velocidade do escoamento, e $\dot{m}$ corresponde à taxa de variação da massa do fluido.

Por sua vez, a equação da conservação da quantidade de movimento, é dada pela expressão:

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V} - T) = \rho \vec{b} \quad (2.2)$$

onde T é o tensor das tensões, e $\vec{b}$ representa as forças de corpo por unidade de volume.

Finalmente, a equação da conservação da energia pode ser formulada como segue:

$$\frac{\partial(\rho e_0)}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho e_0 \vec{V} - T \cdot \vec{V}) + \dot{q}_c + \dot{q}_r] = \rho \vec{V} \cdot \vec{b} + \rho \dot{q} \quad (2.3)$$

onde e_0 é a energia total por unidade de massa, $\dot{q}_c$ e $\dot{q}_r$ representam os fluxos de calor por condução e radiação, respectivamente, e $\dot{q}$ é a taxa volumétrica de geração ou absorção de energia.

2.2.2 Tipos de Escoamento

O comportamento do escoamento em torno de uma barbatana oscilante é significativamente influenciado pelo regime que se estabelece. De um modo geral, os escoamentos podem ser classificados em três categorias principais: **laminar**, **turbulento** e **transitório** (ou em transição).

Segundo White (F. M. White e Majdalani 2022), um escoamento é considerado **laminar** quando as partículas do fluido se deslocam ordenadamente em camadas paralelas, com pouca ou nenhuma mistura transversal. Em contraste, um escoamento classifica-se como **turbulento** quando existe uma mistura intensa entre as camadas do fluido, acompanhada por formação de vórtices, flutuações de velocidade e transferência convectiva acentuada.

A caracterização destes regimes de escoamento é normalmente feita com base no número de Reynolds (Re), definido pela expressão:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.4)$$

onde ρ representa a densidade do fluido, U é a velocidade característica, L corresponde a uma dimensão característica (como o comprimento da barbatana ou a corda do perfil NACA0012), e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

De acordo com Ferziger et al. (Ferziger, Perić e Street 2020), os regimes podem ser distinguidos através de valores típicos do número de Reynolds:

- **Escoamento laminar:** $Re < 5 \times 10^5$
- **Escoamento em transição:** $5 \times 10^5 < Re < 10^6$
- **Escoamento turbulento:** $Re > 10^6$

A transição de um regime laminar para turbulento não ocorre de forma instantânea, mas sim através de um processo complexo dependente de diversos fatores, incluindo a rugosidade da superfície, perturbações iniciais, gradientes de pressão e a geometria da superfície em questão (Ferziger, Perić e Street 2020).

Num contexto subaquático, especialmente em veículos biomiméticos que utilizam barbatanas oscilantes para propulsão, identificar corretamente o regime de escoamento é crucial. Como salientado por Triantafyllou et al. (M. Triantafyllou, G. Triantafyllou e Yue 2000), o escoamento *não estacionário* e a FSI promovem frequentemente transições locais durante cada ciclo de oscilação da barbatana.

Adicionalmente, estudos como o de Liu et al. (Liu, Ren, Dong, Akanyeti, Liao e Lauder 2017) destacam que tanto a flexibilidade estrutural da barbatana como a sua frequência de oscilação, caracterizada pelo número de Strouhal (St), desempenham papéis decisivos na estabilidade do escoamento e no controlo das estruturas vorticosas geradas. Estas interações afetam diretamente a eficiência propulsiva e o desempenho hidrodinâmico global do sistema.

O número de Strouhal é um parâmetro adimensional fundamental na caracterização de sistemas de propulsão oscilatória, sendo definido como:

$$St = \frac{fA}{U} \quad (2.5)$$

onde f é a frequência de oscilação em Hertz (Hz), A representa a amplitude máxima (*peak-to-peak*) do movimento lateral da extremidade da barbatana (ou bordo de fuga), e U é a velocidade de avanço do veículo ou organismo aquático.

Segundo Triantafyllou et al. (M. Triantafyllou, G. Triantafyllou e Yue 2000), o valor do número de Strouhal tem um impacto direto na eficiência propulsiva. Estudos com diversas espécies aquáticas mostraram que nadadores particularmente eficientes operam geralmente num intervalo ótimo de Strouhal compreendido entre $0.2 < St < 0.4$. Neste intervalo, o acoplamento ideal entre os vórtices gerados pelo escoamento e o movimento da barbatana maximiza a produção de impulso (*thrust*) com mínimas perdas energéticas por dissipação.

2.2.3 Coeficientes, Forças e Momentos Hidrodinâmicos

A avaliação do desempenho hidrodinâmico de barbatanas oscilantes utilizadas em veículos biomiméticos subaquáticos baseia-se fundamentalmente na análise das forças e momentos que surgem da FSI. Para realizar esta avaliação são frequentemente utilizados coeficientes adimensionais, permitindo comparações objetivas entre diferentes geometrias, condições operacionais e escalas de movimento (Font, Tre-sanchez, Siegentahler, Pallejà, Teixidó, Pradalier e Palacin 2011; Konno, Furuya, Mizuno, Hishinuma, Hirata e Kawada 2006).

Como é visível na Figura 2.2, as forças principais que atuam sobre uma barbatana submersa em movimento oscilatório são a força de sustentação (*lift*, L), a força de arrasto (*drag*, D), e o momento hidrodinâmico (M). Estas forças dependem diretamente da geometria do perfil, da velocidade relativa do fluido e do ângulo de ataque (α).

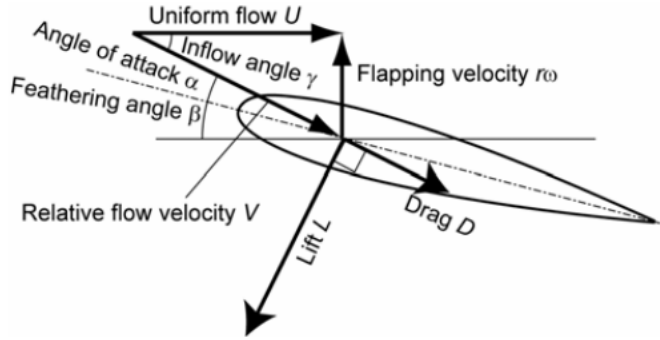


FIGURA 2.2: Variáveis principais que atuam sobre uma barbatana submersa. Adaptado de Konno, Furuya, Mizuno, Hishinuma, Hirata e Kawada 2006.

De acordo com Font et al. (Font, Tresanchez, Siegentahler, Pallejà, Teixidó, Pradalier e Palacin 2011), estas forças podem ser representadas pelas seguintes expressões matemáticas:

$$L = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L \quad (2.6)$$

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_D \quad (2.7)$$

$$M = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_M c \quad (2.8)$$

onde ρ é a densidade do fluido, V é a velocidade relativa do escoamento, S é a área de referência da barbatana, c é a corda do perfil, e C_L , C_D e C_M são respetivamente os coeficientes adimensionais de sustentação, arrasto e momento.

Estes coeficientes são fortemente influenciados pelo ângulo de ataque (α). Por exemplo, para o perfil NACA 0014 analisado por Font et al. (Font, Tresanchez, Siegentahler, Pallejà, Teixidó, Pradalier e Palacin 2011), o ângulo de ataque que otimiza a razão sustentação-arrasto (L/D) foi determinado experimentalmente como sendo aproximadamente 8° para um número de Reynolds $Re = 112\,359$.

Por outro lado, Konno et al. (Konno, Furuya, Mizuno, Hishinuma, Hirata e Kawada 2006) utilizaram a teoria do elemento de lâmina (*blade element theory*) para estimar o desempenho propulsivo num veículo subaquático inspirado nas tartarugas. Neste modelo, a barbatana é dividida em elementos discretos ao longo do seu vão, sendo as forças locais integradas para determinar o impulso total (Th) e o binário (T_q):

$$Th = \frac{1}{2}\rho \int_{R_0}^{R_t} C_L(\alpha)V^2(r) \cos \gamma \sin \gamma dr \quad (2.9)$$

$$T_q = \frac{1}{2}\rho \int_{R_0}^{R_t} C_L(\alpha)V^2(r)r \sin \gamma \cos \gamma dr \quad (2.10)$$

onde R_0 e R_t representam as posições da raiz e da ponta da barbatana relativamente ao centro de rotação, e γ corresponde ao ângulo de incidência do escoamento local.

A utilização destes coeficientes e métodos permite uma caracterização detalhada e rigorosa do desempenho hidrodinâmico das barbatanas oscilantes, sendo essencial para otimizar a eficiência propulsiva e minimizar o consumo energético em sistemas biomiméticos subaquáticos.

2.2.4 Interação Fluido-Estrutura na Propulsão com Barbatanas Oscilantes

A FSI, constitui um fenómeno fundamental na geração de propulsão em veículos biomiméticos subaquáticos equipados com barbatanas oscilantes. Neste tipo de propulsão, o movimento periódico da barbatana provoca alterações significativas no escoamento circundante, que, por sua vez, exercem forças hidrodinâmicas sobre a estrutura. Esta dinâmica cria uma interação contínua e recíproca entre o fluido e a superfície sólida.

Importa salientar que esta interação é inerentemente bidirecional: não só o escoamento impõe forças que deformam a barbatana, como também a deformação instantânea da barbatana altera o campo de escoamento. A resposta estrutural, especialmente em superfícies flexíveis, modifica a distribuição de pressão e a formação de vórtices, podendo amplificar ou atenuar a geração de impulso. Estudos recentes demonstram que barbatanas flexíveis podem alcançar até 70% mais eficiência

propulsiva do que superfícies rígidas, uma vez que a deformação reorienta as forças hidrodinâmicas de forma vantajosa (Kumar, McHenry, Seo e Mittal 2025). Quando ocorre ressonância entre a frequência de oscilação e a resposta estrutural, o atraso de fase entre o movimento imposto e a deformação resulta em padrões de vorticidade otimizados e ângulos de ataque eficazes, maximizando o impulso (Martínez-Muriel, Arranz, García-Villalba e Flores 2023). Ensaios experimentais com mapeamento de pressão confirmam que as alterações de forma da barbatana influenciam diretamente o escoamento local, afetando a eficiência global do sistema propulsivo (Dagenais e Aegerter 2019).

De acordo com Triantafyllou et al. (M. Triantafyllou, G. Triantafyllou e Yue 2000), a propulsão obtida com barbatanas oscilantes resulta diretamente do princípio de ação e reação de Newton, onde a transferência de quantidade de movimento para o fluido induz uma força de reação que impulsiona o veículo. Ou seja, as forças exercidas pela barbatana no fluido geram forças opostas, responsáveis pela geração do impulso (*thrust*).

As forças hidrodinâmicas envolvidas na FSI podem ser decompostas em componentes normais (pressão) e tangenciais (tensão de corte), expressas matematicamente por:

$$\vec{F} = \int_S (-p\vec{n} + \vec{\tau}) dS \quad (2.11)$$

8

onde $\vec{F}$ representa a força total exercida pelo fluido sobre a superfície S da barbatana, p é a pressão local, $\vec{\tau}$ corresponde ao vetor das tensões tangenciais e $\vec{n}$ é o vetor normal à superfície.

Em sistemas de propulsão baseados na oscilação de superfícies, como demonstrado por Konno et al. (Konno, Furuya, Mizuno, Hishinuma, Hirata e Kawada 2006), estas forças variam continuamente ao longo de cada ciclo de oscilação, resultando na formação e desprendimento de vórtices. Estes padrões vorticosos desempenham um papel crucial na determinação do desempenho hidrodinâmico, influenciando diretamente a eficiência propulsiva e a manobrabilidade.

Estudos como os realizados por Liu et al. (Liu, Ren, Dong, Akanyeti, Liao e Lauder 2017) e Font et al. (Font, Tresanchez, Siegentahler, Pallejà, Teixidó, Pradalier e Palacin 2011) sublinham que o controlo rigoroso da frequência, amplitude e fase das oscilações é essencial para maximizar a transferência de quantidade de

movimento para o fluido. A correta sincronização entre a dinâmica estrutural da barbatana e as características do escoamento, frequentemente analisada através do número de Strouhal, influencia significativamente a geração de impulso e a eficiência energética do sistema.

Adicionalmente, Silva (Jesus Silva 2018) demonstrou num estudo experimental com asas em movimento de translação, que o padrão de vorticidade gerado na esteira constitui um aspeto fundamental para compreender a FSI em sistemas propulsivos oscilantes. A formação e interação destes vórtices promovem diretamente a geração do impulso, confirmando o papel essencial destas estruturas na mediação da transferência de quantidade de movimento entre a barbatana e o fluido circundante. Estes resultados destacam a importância da análise detalhada da esteira vorticiosa em projetos de propulsão biomimética com barbatanas oscilantes.

Assim, a compreensão e modelação precisa da FSI revelam-se essenciais para o desenvolvimento eficiente de veículos subaquáticos biomiméticos, permitindo explorar e reproduzir princípios naturais observados em organismos aquáticos, como peixes e tartarugas, e desenvolver sistemas de locomoção silenciosos e energeticamente eficientes.

2.3 Conceitos Fundamentais da Simulação CFD

O CFD é uma ferramenta essencial para a análise detalhada dos fenómenos envolvidos no escoamento em torno de superfícies oscilantes, como as barbatanas biomiméticas com perfis NACA. Em particular, no domínio da propulsão submarina, a simulação CFD permite examinar com precisão os mecanismos de geração de impulso e as FSI envolvidas.

O *software ANSYS Fluent* é uma referência nesta área, operando com base no método dos volumes finitos (FVM, do inglês, *Finite Volume Method*), onde as equações fundamentais de conservação da massa, quantidade de movimento e energia são discretizadas e resolvidas numericamente célula a célula (ANSYS Inc. 2021; Ferziger, Perić e Street 2020).

2.3.1 Modelos Numéricos e Malhas

Para analisar adequadamente o escoamento não estacionário gerado por uma barbatana em movimento oscilatório, é crucial utilizar uma malha adequada. De acordo com Shang e Horrillo (Shang e Horrillo 2021), malhas estruturadas ou

híbridas com zonas de refinação próximas ao perfil e à esteira permitem capturar com maior precisão os gradientes de velocidade e as estruturas vorticosas. No caso específico de superfícies em movimento oscilatório, recomenda-se a utilização de técnicas como *Dynamic Mesh* ou *Sliding Mesh* no *Fluent*, conforme detalhado no guia teórico do *software ANSYS Fluent* (ANSYS Inc. 2021).

2.3.2 Modelos de Turbulência

Os escoamentos em torno de barbatanas oscilantes apresentam características como separações periódicas, formação de vórtices e interações fluido-dinâmicas não lineares. Para capturar esses fenômenos com precisão, é frequentemente adotado o modelo de turbulência $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) desenvolvido por Menter (Menter 1992), devido à sua capacidade comprovada de previsão mais precisa próximo às paredes e robustez na captura de fenômenos turbulentos em regimes com gradientes de pressão adversos, comuns em movimentos oscilatórios. O $k-\varepsilon$ *realizable* (duas equações) com *Standard Wall Functions*, também é bastante utilizado dada a sua robustez e ampla utilização em escoamentos externos e superfícies oscilantes, equilibrando custo computacional e precisão.

2.3.3 Resultados *CFD*

Os resultados obtidos através das simulações *CFD* incluem coeficientes hidrodinâmicos como sustentação (C_L), arrasto (C_D), a razão C_L/C_D , bem como padrões detalhados de vorticidade na esteira da barbatana. Trabalhos como o de Shang e Horrillo (Shang e Horrillo 2021) evidenciam que a dinâmica dos vórtices libertados durante o movimento oscilatório é decisiva para a eficiência propulsiva. A análise destes padrões vorticosos, frequentemente identificados como uma estrada de von Kármán invertida, é essencial para compreender a relação entre a formação de vórtices e a geração eficaz de impulso.

Conforme descrito no guia teórico do *ANSYS Fluent* (ANSYS Inc. 2021), fatores como a correta definição das condições de fronteira, a precisão na modelação dos movimentos e a escolha adequada dos esquemas numéricos de discretização temporal e espacial (normalmente de segunda ordem), são essenciais para garantir a fiabilidade e a precisão dos resultados das simulações.

A metodologia *CFD* tem sido amplamente validada em diversos estudos fundamentais, como aqueles apresentados por Ferziger et al. (Ferziger, Perić e Street 2020), afirmando-se como uma abordagem robusta e consolidada para analisar e

otimizar sistemas de propulsão biomimética baseados em superfícies oscilantes, incluindo barbatanas inspiradas em organismos aquáticos.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Desenvolvimento de competências em *CFD* e implementação no *Ansys Fluent*

Dado que o presente estudo exigia a realização de simulações numéricas de elevada complexidade de *CFD*, tornou-se necessária uma fase inicial de aprendizagem autónoma, com o objetivo de adquirir as competências técnicas indispensáveis à correta implementação dos modelos no *ANSYS Fluent* (versão 2022 R1), nomeadamente no contexto específico de superfícies oscilantes com recurso a malha dinâmica.

Na ausência de experiência prévia significativa em simulações *CFD* (em particular no que concerne à utilização de malhas dinâmicas e ficheiros *UDF*) esta etapa revelou-se fundamental para o progresso da investigação. A aprendizagem foi sustentada por um conjunto de recursos acessíveis em plataformas digitais, dos quais se destacam vídeos didáticos disponíveis no *YouTube* 2025, a documentação técnica oficial da *ANSYS*, acessível no seu website institucional, e ainda a consulta recorrente de fóruns especializados, que se revelaram particularmente úteis na resolução de problemas práticos surgidos ao longo do processo.

Numa fase inicial, foram efetuadas simulações com malha estática, recorrendo à definição manual de funções de movimento diretamente na zona de células (*Cell Zone Conditions*) do domínio fluido. Embora limitada do ponto de vista da modelação, esta abordagem permitiu compreender os princípios fundamentais da imposição de movimento relativo no domínio fluido.

