



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Ricardo José Cardoso da Silva

Modelação de hélices utilizando “*Surrogate Modelling*”

**Otimização de hélices em motores elétricos para utilização em
plataformas marítimas autónomas (Catamarãs)**

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Engenheiros Navais – Ramo de Mecânica**



**Alfeite
[2015]**



ESCOLA NAVAL

ta tante de bife faire



Ricardo José Cardoso da Silva

Modelação de Hélices utilizando “Surrogate Modelling”

Otimização de hélices em motores elétricos para utilização de plataformas marítimas autónomas (Catamarãs)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenheiros Navais – Ramo Mecânica

Orientação de: CFR EN-MEC (ACN) Pires da Silva

Co-orientação de: CMG Maia Martins

O Aluno Mestrando

O Orientador

[Ricardo José Cardoso da Silva]

[Paulo Pires da Silva]

Alfeite
[2015]

Dedicatória

Dedico este trabalho àqueles que sempre me apoiaram e me acompanharam incondicionalmente, aos quais tenho muito a agradecer.

Agradeço à minha namorada, que incansavelmente me apoiou, nomeadamente nos momentos mais difíceis. Sempre se mostrou disponível para me ajudar, inclusivamente acompanhou-me e colaborou comigo na difícil tarefa da realização dos testes e desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe, pai, irmão e avô que não se pouparam às palavras de motivação e coragem.

Ao meu tio que se mostrou totalmente disponível para me auxiliar na preparação da embarcação, nomeadamente na elaboração da estrutura de fixação do motor.

Agradecimentos

- Ao meu orientador CFR EN-MEC (ACN) Pires da Silva que sempre se mostrou disponível a atender às minhas dúvidas e a dar uma palavra de apreço quando mais foi preciso;
- Ao meu co-orientador, CMG M