Com o progressivo domínio da interface do *Fluent* e da linguagem de programação *C*, utilizada na elaboração de ficheiros *UDF*, foi possível adaptar um código disponibilizado num vídeo online com o intuito de reproduzir um movimento oscilatório do tipo sinusoidal, representativo de uma barbatana. Importa referir

que este código tinha um carácter meramente pedagógico, não estando diretamente fundamentado em qualquer publicação científica. A sua adaptação teve, por isso, um propósito eminentemente formativo, possibilitando uma exploração prática dos parâmetros de oscilação e da sua implementação computacional.

A correta integração da *UDF* no *ANSYS Fluent* constituiu um dos principais desafios enfrentados nesta fase. As dificuldades verificadas incluíram questões de compilação do código, definição da biblioteca dinâmica, e ligação do ficheiro ao modelo de simulação. Após uma pesquisa detalhada, foram identificadas as diretrizes adequadas à correta estruturação do ficheiro *UDF* e clarificados os procedimentos necessários à sua compilação bem-sucedida na versão instalada do *Fluent*.

A superação destas dificuldades permitiu, numa fase subsequente, efetuar simulações com malha dinâmica e movimentos oscilatórios controlados por *UDF*, conduzindo a uma modelação mais fidedigna do comportamento da barbatana. Tal evolução revelou-se determinante para a análise da FSI e para a avaliação do desempenho hidrodinâmico do sistema.

Conclui-se, assim, que esta etapa preparatória teve um papel crucial na consolidação do conhecimento necessário à utilização eficaz das ferramentas de *CFD* no âmbito da presente dissertação.

3.2 Seleção dos Perfis NACA e Definição do Modelo Geométrico

A seleção dos perfis NACA utilizados nas simulações assentou numa revisão criteriosa da literatura científica, aliada ao enquadramento específico do projeto SABUVIS II – onde se tem um veículo autónomo subaquático em desenvolvimento, no qual se pretende implementar um sistema de propulsão biomimético baseado em barbatanas oscilantes. Este sistema visa replicar a locomoção de uma tartaruga marinha, recorrendo à utilização de quatro barbatanas – duas anteriores e duas posteriores – que descrevem um movimento oscilatório de natureza sinusoidal.

Com o objetivo de identificar o perfil hidrodinâmico mais eficiente para as barbatanas do PETINGA, foram selecionados quatro perfis NACA, com base na sua aplicação em trabalhos de referência na área:

- **NACA 0012:** Perfil utilizado nas barbatanas peitorais de um protótipo anterior do projeto SABUVIS, conforme descrito por António 2022. A sua seleção

visa assegurar a continuidade geométrica e a compatibilidade construtiva com soluções já implementadas.

- **NACA 0014:** Selecionado com base no estudo de Font, Tresanchez, Siegentahler, Pallejà, Teixidó, Pradalier e Palacin 2011, onde foi desenvolvido um AUV com propulsão inspirada em tartarugas marinhas. Este perfil demonstrou uma relação sustentação/arrasto favorável para números de Reynolds comparáveis aos do presente trabalho.
- **NACA 0015:** Empregado no desenvolvimento de um veículo submergível de inspiração zoológica, com especial atenção na reprodução dos movimentos naturais de uma tartaruga, como documentado por Konno, Furuya, Mizuno, Hishinuma, Hirata e Kawada 2006.
- **NACA 2412:** Perfil com aplicação recorrente em estudos de propulsão subaquática biônica, destacando-se os trabalhos de Chu, Y. Wang, Lv, Xiaohao Li et al. 2024; Chu, Y. Wang, Lv, Y. Zhou et al. 2025, nos quais foi evidenciado um desempenho satisfatório em movimentos oscilatórios controlados.

O perfil NACA 2408 foi selecionado com base na sua relação C_L/C_D bastante favorável no *Airfoil Tools*, o que perfaz um total de cinco perfis NACA a serem analisados neste presente trabalho.

De forma a permitir uma comparação direta e isenta entre os diferentes perfis, foi adotado um modelo geométrico comum, fixando-se o comprimento da corda (100 mm) para todos os casos. Adicionalmente, foi imposto um movimento oscilatório sinusoidal com amplitude e frequência iguais, garantindo assim que as variações nos resultados se devem exclusivamente às características intrínsecas dos perfis e não a diferenças geométricas ou cinemáticas.

Com esta abordagem metodológica pretendeu-se identificar o perfil NACA mais eficiente para aplicação no sistema propulsivo do PETINGA, tendo como critério principal o desempenho hidrodinâmico dos diferentes perfis testados. A eficiência foi avaliada através da razão entre os coeficientes de sustentação e de arrasto (C_L/C_D), sendo esta métrica amplamente reconhecida como indicadora da eficácia aerodinâmica e propulsiva.

De acordo com o estudo de Alberti, Carnevali, Costa e Crivellini 2023, à medida que a sustentação prevalece sobre o arrasto (isto é, quando a razão L/D é elevada) a eficiência propulsiva aproxima-se da unidade. Pelo contrário, quando o

arrasto ganha relevância, essa eficiência tende a decrescer devido à contribuição progressivamente prejudicial do arrasto tanto na direção longitudinal como na vertical.

Assim, a seleção do perfil com base na maximização da razão C_L/C_D permite não só garantir um desempenho hidrodinâmico superior, como também assegurar maior eficiência na transferência de energia para o fluido, aspecto essencial na replicação dos mecanismos de propulsão biomimética que caracterizam o conceito do veículo desenvolvido no âmbito do projeto SABUVIS.

3.3 Movimento Oscilatório da Barbatana

As tartarugas marinhas recorrem predominantemente às barbatanas peitorais como principal meio de propulsão no meio aquático, executando movimentos amplos e periódicos cuja trajetória se aproxima de um padrão de natureza sinusoidal (Font, Tresanchez, Siegentahler, Pallejà, Teixidó, Pradalier e Palacin 2011; Konno, Furuya, Mizuno, Hishinuma, Hirata e Kawada 2006). Este tipo de movimento caracteriza-se por oscilações angulares regulares e simétricas, as quais favorecem a formação de estruturas vorticosas coesas e energeticamente eficientes, contribuindo para a progressão do animal.

Projetos de robótica subaquática de inspiração biomimética, como o U-CAT, ilustram esta abordagem, ao incorporarem quatro barbatanas (duas anteriores e duas posteriores) com funcionamento oscilatório, com o objetivo de replicar o padrão de locomoção observado nas tartarugas marinhas (Salumäe, Raag, Rebane, Ernits, Toming, Ratas e Kruusmaa 2014). Em estudos dedicados ao desenvolvimento de veículos equipados com barbatanas inspiradas na morfologia de organismos aquáticos, a adoção de movimentos oscilatórios sinusoidais tem-se revelado eficaz na promoção da manobrabilidade, da eficiência energética e da operação silenciosa.

A representação matemática do movimento oscilatório pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta(t) = \theta_{\max} \cdot \sin(2\pi ft) \quad (3.1)$$

em que $\theta(t)$ corresponde ao ângulo instantâneo da barbatana, $\theta_{\max}$ representa a amplitude angular máxima, e f é a frequência de oscilação. Esta formulação permite uma modelação controlada e realista do batimento da barbatana. O eixo de

rotação é em torno de z tendo como origem o bordo de ataque do perfil. A derivada temporal desta função fornece a velocidade angular:

$$\dot{\theta}(t) = \frac{d\theta}{dt} = 2\pi f \cdot \theta_{\max} \cdot \cos(2\pi ft) \quad (3.2)$$

a qual é introduzida nos modelos *CFD* através da utilização de ficheiros *UDF*, desenvolvidos em ambiente *Visual Studio*.

A implementação deste modelo encontra respaldo sólido na literatura: em Chu, Y. Wang, Lv, Xiaohao Li et al. 2024, o movimento sinusoidal foi aplicado em barbatanas baseadas em perfis NACA, com avaliação do seu desempenho propulsivo; de igual modo, em Konno, Furuya, Mizuno, Hishinuma, Hirata e Kawada 2006 foram utilizadas expressões angulares semelhantes para efeitos de controlo cinemático num AUV.

Conclui-se, assim, que a adoção de um movimento oscilatório sinusoidal no sistema de barbatanas do PETINGA assenta não apenas em fundamentos empíricos e matemáticos, mas também na consistência com práticas biomiméticas validadas, garantindo simultaneamente fidelidade à locomoção natural e eficácia técnica do sistema propulsivo.

3.3.1 Parâmetros de Oscilação

A definição dos parâmetros associados ao movimento oscilatório das barbatanas, nomeadamente a frequência de oscilação e a amplitude angular, constitui um aspeto determinante na modelação do sistema de propulsão do PETINGA. A seleção destes valores foi sustentada em estudos prévios, de natureza tanto experimental como numérica, com o intuito de assegurar a coerência física e a comparabilidade dos resultados obtidos.

No estudo experimental conduzido por Ding, Q. Gao, Zhu, Shi, K. Chen e R. Chen 2024, foi analisado o desempenho propulsivo de um perfil NACA 0012 num tanque hidrodinâmico, variando-se sistematicamente a frequência e a amplitude da oscilação. As frequências testadas situaram-se no intervalo entre 1 Hz e 4 Hz, enquanto as amplitudes angulares variaram de 5° a 60°, com incrementos regulares de 5°. Contudo, verificou-se que, para a frequência de 4 Hz e amplitudes superiores a 40°, o sistema mecânico apresentava limitações funcionais, nomeadamente

dificuldades do motor em reproduzir fielmente a amplitude pretendida e fenômenos de saturação nos sensores de força. Em virtude destas limitações, os ensaios correspondentes a essas condições foram excluídos da análise final.

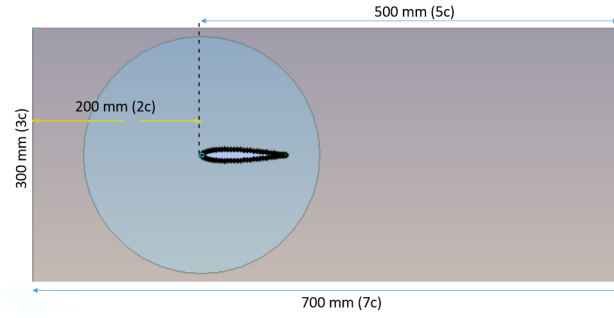
Complementarmente, no trabalho de Z. Wang, Chang, Hou, N. Gao, W. Chen e Y. Tian 2022, foi realizada uma investigação numérica recorrendo a simulações *CFD*, com o objetivo de avaliar o impacto dos parâmetros de oscilação sobre a eficiência propulsiva. Em Z. Wang, Chang, Hou, N. Gao, W. Chen e Y. Tian 2022, a amplitude angular considerada varia entre 10° e 30° , permitindo observar a influência destas sobre a formação de estruturas vorticosas e a geração de impulso hidrodinâmico.

Com base na evidência científica disponibilizada por estes dois estudos, a escolha dos parâmetros de oscilação no presente trabalho respeitou os intervalos validados na literatura, assegurando simultaneamente a estabilidade computacional das simulações e a representatividade biomimética do movimento das barbatanas. Desta forma, procurou-se garantir que as frequências e amplitudes angulares adotadas nas simulações não só replicassem adequadamente os padrões de locomoção das tartarugas marinhas, como também viabilizassem uma análise precisa e robusta do desempenho hidrodinâmico no contexto da propulsão oscilante.

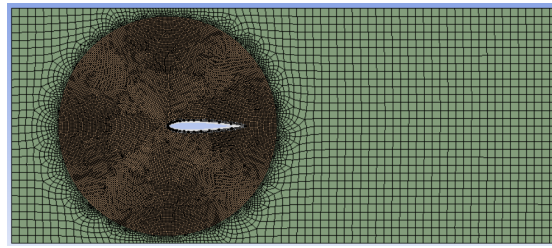
3.4 Simulações no *Ansys Fluent*

3.4.1 Geração da Malha

A construção do domínio computacional foi realizada no *ANSYS DesignModeler*, onde se definiu um retângulo representativo do volume de fluido (Fig. 3.1a), ao qual se adicionou uma sub-região circular centrada no perfil NACA (Fig. 3.1b). Esta abordagem permitiu uma refinação localizada da malha na zona de maior interesse (junto à barbatana), reduzindo significativamente o número total de elementos necessários para representar com precisão o escoamento nessa região crítica.



(A) Domínio computacional global.



(B) Região circular refinada (diâmetro 280 mm).

FIGURA 3.1: Configuração geométrica do domínio e zona de refinamento local (imagens ilustrativas geradas no pré-processamento).

Dimensões e fundamentação do domínio

Foi adotado um domínio bidimensional comum a todas as simulações dos perfis NACA (tendo, cada um destes perfis, 100 mm de corda), garantindo condições de comparação consistentes e eliminando potenciais enviesamentos decorrentes da geometria do domínio. O comprimento total é de 700 mm e a altura de 300 mm, sendo a distância a montante do bordo de ataque de aproximadamente $2c$ (200 mm) e a jusante de cerca de $5c$ (500 mm). Estas proporções estão em conformidade com as recomendações para simulações de escoamentos externos oscilantes, que sugerem extensões de $2-3c$ a montante e $5-7c$ a jusante, de forma a minimizar a influência das fronteiras de entrada e saída sobre o campo próximo do perfil. A altura equivalente a $3c$ permite reduzir o efeito de bloqueio e limita a influência das fronteiras superior e inferior. Para o cálculo das forças, considerou-se uma largura de 200 mm que corresponde a $2c$.

Estratégia de discretização

A malha foi gerada no *ANSYS Meshing* recorrendo a elementos lineares e assegurando uma transição progressiva entre a região refinada e as zonas periféricas. A região retangular exterior foi discretizada com *element size* de 0,01 mm, e a

circunferência refinada, com diâmetro de 280 mm, foi definida com *element size* de 0,002 mm. A transição entre ambas as regiões foi suavizada através de *Edge Sizing* com 500 divisões, evitando descontinuidades abruptas na discretização. O valor do *target skewness* foi mantido em 0,9, garantindo a qualidade geométrica dos elementos. Esta configuração originou uma malha com aproximadamente 20 000 elementos por caso, proporcionando resolução suficiente para representar a camada limite e as estruturas vorticosas geradas pelo movimento oscilatório, sem impor custos computacionais excessivos. A topologia e os parâmetros de discretização foram mantidos invariáveis em todos os casos, assegurando que as diferenças nos resultados decorreram exclusivamente das características geométricas e cinemáticas de cada perfil.

3.4.2 Configurações Física e Numérica

As simulações foram configuradas como bidimensionais, incompressíveis e transientes, utilizando água (H_2O) como fluido de trabalho a cerca de 25°C, com densidade $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$, viscosidade dinâmica $\mu = 1,003 \times 10^{-3} \text{ kg/(m s)}$, calor específico $c_p = 4182 \text{ J/(kg K)}$ e condutividade térmica $k = 0,6 \text{ W/(m K)}$, valores representativos das condições à temperatura ambiente e adequados ao enquadramento numérico e experimental.

O modelo de turbulência selecionado foi o $k-\varepsilon$ *realizable* (duas equações) com *Standard Wall Functions*. A aplicação das *Standard Wall Functions* permite trabalhar com malhas de y^+ moderado, evitando a necessidade de refinamentos excessivos na camada limite.

As condições de fronteira incluíram uma entrada de velocidade nula (*velocity inlet*), eliminando a influência de escoamentos incidentes, e uma saída (*pressure outlet*) com pressão estática de referência igual a 0 Pa. As paredes superior e inferior foram modeladas com *Specified Shear* igual a 0 Pa, representando a ausência de atrito e simulando um domínio de extensão infinita, enquanto o contorno do perfil foi definido com condição de não deslizamento (*no-slip*).

O *solver* utilizado foi do tipo *pressure-based*, em dupla precisão, com acoplamento pressão-velocidade segundo o método SIMPLE. Os gradientes foram calculados pelo método *Least Squares Cell-Based*, a pressão por esquema de segunda ordem e o momento por *Second Order Upwind*, sendo a discretização temporal *First Order Implicit*. Foram utilizados fatores de sub-relaxação de 0,3 para pressão, 0,7 para momento e 0,8 para as equações de k e ε , permitindo manter a estabilidade numérica e um progresso consistente da solução.

3.4.3 Malha Dinâmica e *UDF*

Foi ativada a funcionalidade *Dynamic Mesh*, combinando *Smoothing* e *Local Remeshing*, com o perfil NACA modelado como corpo rígido (*Rigid Body*). A rotação foi imposta através de uma *UDF*, programada em linguagem *C* e compilada no *Visual Studio*, que implementa uma cinemática harmônica definida por:

$$\theta(t) = \theta_{\max} \sin(2\pi ft), \quad \dot{\theta}(t) = \theta_{\max} (2\pi f) \cos(2\pi ft).$$

Esta abordagem assegura um controlo paramétrico rigoroso do movimento e a preservação da qualidade da malha ao longo da simulação, redistribuindo nós e regenerando elementos sempre que necessário. Embora a representação adotada considere o perfil como rígido, a interação física entre o escoamento e a superfície é bidirecional, sendo que, em sistemas flexíveis, as forças hidrodinâmicas induziriam deformações capazes de influenciar o escoamento. No presente trabalho, a hipótese de rigidez foi mantida com o objetivo de isolar os efeitos geométricos e cinemáticos e de conter o custo computacional, ficando a modelação de deformações estruturais prevista para trabalhos futuros.

3.4.4 Parâmetros de Oscilação

Para a análise comparativa entre perfis foi estabelecida uma frequência de oscilação de $f = 2$ Hz e uma amplitude angular de $\theta_{\max} = 15^\circ$. Estes valores inserem-se nos intervalos habitualmente reportados na literatura para propulsão biomimética por superfícies oscilantes e asseguram a estabilidade numérica, evitando distorções significativas dos elementos da malha.

3.4.5 Parâmetros Temporais e Convergência

Foi adotado um passo temporal de $\Delta t = 0,01$ s, garantindo pelo menos 200 passos por ciclo, em função da frequência, e até 20 iterações internas por passo. Durante as simulações, monitorizaram-se continuamente as forças hidrodinâmicas (sustentação L e arrasto D), os coeficientes C_L e C_D , a razão C_L/C_D e o *thrust* médio no eixo de avanço. Analisaram-se ainda campos de pressão e vorticidade, tanto instantâneos como médios por ciclo, para caracterizar a esteira e a coerência das estruturas vorticosas.

3.4.6 Execução das Simulações

Foram selecionados cinco perfis NACA para estudo: NACA 2412, NACA 0015, NACA 0014, NACA 0012 e NACA 2408. Os quatro primeiros são amplamente utilizados em estudos de propulsão biomimética com superfícies oscilantes, enquanto o NACA 2408 foi incluído devido à sua relação C_L/C_D favorável identificada no *Airfoil Tools*. Todas as simulações foram realizadas com corda $c = 100$ mm, domínio e malha comuns, condições físico-numéricas idênticas e cinemática de referência igual, assegurando que as variações de desempenho se devem exclusivamente às diferenças entre perfis. Cada caso foi executado até à estabilização das estatísticas de ciclo, sendo o perfil com melhor desempenho submetido a um estudo paramétrico de variação de amplitude e frequência para identificar a configuração mais eficiente para o sistema propulsivo do PETINGA. Para a execução destas simulações, o computador utilizado tem como características 16GB de RAM e um processador AMD Ryzen 7 7730U with Radeon Graphics. Os critérios de convergência adotados nas simulações foram definidos de modo a garantir a estabilidade numérica e a precisão dos resultados. O solver *pressure-based* do *ANSYS Fluent* foi utilizado com acoplamento do tipo SIMPLE, e as equações de transporte foram discretizadas segundo o esquema de segunda ordem (*Second Order Upwind*). A convergência em cada passo de tempo foi verificada através da monitorização dos resíduos das equações de continuidade, quantidade de movimento e, quando aplicável, energia e turbulência.

Foram estabelecidos os seguintes critérios de convergência:

- Continuidade: 10^{-5} ;
- Momento (direções x e y): 10^{-6} ;
- Energia (se aplicável): 10^{-6} ;
- Turbulência (k e ω): 10^{-5} .

A metodologia foi concebida de forma a garantir reprodutibilidade integral, uma vez que todos os casos partilharam o mesmo processo de geração geométrica, discretização e configuração de solver.

3.4.7 Seleção do Perfil Ótimo e Análise Paramétrica

Concluída a fase comparativa inicial, e com base nos resultados numéricos obtidos, foi identificado o perfil NACA com melhor desempenho hidrodinâmico. Numa etapa subsequente, realizaram-se simulações adicionais exclusivamente com este perfil, mantendo inalteradas todas as condições geométricas, físico-numéricas

e de domínio anteriormente estabelecidas. Nesta nova série de simulações, a única variação introduzida correspondeu aos parâmetros cinemáticos, nomeadamente a frequência e a amplitude do movimento oscilatório, com o objetivo de determinar a combinação capaz de maximizar a força propulsiva (*thrust*) e, consequentemente, identificar a configuração de movimento mais eficiente para aplicação no sistema propulsivo do PETINGA.

3.5 Ensaios Experimentais

Após a determinação numérica da configuração ótima, procedeu-se a ensaios experimentais no tanque de ensaios do Departamento de Ciências e Tecnologias da Escola Naval. Para reproduzir o corpo rígido modelado no *ANSYS Fluent*, foi fabricada uma barbatana em PLA (*Polylactic Acid*) por impressão 3D, com largura igual a $2c$ (duas vezes a corda do perfil). Esta solução assegura maior rigidez estrutural e estabilidade dinâmica do protótipo durante o ensaio, sendo consistente com práticas experimentais reportadas na literatura para barbatanas tridimensionais, nas quais se procura evitar instabilidades como o *flutter* e garantir que o comportamento dinâmico se mantém dentro dos regimes previstos pela teoria hidrodinâmica clássica (D'ubaldo, Rizzo, Dessi e Passacantilli 2021).

Na configuração inicial (Figura 3.2a), a barbatana foi fixada a um varão roscado de aço inoxidável, acoplado a um servomotor digital à prova de água (Figura 3.3), modelo MS-617, com binário nominal de $35 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, rotação máxima de 270° e tensão de operação entre $4,8 \text{ V}$ e $8,4 \text{ V}$. A montagem foi posicionada verticalmente no tanque, opção que permitiu reduzir a influência da força de impulsão hidrostática sobre o momento total atuante, conforme estratégia adotada em estudos experimentais análogos (Rogelio e Murcia 2024).

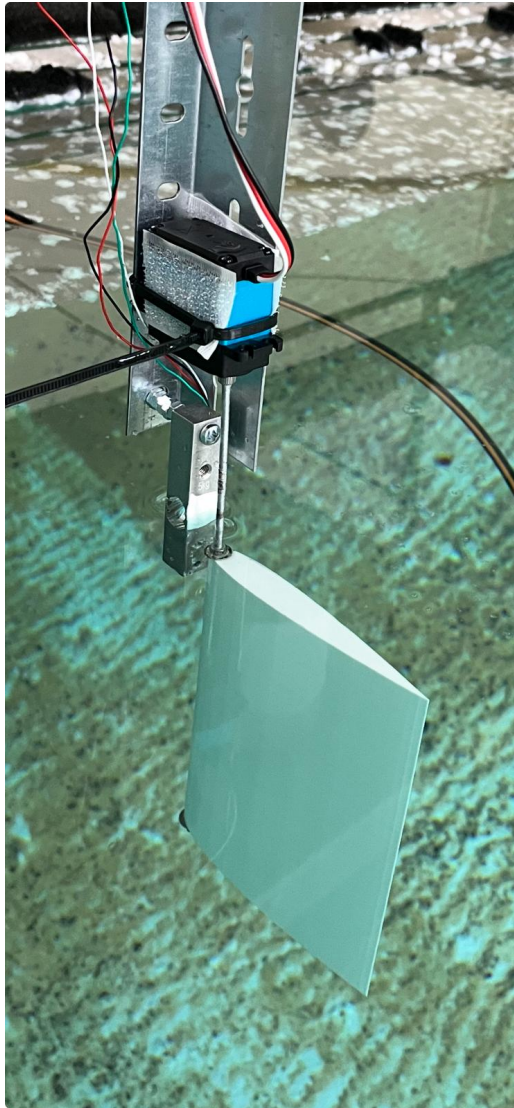
Durante os primeiros ensaios, verificou-se que a baixa densidade do PLA conferia ao protótipo uma flutuabilidade positiva significativa, comprometendo a reprodução fiel da cinemática imposta pelo servomotor. Para mitigar este efeito, foram adicionadas massas esféricas junto à extremidade distal da barbatana (Figura 3.2b), de modo a obter flutuabilidade neutra e a evitar efeitos pendulares que ocorreriam caso as massas estivessem penduradas e não juntas à superfície da barbatana. Contudo, a adição de massa aumentou o esforço mecânico na ligação roscada entre o varão e o servomotor, provocando desgaste progressivo da rosca e consequente redução da eficácia na transmissão do movimento após cerca de três a quatro ensaios experimentais.

A medição da força propulsiva foi realizada com uma célula de carga de 5 kg ligada a um módulo amplificador HX711 (Figura 3.4), cujas ligações foram soldadas devido à ausência de conectores adequados e à necessidade de substituir os fios originais da célula de carga, que apresentavam reduzida espessura e elevada fragilidade. O sistema experimental integrou dois microcontroladores *Arduino Uno*: o primeiro, ligado ao servomotor, foi programado para executar a cinemática oscilatória determinada na fase numérica; o segundo foi utilizado para a calibração da célula de carga e para a aquisição dos dados de força em função do tempo.

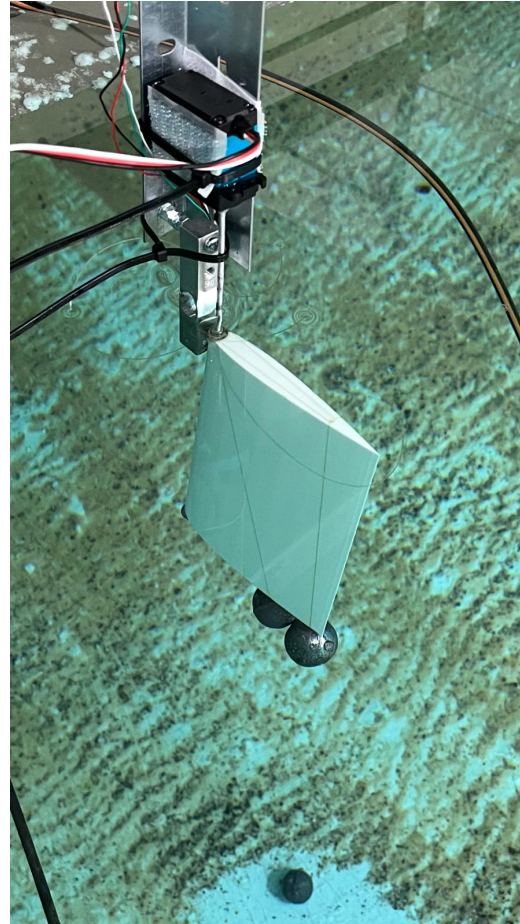
O sistema experimental foi instrumentado com um servomotor digital Hohlbecher (35 kg·cm, 270°, 4,8–8,4 V) responsável pelo movimento oscilatório da barbatana, e uma célula de carga de 5 kg acoplada a um amplificador HX711 para medição das forças hidrodinâmicas.

O servomotor apresenta resolução angular aproximada de 0,07°, com repetibilidade mecânica de posicionamento de $\pm 0,2^\circ$. A elevada resolução e o controlo digital permitem uma definição precisa do ângulo de ataque imposto durante os ensaios.

A resolução efetiva do conjunto célula de carga + amplificador é da ordem de 0,001 N, com uma incerteza estimada de $\pm 0,03\%$ da escala total (aproximadamente $\pm 0,015$ N).



(A) Barbatana em PLA acoplado ao varão roscado e servo-motor.



(B) Barbatana com massas para compensação de flutuabilidade.

FIGURA 3.2: Configurações do hidrofólio no aparato experimental.



FIGURA 3.3: Servomotor digital à prova de água (MS-617).

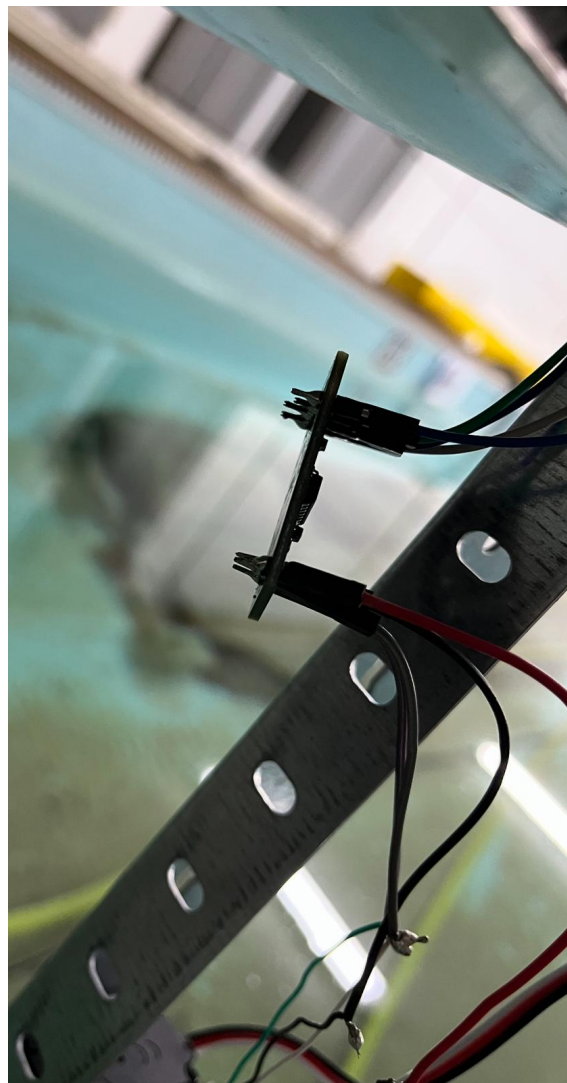


FIGURA 3.4: Soldaduras realizadas no módulo HX711.

Programação e controlo do sistema.

Para o *Arduino* da célula de carga, utilizando o IDE do Arduino versão 2.3.6 (Arduino 2025), recorreu-se à biblioteca HX711 (Tillaart 2020), configurando-se os pinos de dados e relógio, um fator de calibração experimental (423) e a leitura média de cinco amostras por ciclo; a massa lida foi convertida para força (N) multiplicando pela aceleração gravítica, com transmissão contínua via porta série a ~ 20 Hz.

O *Arduino* do servomotor foi programado com a biblioteca `Servo.h` (Arduino 2013), como se encontra no Apêndice C, impondo uma cinemática sinusoidal à frequência $f = 2$ Hz (valor coerente com a análise paramétrica) e amplitude definida conforme o par $(f, \theta_{\max})$ ótimo obtido numericamente. Foi adotado $offset = 85^\circ$ como posição neutra, ajustado à geometria do suporte e à orientação do veio do servo, garantindo que a barbatana inicia e termina cada ciclo na posição mecânica pretendida sem saturar o curso do atuador. Implementou-se ainda a execução de um número finito de ciclos, após os quais o servo regressa ao *offset*.

A calibração da célula de carga foi efetuada aplicando-se uma massa conhecida e convertendo o valor medido de quilogramas para Newton através da multiplicação pela aceleração gravítica, garantindo a correspondência física entre as medições experimentais e as grandezas simuladas numericamente. Os dados foram adquiridos em tempo real (Figura 3.5), registando-se a variação da força propulsiva ao longo de múltiplos ciclos. A disposição física e elétrica dos componentes, incluindo a ligação ao HX711 e ao servomotor, encontra-se ilustrada na Figura 3.6. Este procedimento experimental permitiu comparar diretamente os valores de *thrust* obtidos numericamente com aqueles medidos fisicamente, avaliando a validade e a aplicabilidade prática da cinemática ótima identificada na análise paramétrica.

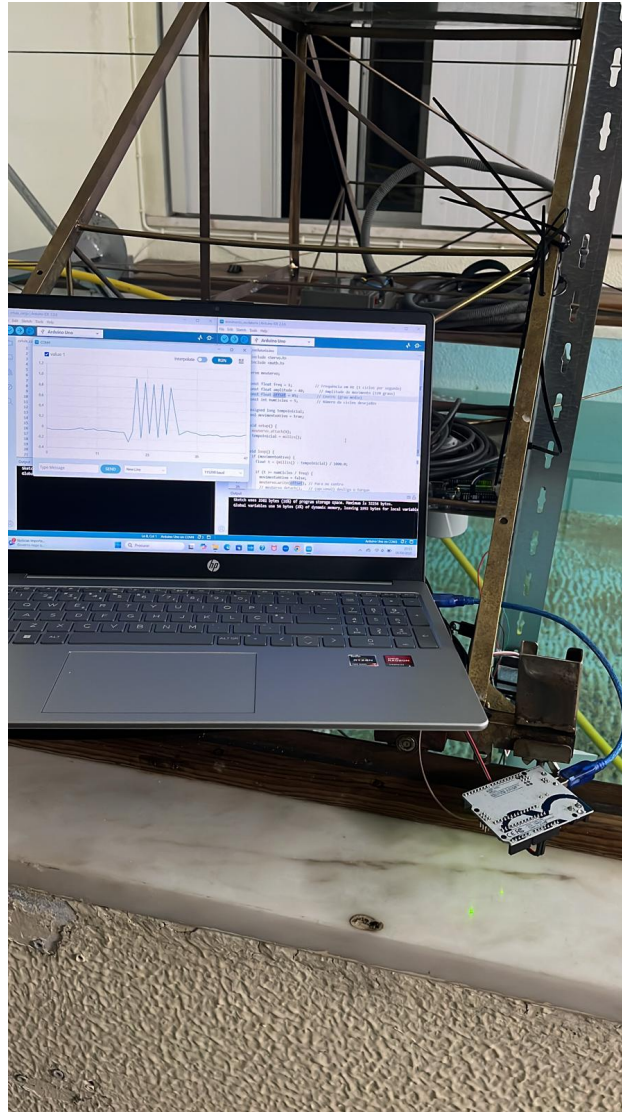


FIGURA 3.5: Ligação do sistema ao computador para programação e aquisição de dados.

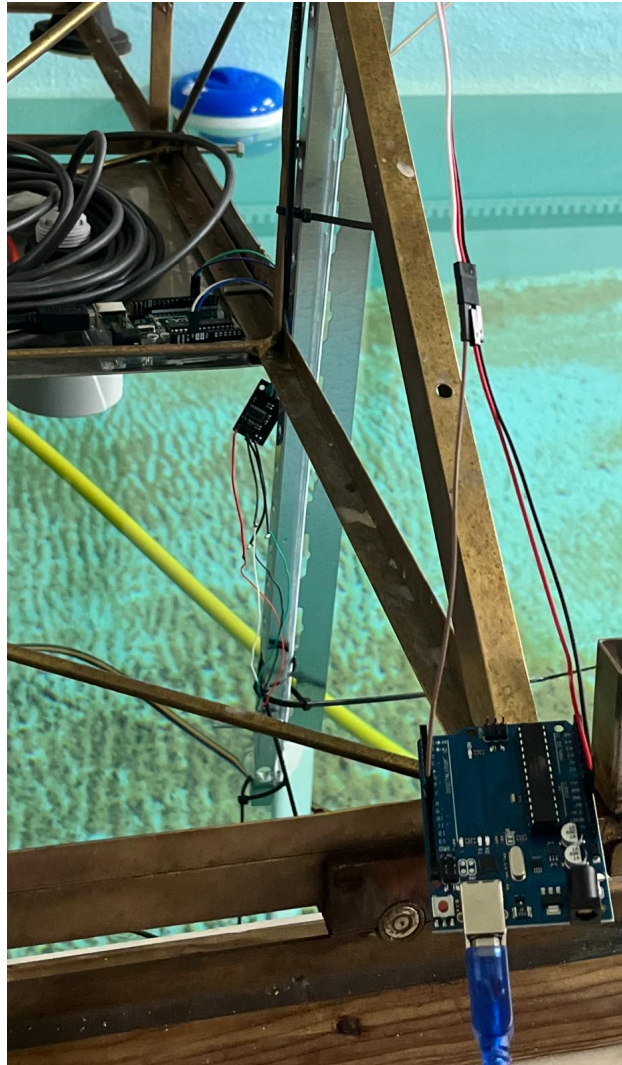


FIGURA 3.6: Vista geral dos dois microcontroladores *Arduino Uno* e ligações elétricas.

Capítulo 4

Apresentação e Discussão de Resultados

4.1 Comparação dos Cinco Perfis NACA

Com o objetivo de identificar o perfil hidrodinâmico mais eficiente para aplicação no sistema propulsivo do PETINGA, foram realizadas simulações numéricas considerando cinco perfis NACA distintos: NACA 2412, NACA 0015, NACA 0014, NACA 0012 e NACA 2408. A avaliação do desempenho baseou-se em dois indicadores principais: a razão entre o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto (C_L/C_D) e o valor médio da força de propulsão gerada ao longo do tempo.

Utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3, a Tabela 4.1 apresenta os valores médios obtidos em regime estacionário para cada um dos perfis analisados.

TABELA 4.1: Valores médios da razão C_L/C_D e da força de propulsão para os perfis NACA simulados.

Perfil NACA	2412	0015	0014	0012	2408
C_L/C_D médio	2,4432	-1,9172	6,5514	1,6118	-12,3984
Força de Propulsão média (N)	2,4895	2,4412	2,4824	2,4920	2,4782

A discretização temporal das simulações consistiu em 400 passos de tempo, com tamanho de passo $\Delta t = 0,01$ s. Em cada passo de tempo, foram realizadas no máximo 20 iterações para atingir os critérios de convergência estabelecidos (resíduos $< 10^{-5}$ para continuidade e $< 10^{-6}$ para momento). As variáveis de interesse foram reportadas a cada 20 passos de tempo, garantindo um registo detalhado da evolução das forças e coeficientes hidrodinâmicos.

O tempo computacional total por simulação foi de aproximadamente 2 horas, utilizando o computador descrito anteriormente. Observou-se que a escolha de $t = 0,01$ s e do número máximo de iterações permitiu um bom equilíbrio entre precisão numérica e tempo de CPU, mantendo os resultados estáveis e dentro dos critérios de convergência.

Para além dos valores médios, foram analisadas as séries temporais de C_L/C_D e da força de propulsão (*thrust*) para cada perfil, representadas nas Figuras 4.1–4.5. Estas curvas permitem avaliar a estabilidade, a coerência do escoamento e a consistência da geração de impulso ao longo dos ciclos.

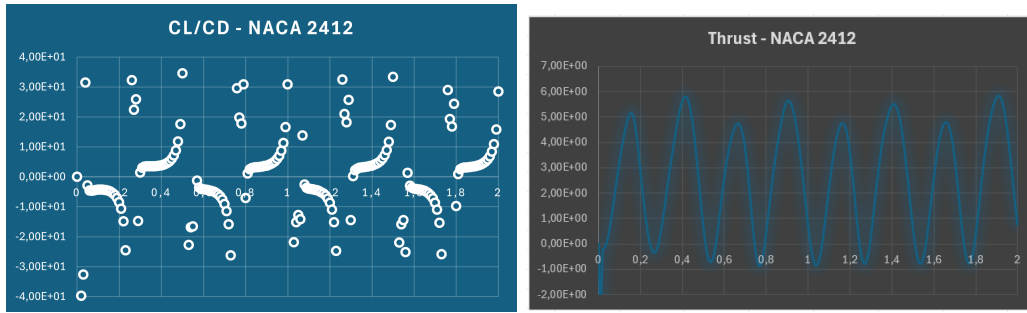


FIGURA 4.1: Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e *thrust* (dir.) para o perfil NACA 2412.

A análise do perfil NACA 2412 (Figura 4.1) evidencia valores médios razoáveis de C_L/C_D , ainda que acompanhados por oscilações significativas ao longo do ciclo. O *thrust* mantém-se positivo e relativamente estável, sem apresentar, no entanto, vantagens expressivas face aos restantes perfis.

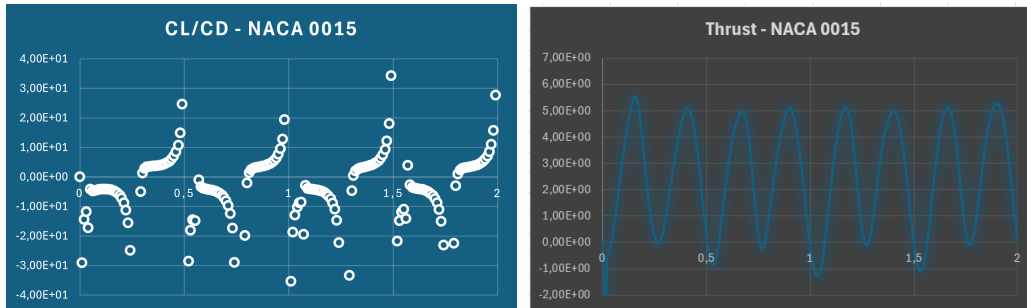


FIGURA 4.2: Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e *thrust* (dir.) para o perfil NACA 0015.

O perfil NACA 0015 (Figura 4.2) revelou um desempenho negativo em termos de C_L/C_D (valor médio da razão C_L/C_D negativo), indicando comportamento desfavorável do ponto de vista hidrodinâmico. Apesar de a força propulsiva média se

4.1. Comparação dos Cinco Perfis NACA

manter próxima da registrada para outros perfis, a ineficiência evidenciada na relação sustentação/arrasto compromete a sua aplicação prática.

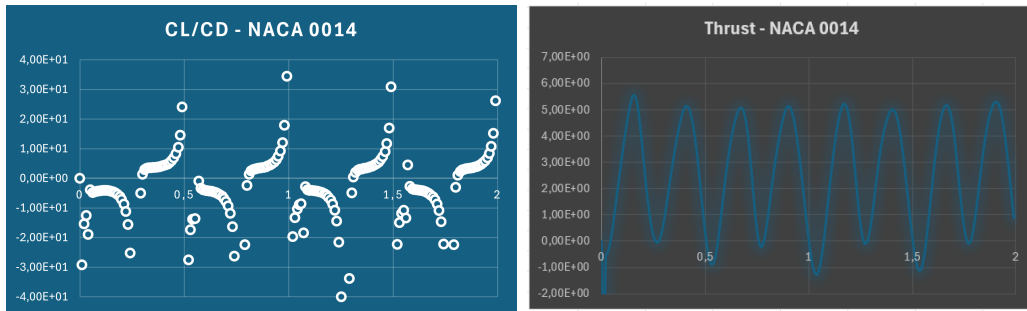


FIGURA 4.3: Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e $thrust$ (dir.) para o perfil NACA 0014.

O NACA 0014 (Figura 4.3) destacou-se de forma clara, apresentando o valor médio mais elevado de C_L/C_D , associado a uma evolução temporal mais estável e consistente. O $thrust$ registrado é comparável ao dos restantes perfis, o que demonstra que a sua superioridade não reside na magnitude da força propulsiva, mas sim na maior eficiência energética do escoamento.

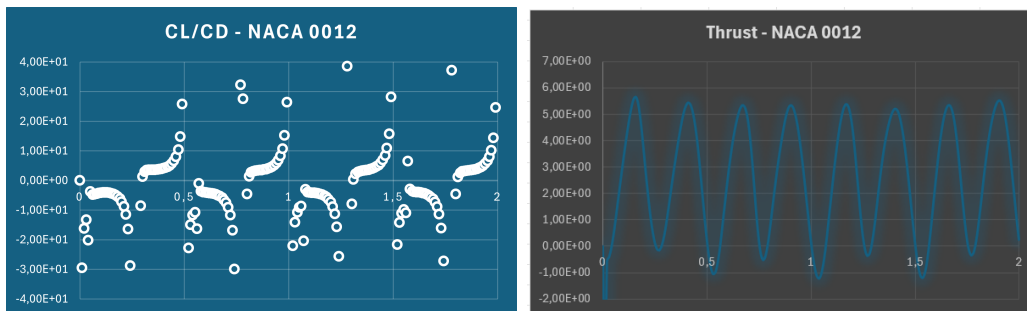


FIGURA 4.4: Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e $thrust$ (dir.) para o perfil NACA 0012.

No caso do perfil NACA 0012 (Figura 4.4), os valores médios de C_L/C_D são positivos, embora substancialmente inferiores aos do NACA 0014. A evolução temporal apresenta oscilações mais acentuadas, o que traduz menor estabilidade hidrodinâmica. O $thrust$ médio, contudo, figura entre os mais elevados, evidenciando tratar-se de um perfil com desempenho competitivo, ainda que não o mais adequado.

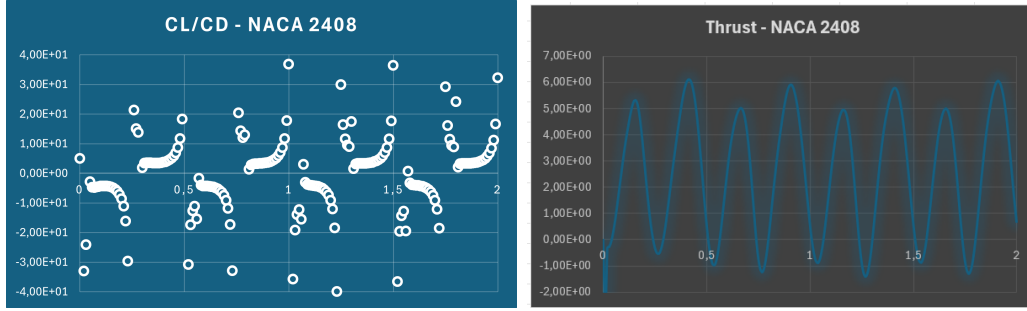


FIGURA 4.5: Evolução temporal de C_L/C_D (esq.) e $thrust$ (dir.) para o perfil NACA 2408.

Finalmente, o perfil NACA 2408 (Figura 4.5) apresentou o pior desempenho global, com valores médios negativos de C_L/C_D e oscilações irregulares ao longo do tempo, indicativas de instabilidade no escoamento. Embora o $thrust$ médio seja semelhante ao dos restantes perfis, a sua reduzida eficiência hidrodinâmica inviabiliza a sua utilização.

De acordo com o estudo de Alberti, Carnevali, Costa e Crivellini 2023, à medida que o valor da sustentação ultrapassa o do arrasto, a eficiência propulsiva aproxima-se de 1. Em contrapartida, quando a razão C_L/C_D diminui, a eficiência degrada-se em virtude da crescente influência negativa do arrasto, tanto na direção longitudinal como transversal.

A análise realizada demonstra que, embora os valores médios de $thrust$ sejam semelhantes entre os perfis, a razão C_L/C_D distingue de forma clara a eficiência hidrodinâmica. O NACA 0014 destacou-se de forma expressiva, apresentando a maior capacidade de gerar sustentação com arrasto reduzido, justificando a sua escolha para etapas subsequentes.

4.2 Análise do Movimento Ótimo para o Perfil NACA 0014

Após a seleção do perfil NACA 0014 como o mais promissor, procedeu-se ao estudo do seu desempenho sob diferentes condições de oscilação, variando a frequência entre 0,5 Hz e 2 Hz e a amplitude angular entre 10° e 40°. O objetivo principal consistiu em determinar o movimento mais adequado para maximizar a força propulsiva.

Utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.2 que consistem nos valores médios de força de propulsão

(*thrust*) e de velocidade induzida, medida a 50 mm a jusante do bordo de fuga, correspondendo a metade da corda do perfil.

TABELA 4.2: Valores médios de *thrust* e velocidade para o perfil NACA 0014 em diferentes condições de frequência e amplitude.

Frequência (Hz)	Amplitude (°)	Thrust médio (N)	Velocidade média (m/s)
2,0	10	1,0330	0,1352
2,0	20	1,0400	0,1352
2,0	30	8,8001	0,2769
2,0	40	13,0468	0,3990
1,5	10	0,5888	0,0859
1,5	20	2,4992	0,1649
1,5	30	5,2860	0,2332
1,5	40	8,1111	0,2793
1,0	10	0,2624	0,0428
1,0	20	1,1448	0,1105
1,0	30	2,5386	0,1675
1,0	40	4,2524	0,1519
0,5	10	0,0677	0,0060
0,5	20	0,3133	0,0183
0,5	30	0,7660	0,0390
0,5	40	1,3278	0,0449

A análise evidencia que a força de propulsão média cresce de forma significativa com a amplitude e, em menor grau, com a frequência. A 2 Hz, o *thrust* evolui de aproximadamente 1 N a 10° para mais de 13 N a 40°. A velocidade induzida segue tendência semelhante, atingindo 0,40 m/s para 2 Hz e 40°.

A medição da velocidade foi realizada a 50 mm a jusante do bordo de fuga, correspondendo a metade da corda (100 mm). Esta escolha permitiu caracterizar o escoamento numa região em que os efeitos imediatos da esteira turbulenta já se encontravam parcialmente dissipados, garantindo uma medição mais estável e representativa da intensidade do jato propulsivo.

Os gráficos temporais de *thrust* e velocidade encontram-se reunidos no Apêndice D, permitindo analisar em detalhe a natureza oscilatória do escoamento

e a relação entre a formação vorticosa e as variações instantâneas das forças hidrodinâmicas.

Conclui-se que amplitudes elevadas, associadas a frequências próximas de 2 Hz, potenciam os maiores valores de propulsão. A condição de 2 Hz e 40° mostrou-se a mais eficiente, embora combinações intermédias, como 1,5 Hz e 30°, representem soluções de compromisso entre desempenho e consumo energético.

4.2.1 Comparação Entre os Perfis NACA 0012 e NACA 0014

Embora a análise inicial tenha identificado o NACA 0014 como o perfil mais promissor, verificou-se que o NACA 0012 apresentava valores médios ligeiramente superiores de força propulsiva na comparação global. Este facto motivou a realização de uma análise adicional, de modo a despistar a possibilidade de o NACA 0012 se revelar mais adequado.

Utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3, as simulações centraram-se nos dois movimentos em que o NACA 0014 apresentou maior *thrust* médio: 2 Hz a 30° e 2 Hz a 40°. A Tabela 4.3 resume os resultados obtidos.

TABELA 4.3: Comparação do *thrust* médio dos perfis NACA 0012 e NACA 0014 para diferentes movimentos.

Movimento	NACA 0012 (N)	NACA 0014 (N)	Diferença (%)
2 Hz – 30°	8,6900	8,8001	+1,27%
2 Hz – 40°	12,6348	13,0468	+3,26%

Apesar de o NACA 0012 apresentar valores competitivos de propulsão, o NACA 0014 revelou desempenho superior em ambos os movimentos, com ganhos de 1,27% e 3,26%. A diferença acentua-se quando se considera a razão C_L/C_D : 1,61 para o NACA 0012 face a 6,55 para o NACA 0014, evidenciando maior capacidade deste último em converter o movimento oscilatório em impulso útil.

A explicação reside no comportamento da esteira vorticosa. Perfis menos eficientes, como o NACA 0012, induzem vorticidade mais intensa (regiões em vermelho/laranja da Figura 4.6) e desorganizada, aumentando as perdas energéticas. Pelo contrário, o NACA 0014 promove formações mais alinhadas com a direção de avanço e a transição do núcleo vorticoso para o escoamento circundante é mais suave (como

está expresso na Figura 4.7), potenciando a aceleração do jato na esteira e a eficiência propulsiva. Este fenómeno está em consonância com o discutido por Alberti, Carnevali, Costa e Crivellini 2023, que destacam a importância da maximização da razão C_L/C_D na eficiência global de sistemas propulsivos biomiméticos.

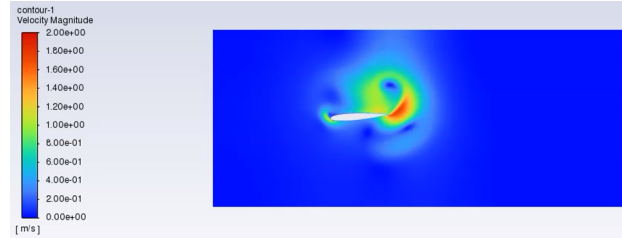


FIGURA 4.6: Campo de velocidades em torno do perfil NACA 0012 durante movimento oscilatório (2 Hz, $\pm 30^\circ$).

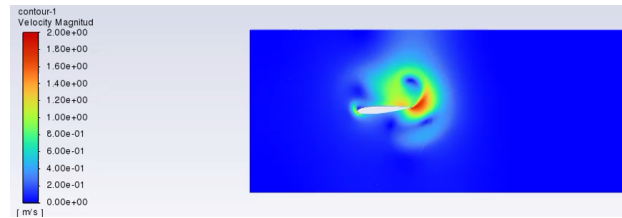


FIGURA 4.7: Campo de velocidades em torno do perfil NACA 0014 durante movimento oscilatório (2 Hz, $\pm 30^\circ$).

Assim, embora os valores de *thrust* médio sejam próximos, a superioridade do NACA 0014 em termos de eficiência hidrodinâmica confirma-o como a escolha mais adequada, assegurando não só maior propulsão em condições de desempenho máximo, mas também melhor aproveitamento energético.

Este resultado consolida o perfil NACA 0014 como a solução mais robusta e indicada para implementação como barbatana propulsiva no PETINGA.

4.3 Ensaio Experimental do Movimento Ótimo

Após a identificação do movimento de 2 Hz e 40° de amplitude como o mais eficiente para o perfil NACA 0014 nas simulações computacionais, procedeu-se à realização de ensaios experimentais com o objetivo de validar qualitativamente os resultados numéricos obtidos.

Para tal, foi utilizado o aparato experimental descrito no Capítulo 3 (subsecção 3.4.8 - Ensaios Experimentais), recorrendo a uma célula de carga ligada a

um microcontrolador *Arduino*, responsável pela aquisição em tempo real da força propulsiva gerada. Cada ensaio foi conduzido sob as mesmas condições de operação, tendo sido repetido três vezes de forma a garantir a reprodutibilidade dos resultados e a reduzir a influência de eventuais flutuações experimentais.

As Figuras 4.8–4.10 apresentam os registos obtidos para os três ensaios realizados.

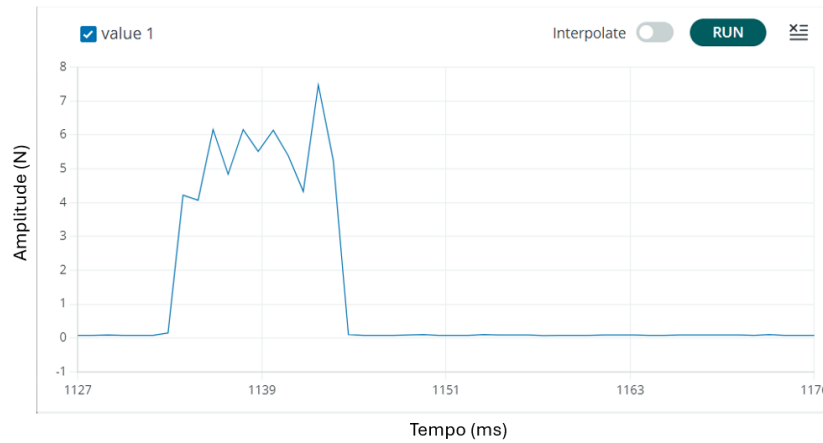


FIGURA 4.8: Registo experimental da evolução temporal do *thrust* para o movimento de 2 Hz e 40° (Ensaio 1).

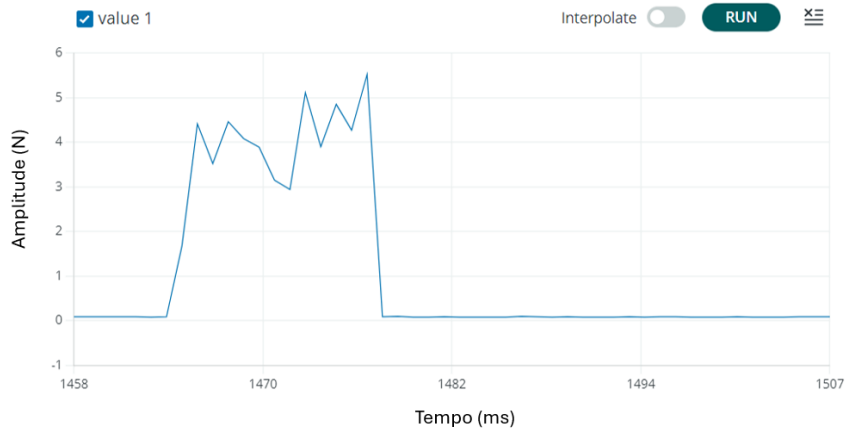


FIGURA 4.9: Registo experimental da evolução temporal do *thrust* para o movimento de 2 Hz e 40° (Ensaio 2).

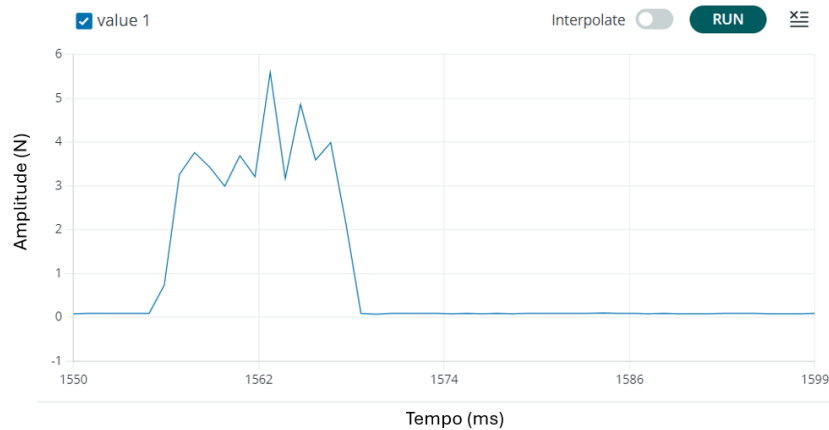


FIGURA 4.10: Registo experimental da evolução temporal do *thrust* para o movimento de 2 Hz e 40° (Ensaio 3).

Observa-se que, em todos os ensaios, a força propulsiva atinge valores de pico semelhantes e apresenta um comportamento oscilatório característico, coerente com o movimento oscilatório imposto ao perfil. Apesar das flutuações associadas ao ruído experimental, a repetição dos ensaios evidencia consistência nos resultados obtidos, confirmando a robustez do aparato experimental.

Contudo, importa salientar que os valores médios de *thrust* obtidos experimentalmente não atingiram os mesmos valores absolutos previstos nas simulações *CFD* (aproximadamente 13 N para este movimento). Esta discrepância pode ser atribuída a diversos fatores:

- **Limitações do aparato experimental:** a célula de carga utilizada apresenta um intervalo de resolução limitado, podendo introduzir incerteza na medição da força instantânea;
- **Condições de contorno reais vs. ideais:** enquanto o *Fluent* considera condições de escoamento controladas e ideais, o ensaio físico está sujeito a turbulência, vibrações e efeitos de parede no tanque de ensaio;
- **Calibração e ruído:** pequenas variações na calibração do sistema de aquisição e o ruído elétrico do microcontrolador podem afetar a precisão dos dados registados.

Apesar destas limitações, os ensaios experimentais confirmaram qualitativamente a tendência observada nas simulações numéricas: movimentos com elevada frequência e amplitude resultam em maiores valores de *thrust*, sendo o movimento de 2 Hz e 40° o mais eficiente. Do ponto de vista biomimético, este comportamento

é coerente com espécies nadadoras rápidas, que utilizam movimentos de alta amplitude e frequência para gerar jatos propulsivos alinhados e energeticamente eficientes. Assim, a análise experimental reforça a conclusão de que o perfil NACA 0014 constitui a escolha mais adequada para integrar o sistema de propulsão do PETINGA.

Capítulo 5

Conclusão e Perspetivas de Trabalho Futuro

O presente trabalho teve como objetivo principal a análise, seleção e validação de um perfil hidrodinâmico adequado para integrar o sistema propulsivo do veículo PETINGA do projeto SABUVIS, tendo em vista a aplicação de barbata-nas oscilatórias inspiradas em princípios biomiméticos. Para tal, foram realizadas simulações numéricas em *CFD*, recorrendo ao *ANSYS Fluent*, seguidas de ensaios experimentais em tanque de água, de modo a validar qualitativamente os resultados obtidos.

5.1 Conclusões

Da análise efetuada, é possível destacar um conjunto de conclusões relevantes que orientam a escolha do perfil hidrodinâmico mais adequado ao sistema propulsivo do PETINGA. Entre os cinco perfis NACA estudados (NACA 2412, NACA 0015, NACA 0014, NACA 0012 e NACA 2408), o perfil NACA 0014 demonstrou ser o mais eficiente, evidenciando o valor médio mais elevado da razão C_L/C_D (6,55), significativamente superior ao registado pelos restantes perfis. Ainda que o perfil NACA 0012 tenha apresentado valores competitivos de *thrust* médio, verificou-se que o NACA 0014 foi capaz de gerar forças propulsivas superiores nas condições de desempenho máximo, confirmando assim a sua maior eficiência hidrodinâmica. A análise paramétrica realizada permitiu ainda concluir que movimentos de elevada frequência e amplitude potenciam o aumento do impulso gerado, sendo o caso de 2 Hz e 40° aquele que se destacou como o mais eficiente, com um valor médio de *thrust* próximo de 13 N nas simulações numéricas.

Os ensaios experimentais, conduzidos com recurso a uma célula de carga e a um sistema de aquisição baseado em *Arduino*, corroboraram qualitativamente as tendências observadas nas simulações, embora os valores absolutos se tenham revelado inferiores, consequência das limitações inerentes ao aparato experimental e das diferenças existentes entre as condições de contorno reais e as idealizadas numericamente. Em termos globais, a metodologia desenvolvida demonstrou de forma clara a viabilidade da aplicação de barbatanas oscilatórias como solução propulsiva no PETINGA, conciliando simplicidade construtiva, eficiência hidrodinâmica e inspiração biomimética, o que reforça o potencial desta abordagem no desenvolvimento de veículos subaquáticos autónomos mais eficientes e adaptados a missões de elevada exigência.

5.2 Perspetivas de Trabalho Futuro

Apesar dos resultados promissores alcançados, este trabalho abre espaço a diversas oportunidades de desenvolvimento e aprofundamento, tanto a nível experimental como numérico e de aplicação prática. No que respeita ao aprimoramento experimental, torna-se essencial conceber um aparato mais robusto e versátil, recorrendo a células de carga com maior resolução e a sistemas de aquisição de dados menos ruidosos, assim como à utilização de tanques de maiores dimensões, de modo a reduzir a influência dos efeitos de parede e da turbulência induzida. A integração de técnicas avançadas, como a visão artificial ou a velocimetria por imagem de partículas (PIV), permitiria caracterizar com maior detalhe a esteira vorticosa gerada e, consequentemente, validar de forma mais precisa os resultados numéricos. Acresce a necessidade de explorar diferentes comprimentos de corda do perfil, de forma a compreender a influência desta dimensão no desempenho hidrodinâmico, bem como a utilização de materiais mais maleáveis na construção das barbatanas experimentais, uma vez que, até ao momento, os ensaios se restringiram ao estudo de um corpo rígido, não refletindo totalmente o comportamento observado na natureza. Neste mesmo contexto, poderá ainda ser implementado um sistema experimental com dois servomotores, possibilitando a reprodução de movimentos ainda mais semelhantes aos das tartarugas marinhas, aproximando o modelo biomimético da realidade.

Do ponto de vista da modelação numérica, importa evoluir para simulações mais avançadas, nomeadamente através da utilização de modelos de turbulência como o LES (*Large Eddy Simulation*). A análise de movimentos combinados, como a conjugação de *heave* e *pitch*, frequentemente observados em organismos aquáticos, poderá igualmente revelar ganhos adicionais de eficiência.

No que concerne à integração prática, a aplicação do perfil NACA 0014 em escala reduzida no PETINGA constitui a evolução natural desta investigação, permitindo validar a sua eficiência em ambiente subaquático real, avaliar a manobrabilidade do veículo com barbatanas como principais superfícies propulsivas e analisar a durabilidade e fiabilidade do sistema em missões de maior duração. A vertente energética surge também como aspeto de relevância crescente, impondo a necessidade de quantificar o consumo associado ao atuador responsável pelo movimento oscilatório em diferentes regimes, de comparar a eficiência global face a sistemas propulsivos convencionais como o hélice, e ainda de investigar soluções de recuperação energética, nomeadamente através da exploração de correntes de maré.

Por último, importa destacar as aplicações futuras em perspetiva mais ampla, como a possibilidade de desenvolver formações de veículos subaquáticos em *swarm*, explorando as barbatanas propulsivas para ganhos coletivos de eficiência à semelhança dos cardumes, ou a adaptação desta tecnologia a diferentes escalas, desde microrrobôs bio-inspirados para monitorização ambiental até veículos de maior porte para exploração oceânica. A introdução de controladores inteligentes que ajustem em tempo real a frequência e a amplitude da oscilação em função das condições ambientais constitui igualmente uma linha promissora para o aumento da autonomia operacional.

Bibliografia

- Alberti, Luca, Emanuele Carnevali, Daniele Costa e Andrea Crivellini (2023). «A computational fluid dynamics investigation of a flapping hydrofoil as a thruster». Em: *Biomimetics* 8.2. DOI: 10.3390/biomimetics8020135.
- ANSYS Inc. (2021). *ANSYS Fluent Theory Guide*.
- António, Tiago Manuel Gonçalves (2022). *Projeto SABUVIS: Desenvolvimento de um modelo matemático de um veículo não tripulado de subsuperfície biomimético*. Rel. téc. Escola Naval, pp. 1–104.
- Apalkov, A., R. Fernández, J. G. Fontaine, T. Akinfiyev e M. Armada (2012). «Mechanical actuator for biomimetic propulsion and the effect of the caudal fin elasticity on the swimming performance». Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 178, pp. 164–174. DOI: 10.1016/j.sna.2012.01.022.
- Arduino (2013). *Servo Library*. Biblioteca oficial do Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/servo/>.
- (2025). *Arduino IDE*. Versão 2.3.6. Ambiente de Desenvolvimento Integrado para microcontroladores Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/en/software/>.
- Budiyono, Agus (2009). «Advances in unmanned underwater vehicles technologies: Modeling, control and guidance perspectives». Em: *Indian Journal of Marine Sciences* 38.3, pp. 282–295.
- Cantwell, Brian J. (2008). *The NACA airfoil series*. Rel. téc. Stanford University.
- Chu, Yichen, Yahui Wang, Zhifeng Lv, Xiaohao Li, Mingxu Ma, Cuilan Zhu, Tianbiao Yu e Dayu Zhang (2024). *Design and implementation of a bionic underdriven sea turtle hydrofoil*. SSRN preprint. Preprint, not peer reviewed. URL: <https://ssrn.com/abstract=4583204>.
- Chu, Yichen, Yahui Wang, Zhifeng Lv, Yang Zhou, Xiaohao Li, Mingxu Ma, Cuilan Zhu e Tianbiao Yu (2025). «An innovative underdriven multi-degree-of-freedom sea turtle hydrofoil design». Em: *Bioinspiration and Biomimetics* 20.3. DOI: 10.1088/1748-3190/adc5be.
- Costa Godinho, Sandra Raquel da (2014). «Dimensionamento e simulação de um robô anfíbio biomimético». Tese de mestrado. Instituição não indicada.

- D'ubaldo, O., C. M. Rizzo, D. Dessi e F. Passacantilli (2021). *Low mass ratio hydrofoil flutter experimental model design procedure (MARINE 2021)*. Rel. téc. DITEN, Università degli Studi di Genova.
- Dagenais, Paule e Christof M. Aegerter (2019). *Hydrodynamic stress maps on the surface of a flexible fin-like foil*. arXiv preprint. URL: <https://arxiv.org/abs/1910.09887>.
- Ding, Hao, Qiang Gao, Yawei Zhu, Haipeng Shi, Kai Chen e Ruoqian Chen (2024). «Experimental study on navigation performance of bionic underwater vehicle inspired by sea turtle». Em: *Ocean Engineering* 310. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118700.
- Donini, Marioivane Sabino (2014). «Escoamento sobre o perfil aerodinâmico NACA 4412». Tese de mestrado. Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.
- Ferziger, Joel H., Milovan Perić e Robert L. Street (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 4^a ed. Springer. ISBN: 978-3-030-51007-1. DOI: 10.1007/978-3-030-51008-8.
- Font, Davinia, Marcel Tresanchez, Cedric Siegentahler, Tomàs Pallejà, Mercè Teixidó, Cedric Pradalier e Jordi Palacin (2011). «Design and implementation of a biomimetic turtle hydrofoil for an autonomous underwater vehicle». Em: *Sensors* 11.12, pp. 11168–11187. DOI: 10.3390/s111211168.
- Golson, Jordan (2014). *The Navy's new robot looks and swims just like a shark*. URL: <https://www.wired.com/2014/12/navy-ghostswimmer-robot-fish/>.
- Jesus Silva, Marco António de (2018). «Estudo dos Padrões de Vorticidade na Esteira de uma Asa em Movimento de Translação». Tese de mestrado. Universidade da Beira Interior.
- Katti, Purshotham, Omkar Bilawar, Shreya Agasagi e Rohit Patil (2024). «Selecting the optimal cross-section for control surface of underwater vehicle». Em: *Tuijin Jishu / Journal of Propulsion Technology* 45.2, pp. 1001–4055.
- Konno, Akihisa, Takuro Furuya, Akisato Mizuno, Kazuhisa Hishinuma, Koichi Hirata e Masakuni Kawada (2006). «Development of turtle-like submersible vehicle». Em: *Journal of the Japan Institute of Marine Engineering* 41, pp. 158–163. DOI: 10.5988/jime.41.si_158.
- Kumar, Sushrut, Matthew J. McHenry, Jung-Hee Seo e Rajat Mittal (2025). *Mechanical intelligence in propulsion via flexible caudal fins*. arXiv preprint. URL: <https://arxiv.org/abs/2503.23652>.
- Liu, Geng, Yan Ren, Haibo Dong, Otari Akanyeti, James C. Liao e George V. Lauder (2017). «Computational analysis of vortex dynamics and performance

- enhancement due to body–fin and fin–fin interactions in fish-like locomotion». Em: *Journal of Fluid Mechanics* 829, pp. 65–88. DOI: 10.1017/jfm.2017.533.
- Martínez-Muriel, Carlos, Gonzalo Arranz, Manuel García-Villalba e Oscar Flores (2023). «Fluid–structure resonance in spanwise-flexible flapping wings». Em: *Journal of Fluid Mechanics* 964, A5. DOI: 10.1017/jfm.2023.308.
- Menter, Florian R. (1992). *Improved two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows*. Rel. téc. NASA-TM-103975. NASA Ames Research Center.
- Piskur, Pawel, Piotr Szymak, Zygmunt Kitowski e Leszek Flis (2020). «Influence of fin’s material capabilities on the propulsion system of biomimetic underwater vehicle». Em: *Polish Maritime Research* 27.4, pp. 179–185. DOI: 10.2478/pomr-2020-0078.
- Ram, R. K. Ganesh, Yashaan Nari Cooper, Vishank Bhatia, R. Karthikeyan e C. Periasamy (2014). «Design optimization and analysis of NACA 0012 airfoil using computational fluid dynamics and genetic algorithm». Em: *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 664. Trans Tech Publications, pp. 111–116. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.664.111.
- Rogelio, Alejandro e Prados Murcia (2024). *Experimental study of how the stiffness distribution affects the thrust and the efficiency generated by a caudal fin*. Rel. téc. ETS de Ingeniería ICAI, Universidad Pontificia Comillas.
- Salumäe, Taavi, Rasmus Raag, Jaan Rebane, Andres Ernits, Gert Toming, Mart Ratas e Maarja Kruusmaa (2014). *Design principle of a biomimetic underwater robot U-CAT*. Rel. téc. Projeto ARROWS.
- Shang, W. e J. Horrillo (2021). «Numerical simulation and hydrodynamic performance of oscillating hydrofoils for propulsion». Em: *Marine Systems and Ocean Technology*.
- Szymak, Piotr (2016). «Research on biomimetic underwater vehicles undertaken at institute of electrical engineering and automatics». Em: *Scientific Journal of Polish Naval Academy* 206.3, pp. 107–119. DOI: 10.5604/0860889x.1224752.
- Techet, Alexandra H., Franz S. Hover e Michael S. Triantafyllou (2004). «Review of experimental work in biomimetic foils». Em: *Periódico não indicado*.
- Tillaart, Rob (2020). *HX711 Arduino Library*. Versão 0.6.1. URL: <https://github.com/RobTillaart/HX711>.
- Triantafyllou, Michael, George Triantafyllou e Dick K. P. Yue (2000). *Hydrodynamics of fishlike swimming*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/285599592>.

- Wang, Junshi, Pan Han, Xiaolong Deng, Haibo Dong, Emre Akoz e Keith W. Moored (2018). «Effects of flapping waveforms on the performance of burst-and-coast swimming in viscous flows». Em: *AIAA Aerospace Sciences Meeting*. American Institute of Aeronautics e Astronautics (AIAA). DOI: 10.2514/6.2018-0812.
- Wang, Zixuan, Xin Chang, Lixun Hou, Nan Gao, Weiguan Chen e Yuanxin Tian (2022). «Optimal matching of flapping hydrofoil propulsion performance considering interaction effects of motion parameters». Em: *Journal of Marine Science and Engineering* 10.7. DOI: 10.3390/jmse10070853.
- White, Carl H., George V. Lauder e Hilary Bart-Smith (2021). «Tunabot Flex: A tuna-inspired robot with body flexibility improves high-performance swimming». Em: *Bioinspiration and Biomimetics* 16.2. DOI: 10.1088/1748-3190/abb86d.
- White, Frank M. (2011). *Fluid Mechanics*. 7^a ed. McGraw-Hill.
- White, Frank M. e Joseph Majdalani (2022). *Viscous Fluid Flow*. 4^a ed. McGraw-Hill. ISBN: 978-1-260-59780-6.
- Wu, Xia, Xiantao Zhang, Xinliang Tian, Xin Li e Wenyue Lu (2020). «A review on fluid dynamics of flapping foils». Em: *Ocean Engineering* 195. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106712.
- Yao, Guocai, Jianhong Liang, Tianmiao Wang, Xingbang Yang, Qi Shen, Yucheng Zhang, Hailiang Wu e Weicheng Tian (2013). «Development of a turtle-like underwater vehicle using central pattern generator». Em: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, pp. 44–49. DOI: 10.1109/ROBIO.2013.6739433.
- YouTube (2025). *Vídeos utilizados para apoio à elaboração da dissertação*. Links consultados: <https://www.youtube.com/watch?v=K5tZtIwgxCc>; <https://www.youtube.com/watch?v=eA7Bedg9Y>; <https://www.youtube.com/watch?v=Uktp5lBy0OUlist=PLoiCd82UgHK0oviG93AL9tD9s6m5gkMts>; <https://www.youtube.com/watch?v=3Vsw9Khyvhg>; <https://www.youtube.com/watch?v=W1eTcXMSfuk>. URL: <https://www.youtube.com>.
- Zhang, Zhijun, Qigan Wang e Shujun Zhang (2024). «Review of computational fluid dynamics analysis in biomimetic applications for underwater vehicles». Em: *Biomimetics* 9.2. DOI: 10.3390/biomimetics9020079.
- Zhou, Jing, Yulin Si e Ying Chen (2023). «A review of subsea AUV technology». Em: *Journal of Marine Science and Engineering* 11.6. DOI: 10.3390/jmse11061119.

Apêndice A - Parâmetros de configuração no *Ansys Fluent*

Este apêndice reúne, em formato de captura de ecrã, as principais definições adotadas nas simulações *CFD* realizadas no *ANSYS Fluent*. As Figuras A.1–A.9 documentam as opções de *launcher*, *solver*, métodos e controlos numéricos, inicialização, avanço temporal e condições de fronteira.

A Tabela A.1 sintetiza as opções essenciais empregues.

TABELA A.1: Resumo das principais definições utilizadas nas simulações no *ANSYS Fluent*.

Aspeto	Definição
Dimensão / Espaço	2D, <i>Planar</i>
Precisão	<i>Double Precision</i>
Tipo de solver	<i>Pressure-Based</i>
Formulação de velocidade	Absoluta
Regime temporal	Transiente
Acoplamento p – U	<i>SIMPLE</i> (Rhie–Chow, <i>distance-based</i>)
Discretização espacial	Gradiente: <i>Least Squares Cell-Based</i> Pressão: 2. ordem; Momento: <i>2nd Order Upwind</i> k e ε : <i>1st Order Upwind</i> Energia: <i>2nd Order Upwind</i>
Sub-relaxação	$p = 0,3$; Momento = $0,7$; $k = 0,8$; $\varepsilon = 0,8$
Inicialização	<i>Hybrid Initialization</i>
Avanço temporal	$\Delta t = 0,01$ s; 400 passos; máx. 20 iterações/ passo
Entrada (<i>Velocity Inlet</i>)	Intensidade de turbulência = 5%; razão de viscosidades = 10
Saída (<i>Pressure Outlet</i>)	Pressão manométrica = 0 Pa; mesmos parâmetros de turbulência
Paredes	<i>No-slip</i> ; rugosidade padrão (altura = 0 m)

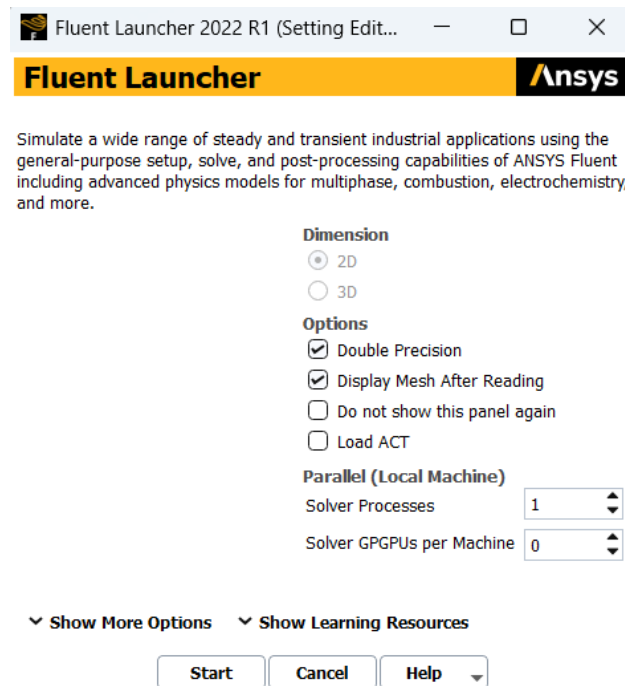


FIGURA A.1: *Fluent Launcher* (precisão dupla, leitura de malha após carregamento).

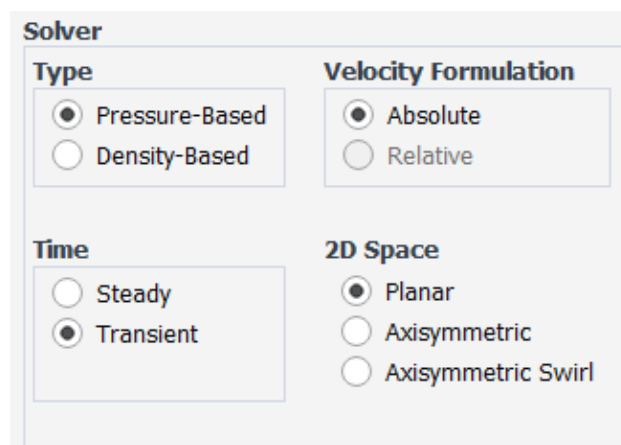


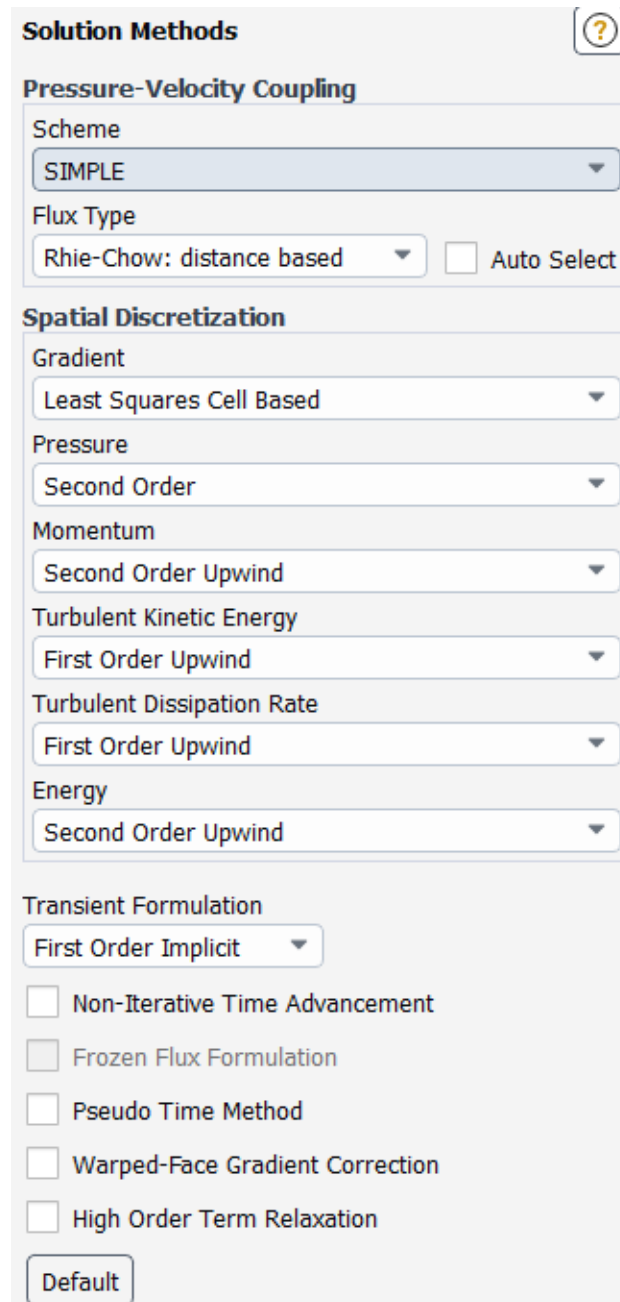
FIGURA A.2: Definições gerais do solver: *Pressure-Based*, transiente, 2D *planar*, formulação absoluta.

Solution Controls 

Under-Relaxation Factors

Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Turbulent Kinetic Energy	0.8
Turbulent Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1
Energy	1

FIGURA A.3: Controlos de solução.



Solution Methods [?]

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
SIMPLE

Flux Type
Rhie-Chow: distance based ☐ Auto Select

Spatial Discretization

Gradient
Least Squares Cell Based

Pressure
Second Order

Momentum
Second Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy
First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate
First Order Upwind

Energy
Second Order Upwind

Transient Formulation

First Order Implicit

☐ Non-Iterative Time Advancement

☐ Frozen Flux Formulation

☐ Pseudo Time Method

☐ Warped-Face Gradient Correction

☐ High Order Term Relaxation

Default

FIGURA A.4: Métodos numéricos: acoplamento $p-U$, esquemas de discretização e formulação transiente.

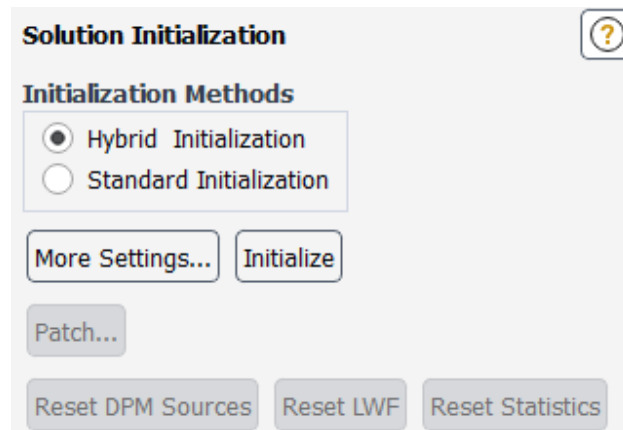


FIGURA A.5: Inicialização da solução: *Hybrid Initialization*.

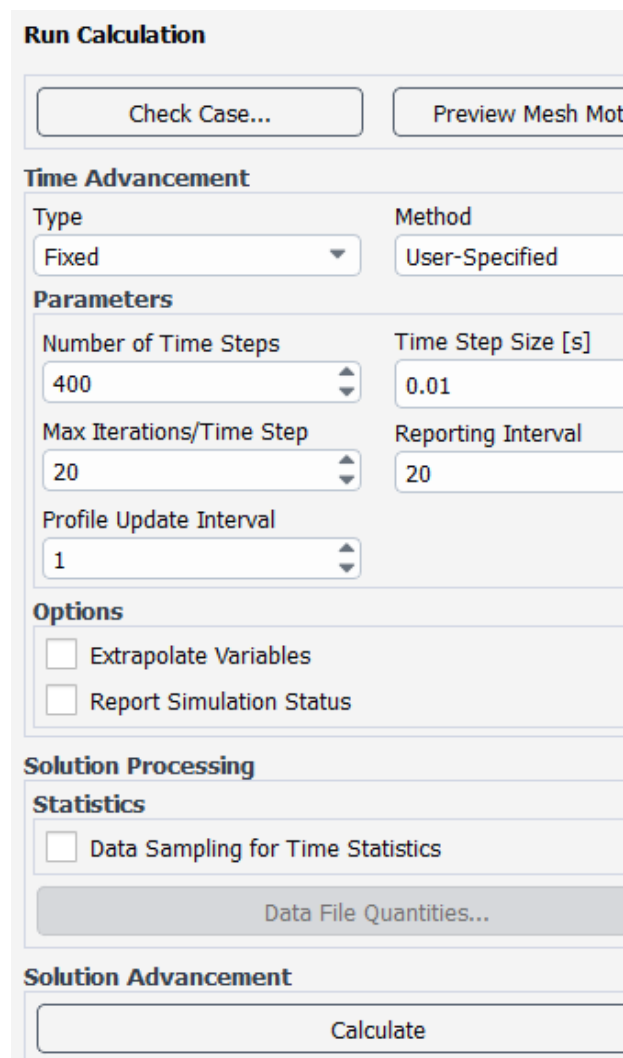
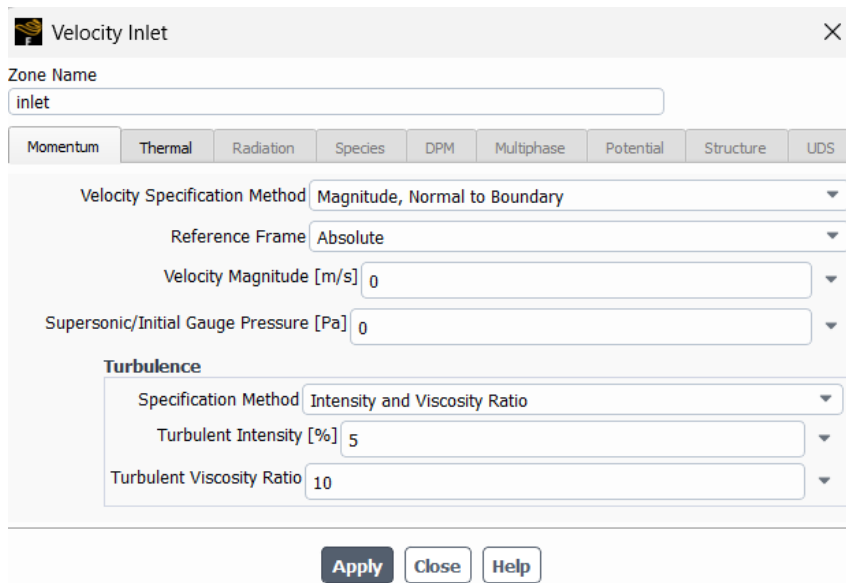


FIGURA A.6: *Run Calculation*: parâmetros de avanço temporal e iterações por passo.



Velocity Inlet

Zone Name: inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude [m/s]: 0

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 0

Turbulence

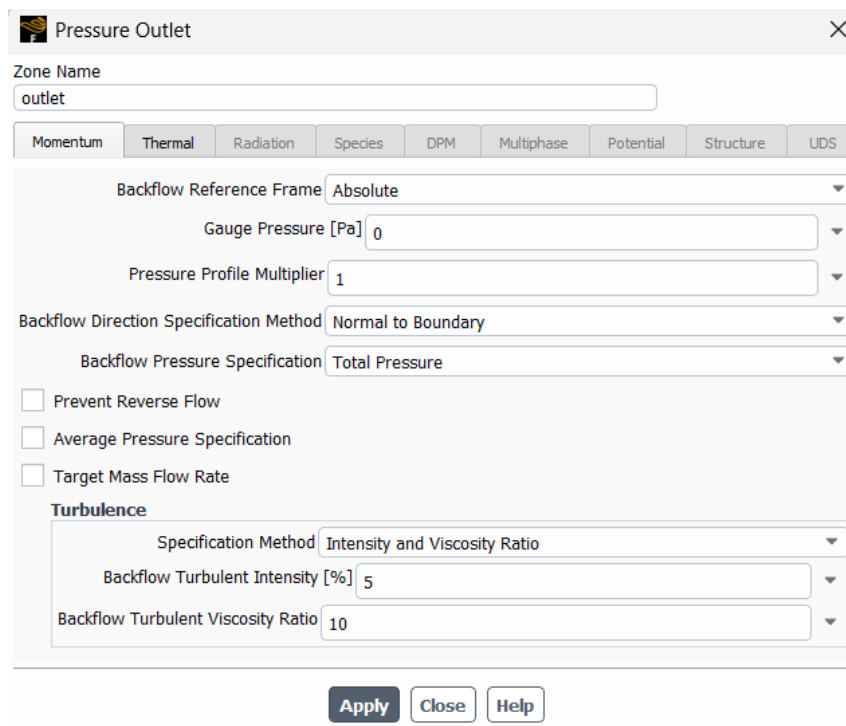
Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%]: 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

FIGURA A.7: Condição de fronteira: *Velocity Inlet* (intensidade de turbulência 5%, razão de viscosidades 10).



Pressure Outlet

Zone Name: outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame: Absolute

Gauge Pressure [Pa]: 0

Pressure Profile Multiplier: 1

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification: Total Pressure

☐ Prevent Reverse Flow

☐ Average Pressure Specification

☐ Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%]: 5

Backflow Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

FIGURA A.8: Condição de fronteira: *Pressure Outlet* (pressão de referência 0 Pa; parâmetros de turbulência).

The image shows the 'Wall' dialog box in Ansys Fluent. The 'Zone Name' is 'walls' and the 'Adjacent Cell Zone' is 'fluid_zone_outlet'. The 'Momentum' tab is selected. Under 'Wall Motion', 'Stationary Wall' is selected. Under 'Motion', 'Relative to Adjacent Cell Zone' is checked. Under 'Shear Condition', 'Specified Shear' is selected. Under 'Shear Stress', both 'X-Component [Pa]' and 'Y-Component [Pa]' are set to 0. Under 'Wall Roughness', 'Standard' is selected. Under 'Sand-Grain Roughness', 'Roughness Height [m]' is 0 and 'Roughness Constant' is 0.5. At the bottom are 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons.

Wall

Zone Name
walls

Adjacent Cell Zone
fluid_zone_outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

Wall Motion Motion

☒ Stationary Wall ☐ Moving Wall

☒ Relative to Adjacent Cell Zone

Shear Condition Shear Stress

☐ No Slip ☒ Specified Shear ☐ Specularity Coefficient ☐ Marangoni Stress

X-Component [Pa] 0
Y-Component [Pa] 0

Wall Roughness Sand-Grain Roughness

☒ Standard ☐ High Roughness (Icing)

Roughness Height [m] 0
Roughness Constant 0.5

Apply Close Help

FIGURA A.9: Condição de fronteira: *Walls* (parede estacionária, *no-slip*, rugosidade padrão).

Apêndice B - *UDF* Implementadas no *Ansys Fluent*

Neste apêndice apresentam-se as *User Defined Functions* (UDF) programadas em C++, utilizadas no *ANSYS Fluent* para impor os movimentos oscilatórios da barbatana. As *UDF* foram compiladas no *Visual Studio* e implementadas no simulador de forma a definir diferentes combinações de frequência e amplitude angular.

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 2.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 15.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
14     cg_vel[2]=0.0;
15
16     cg_omega[0]=0.0;
17     cg_omega[1]=0.0;
18     cg_omega[2]=omega;
19 }
```

CÓDIGO FONTE B.1: UDF para movimento com frequência de 2 Hz e amplitude máxima de 15°

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 2.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 10.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
```

```

13     cg_vel[2]=0.0;
14
15     cg_omega[0]=0.0;
16     cg_omega[1]=0.0;
17     cg_omega[2]=omega;
18 }

```

CÓDIGO FONTE B.2: UDF para movimento com frequência de 2 Hz
e amplitude máxima de 10°

```

1 #include "udf.h"
2 #define Freq 2.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 20.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
14     cg_vel[2]=0.0;
15
16     cg_omega[0]=0.0;
17     cg_omega[1]=0.0;
18     cg_omega[2]=omega;
19 }

```

CÓDIGO FONTE B.3: UDF para movimento com frequência de 2 Hz
e amplitude máxima de 20°

```

1 #include "udf.h"
2 #define Freq 2.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 30.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;

```

```
13 cg_vel[2]=0.0;
14
15 cg_omega[0]=0.0;
16 cg_omega[1]=0.0;
17 cg_omega[2]=omega;
18 }
```

CÓDIGO FONTE B.4: UDF para movimento com frequência de 2 Hz
e amplitude máxima de 30°

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 2.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 40.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12 cg_vel[0]=0.0;
13 cg_vel[1]=0.0;
14 cg_vel[2]=0.0;
15
16 cg_omega[0]=0.0;
17 cg_omega[1]=0.0;
18 cg_omega[2]=omega;
19 }
```

CÓDIGO FONTE B.5: UDF para movimento com frequência de 2 Hz
e amplitude máxima de 40°

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 1.5
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 10.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12 cg_vel[0]=0.0;
13 cg_vel[1]=0.0;
```

```

13     cg_vel[2]=0.0;
14
15     cg_omega[0]=0.0;
16     cg_omega[1]=0.0;
17     cg_omega[2]=omega;
18 }

```

CÓDIGO FONTE B.6: UDF para movimento com frequência de 1.5 Hz e amplitude máxima de 10°

```

1 #include "udf.h"
2 #define Freq 1.5
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 20.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dttime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
14     cg_vel[2]=0.0;
15
16     cg_omega[0]=0.0;
17     cg_omega[1]=0.0;
18     cg_omega[2]=omega;
19 }

```

CÓDIGO FONTE B.7: UDF para movimento com frequência de 1.5 Hz e amplitude máxima de 20°

```

1 #include "udf.h"
2 #define Freq 1.5
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 30.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dttime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;

```

```
13     cg_vel[2]=0.0;
14
15     cg_omega[0]=0.0;
16     cg_omega[1]=0.0;
17     cg_omega[2]=omega;
18 }
```

CÓDIGO FONTE B.8: UDF para movimento com frequência de 1.5 Hz e amplitude máxima de 30°

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 1.5
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 40.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
14     cg_vel[2]=0.0;
15
16     cg_omega[0]=0.0;
17     cg_omega[1]=0.0;
18     cg_omega[2]=omega;
19 }
```

CÓDIGO FONTE B.9: UDF para movimento com frequência de 1.5 Hz e amplitude máxima de 40°

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 1.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 10.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
```

```

13     cg_vel[2]=0.0;
14
15     cg_omega[0]=0.0;
16     cg_omega[1]=0.0;
17     cg_omega[2]=omega;
18 }

```

CÓDIGO FONTE B.10: UDF para movimento com frequência de 1.0 Hz e amplitude máxima de 10°

```

1 #include "udf.h"
2 #define Freq 1.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 20.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
14     cg_vel[2]=0.0;
15
16     cg_omega[0]=0.0;
17     cg_omega[1]=0.0;
18     cg_omega[2]=omega;
19 }

```

CÓDIGO FONTE B.11: UDF para movimento com frequência de 1.0 Hz e amplitude máxima de 20°

```

1 #include "udf.h"
2 #define Freq 1.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 30.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;

```

```
13     cg_vel[2]=0.0;
14
15     cg_omega[0]=0.0;
16     cg_omega[1]=0.0;
17     cg_omega[2]=omega;
18 }
```

CÓDIGO FONTE B.12: UDF para movimento com frequência de 1.0 Hz e amplitude máxima de 30°

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 1.0
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 40.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dttime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
14     cg_vel[2]=0.0;
15
16     cg_omega[0]=0.0;
17     cg_omega[1]=0.0;
18     cg_omega[2]=omega;
19 }
```

CÓDIGO FONTE B.13: UDF para movimento com frequência de 1.0 Hz e amplitude máxima de 40°

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 0.5
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 10.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dttime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
```

```

13     cg_vel[2]=0.0;
14
15     cg_omega[0]=0.0;
16     cg_omega[1]=0.0;
17     cg_omega[2]=omega;
18 }

```

CÓDIGO FONTE B.14: UDF para movimento com frequência de 0.5 Hz e amplitude máxima de 10°

```

1 #include "udf.h"
2 #define Freq 0.5
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 20.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
14     cg_vel[2]=0.0;
15
16     cg_omega[0]=0.0;
17     cg_omega[1]=0.0;
18     cg_omega[2]=omega;
19 }

```

CÓDIGO FONTE B.15: UDF para movimento com frequência de 0.5 Hz e amplitude máxima de 20°

```

1 #include "udf.h"
2 #define Freq 0.5
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 30.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;

```



```
13     cg_vel[2]=0.0;
14
15     cg_omega[0]=0.0;
16     cg_omega[1]=0.0;
17     cg_omega[2]=omega;
18 }
```

CÓDIGO FONTE B.16: UDF para movimento com frequência de 0.5 Hz e amplitude máxima de 30°

```
1 #include "udf.h"
2 #define Freq 0.5
3 #define angular_freq 2.0*M_PI*Freq
4 #define tetmax 40.0*M_PI/180
5
6 DEFINE_CG_MOTION(shm, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
7 {
8     real omega;
9     omega = tetmax*angular_freq*cos(angular_freq*time); /* rotational
10 speed about axis */
11
12     cg_vel[0]=0.0;
13     cg_vel[1]=0.0;
14     cg_vel[2]=0.0;
15
16     cg_omega[0]=0.0;
17     cg_omega[1]=0.0;
18     cg_omega[2]=omega;
19 }
```

CÓDIGO FONTE B.17: UDF para movimento com frequência de 0.5 Hz e amplitude máxima de 40°

Apêndice C - Códigos do Arduino Uno

Neste apêndice apresentam-se os códigos desenvolvidos para os microcontroladores *Arduino Uno* utilizados no aparato experimental. Foram utilizados dois Arduinos: um responsável pelo controlo do servo motor, que gerava o movimento oscilatório da barbatana, e outro dedicado à calibração e aquisição da força medida pela célula de carga em tempo real, através do módulo HX711.

O código abaixo foi utilizado para programar o *Arduino Uno* responsável pelo controlo do servo motor. O movimento é definido por uma função seno, com frequência e amplitude configuráveis. Após um número predefinido de ciclos, o motor retorna para a posição central (*offset*).

```
1 #include <Servo.h>
2 #include <math.h>
3
4 Servo meuServo;
5
6 const float freq = 2;
7 const float amplitude = 40;
8 const float offset = 85;
9 const int numCiclos = 5;
10
11 unsigned long tempoInicial;
12 bool movimentoAtivo = true;
13
14 void setup() {
15     meuServo.attach(9);
16     tempoInicial = millis();
17 }
18
19 void loop() {
20     if (movimentoAtivo) {
21         float t = (millis() - tempoInicial) / 1000.0;
22
23         if (t >= numCiclos / freq) {
24             movimentoAtivo = false;
25             meuServo.write(offset);
26         } else {
27             float angulo = offset + amplitude * sin(2 * PI * freq * t);
28             meuServo.write(angulo);
29         }
30     }
31 }
```

CÓDIGO FONTE C.1: Código do Arduino Uno para controlo do servo motor

O segundo código foi utilizado para programar o *Arduino Uno* ligado ao módulo HX711 e à célula de carga. O programa efetua a calibração inicial, lê as amostras do sensor, converte a massa medida para força (em Newtons) e envia os valores via porta serial em tempo real.

```

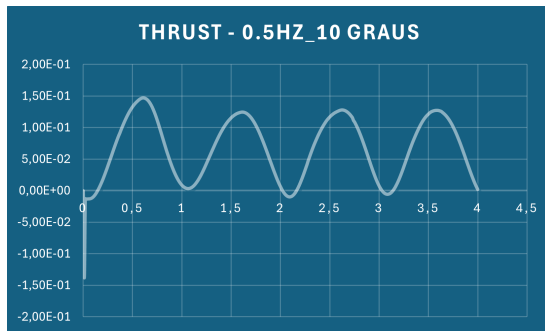
1 #include "HX711.h"
2
3 HX711 scale;
4
5 uint8_t dataPin = 4;
6 uint8_t clockPin = 5;
7
8 float f;
9
10 void setup()
11 {
12     Serial.begin(115200);
13     scale.begin(dataPin, clockPin);
14
15     scale.set_scale(423);
16
17     scale.tare();
18 }
19
20 void loop()
21 {
22     float raw_grams = scale.get_units(5);
23
24     // Converte para Newtons
25     f = (raw_grams / 1000.0) * 9.81;
26
27     Serial.println(f);
28
29     delay(50); // ~20 leituras por segundo
30 }

```

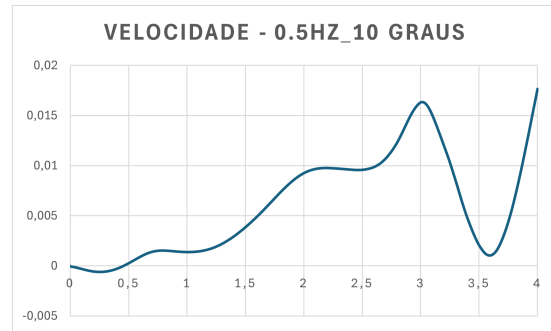
CÓDIGO FONTE C.2: Código do Arduino Uno para aquisição de força com HX711

Apêndice D - Gráficos de *Thrust* e Velocidade do perfil NACA 0014

Neste apêndice reúnem-se os gráficos temporais do *thrust* e da velocidade medida a 50 mm a jusante do bordo de fuga (metade da corda), obtidos nas simulações do perfil NACA 0014. As figuras estão organizadas por frequência e por amplitude angular.

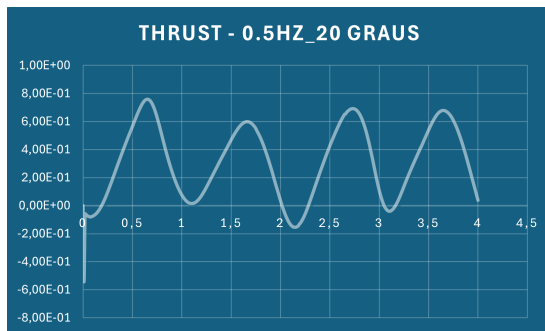


(A) *Thrust* (0,5 Hz; 10°)

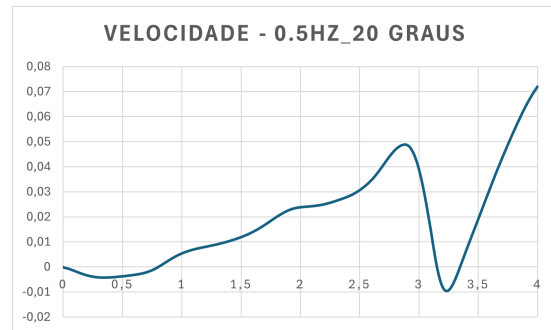


(B) Velocidade (0,5 Hz; 10°)

FIGURA D.1: Resultados para $f = 0,5$ Hz e $\theta = 10^\circ$.

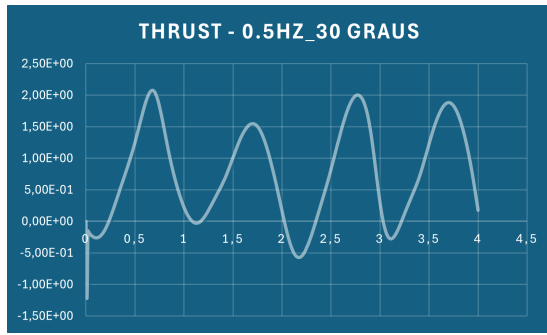


(A) *Thrust* (0,5 Hz; 20°)

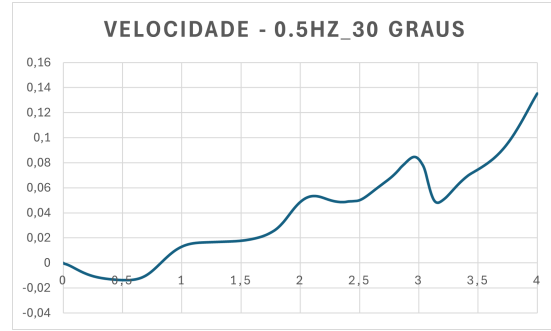


(B) Velocidade (0,5 Hz; 20°)

FIGURA D.2: Resultados para $f = 0,5$ Hz e $\theta = 20^\circ$.

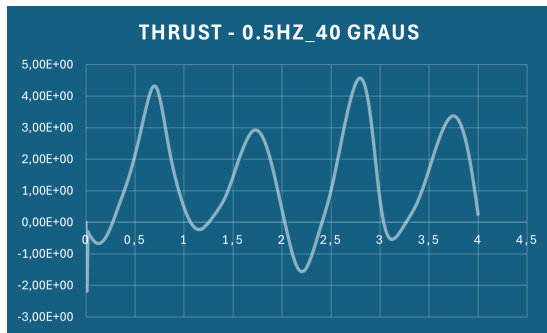


(A) Thrust (0,5 Hz; 30°)

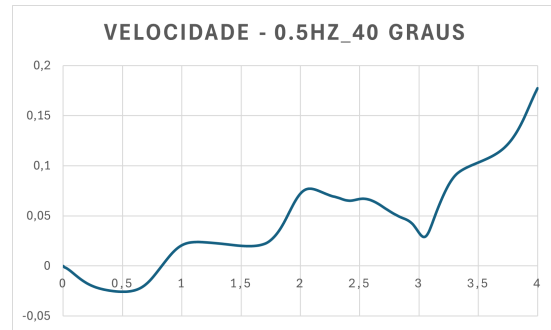


(B) Velocidade (0,5 Hz; 30°)

FIGURA D.3: Resultados para $f = 0,5$ Hz e $\theta = 30^\circ$.

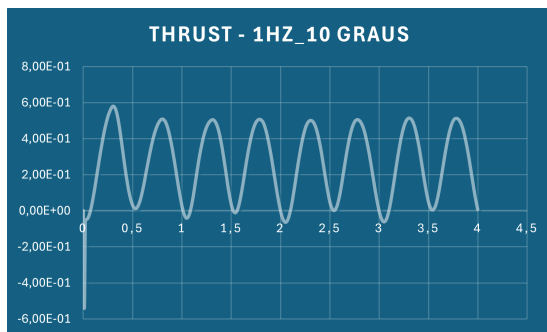


(A) Thrust (0,5 Hz; 40°)

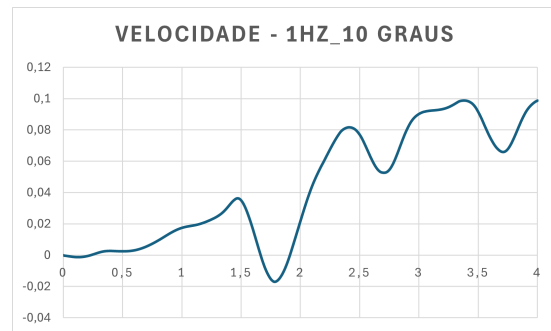


(B) Velocidade (0,5 Hz; 40°)

FIGURA D.4: Resultados para $f = 0,5$ Hz e $\theta = 40^\circ$.

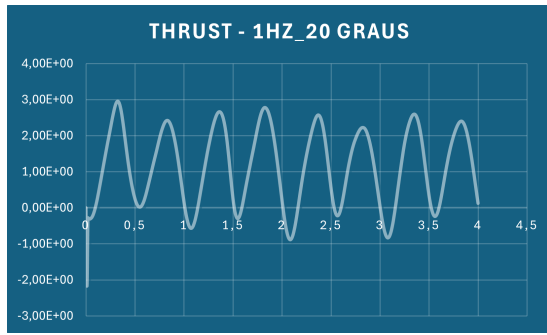


(A) Thrust (1 Hz; 10°)

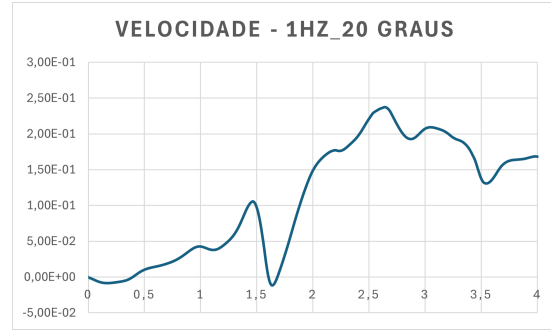


(B) Velocidade (1 Hz; 10°)

FIGURA D.5: Resultados para $f = 1$ Hz e $\theta = 10^\circ$.

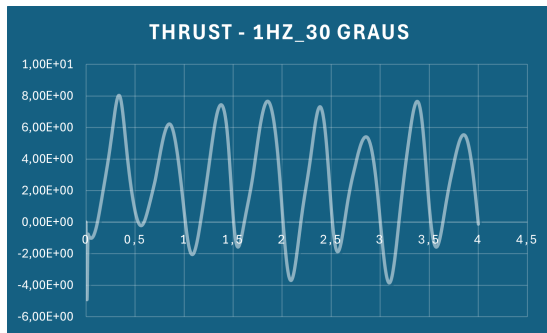


(A) Thrust (1 Hz; 20°)

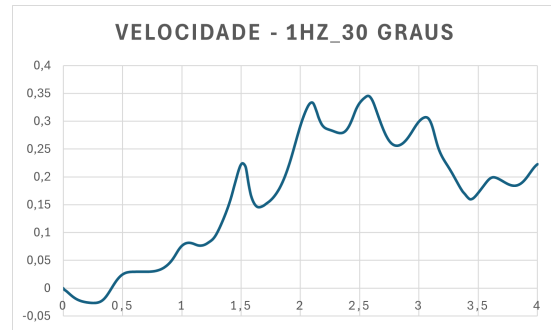


(B) Velocidade (1 Hz; 20°)

FIGURA D.6: Resultados para $f = 1$ Hz e $\theta = 20^\circ$.

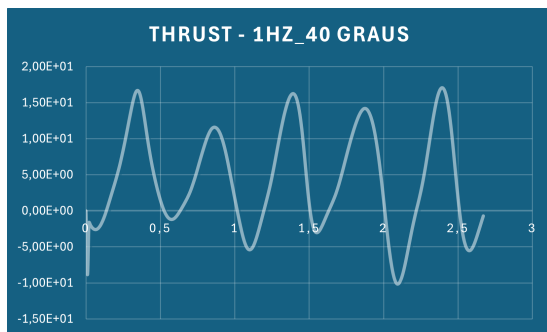


(A) Thrust (1 Hz; 30°)

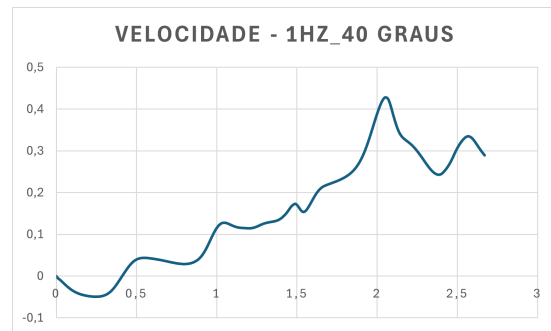


(B) Velocidade (1 Hz; 30°)

FIGURA D.7: Resultados para $f = 1$ Hz e $\theta = 30^\circ$.

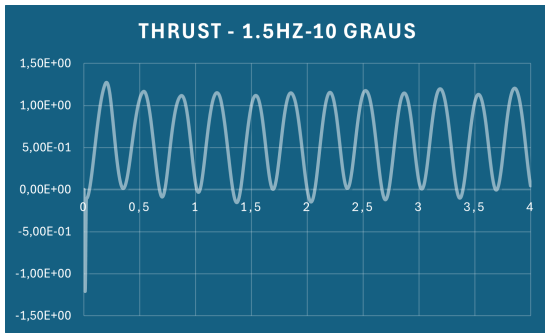


(A) Thrust (1 Hz; 40°)

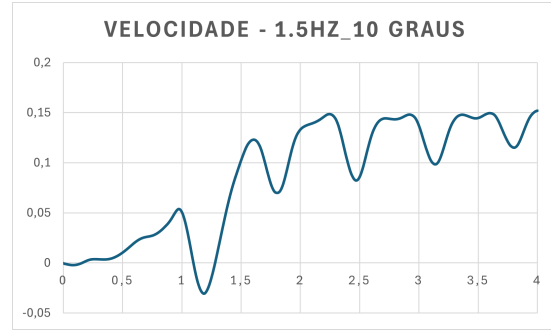


(B) Velocidade (1 Hz; 40°)

FIGURA D.8: Resultados para $f = 1$ Hz e $\theta = 40^\circ$.

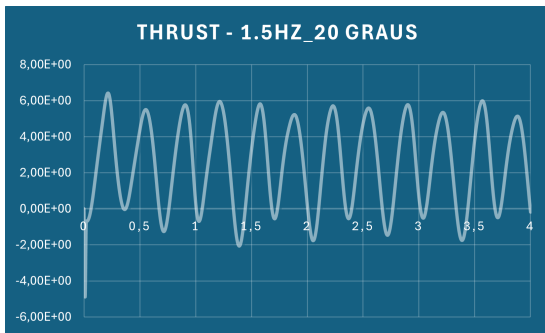


(A) Thrust (1,5 Hz; 10°)

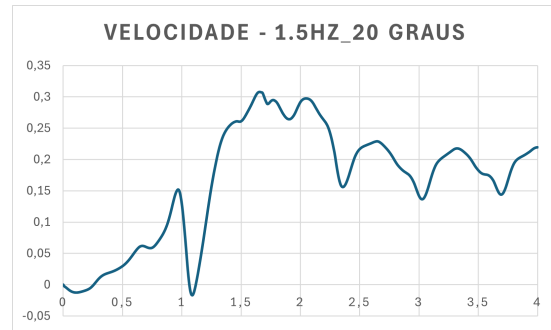


(B) Velocidade (1,5 Hz; 10°)

FIGURA D.9: Resultados para $f = 1,5$ Hz e $\theta = 10^\circ$.

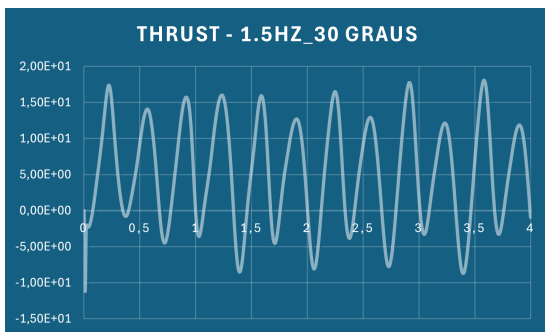


(A) Thrust (1,5 Hz; 20°)

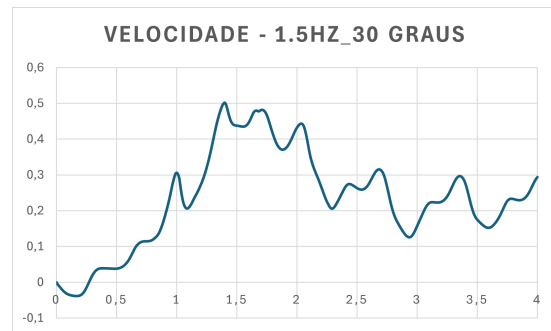


(B) Velocidade (1,5 Hz; 20°)

FIGURA D.10: Resultados para $f = 1,5$ Hz e $\theta = 20^\circ$.

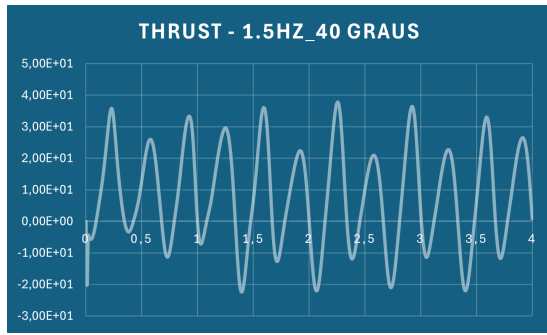


(A) Thrust (1,5 Hz; 30°)



(B) Velocidade (1,5 Hz; 30°)

FIGURA D.11: Resultados para $f = 1,5$ Hz e $\theta = 30^\circ$.

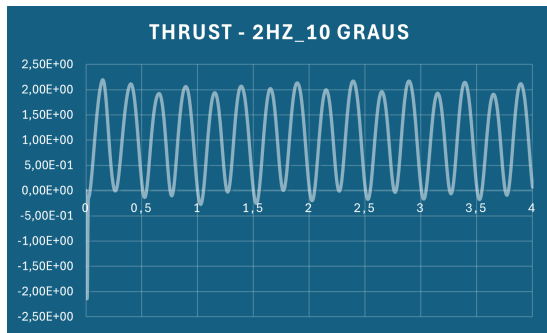


(A) Thrust (1,5 Hz; 40°)

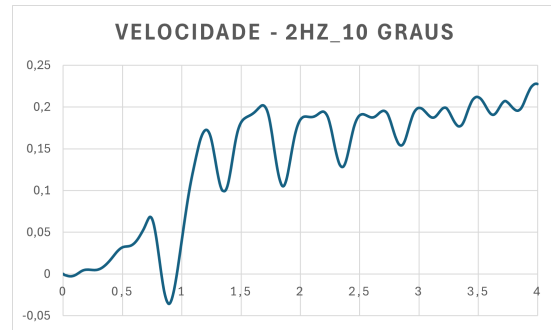


(B) Velocidade (1,5 Hz; 40°)

FIGURA D.12: Resultados para $f = 1,5$ Hz e $\theta = 40^\circ$.

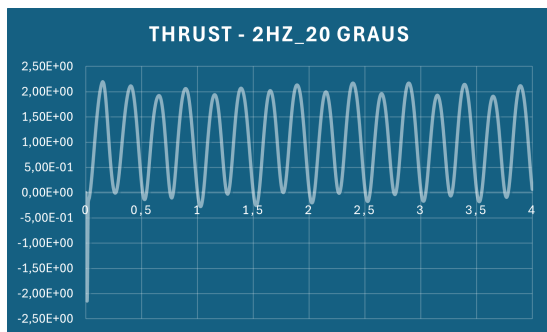


(A) Thrust (2 Hz; 10°)

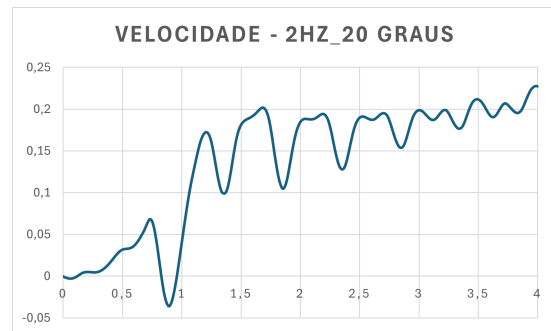


(B) Velocidade (2 Hz; 10°)

FIGURA D.13: Resultados para $f = 2$ Hz e $\theta = 10^\circ$.

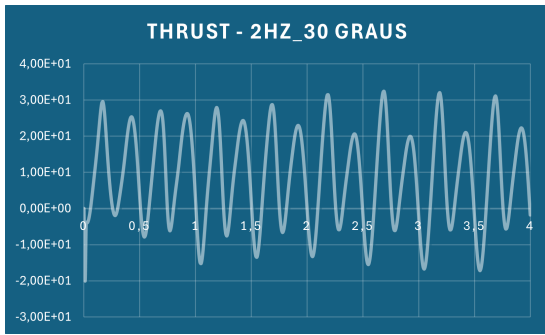


(A) Thrust (2 Hz; 20°)

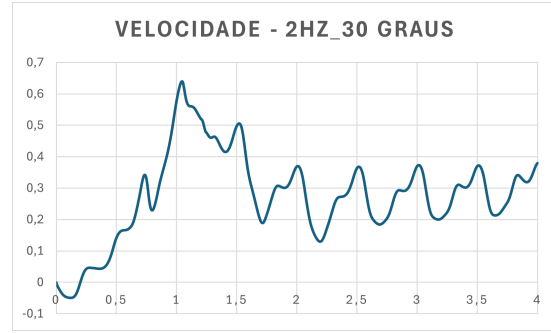


(B) Velocidade (2 Hz; 20°)

FIGURA D.14: Resultados para $f = 2$ Hz e $\theta = 20^\circ$.

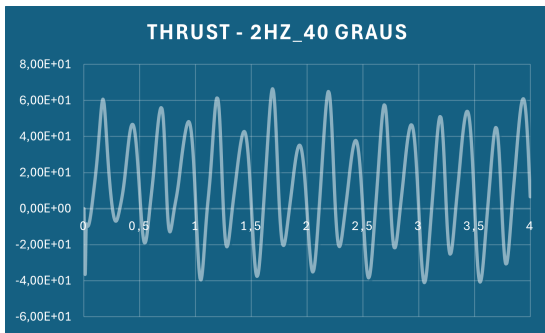


(A) Thrust (2 Hz; 30°)

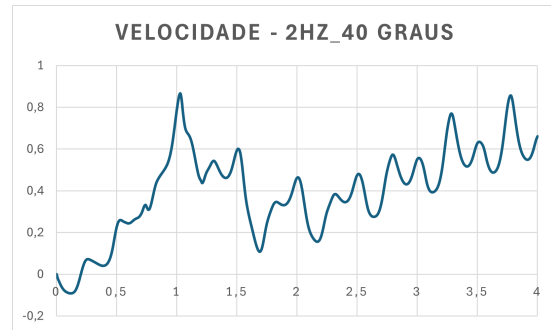


(B) Velocidade (2 Hz; 30°)

FIGURA D.15: Resultados para $f = 2$ Hz e $\theta = 30^\circ$.



(A) Thrust (2 Hz; 40°)



(B) Velocidade (2 Hz; 40°)

FIGURA D.16: Resultados para $f = 2$ Hz e $\theta = 40^\circ$.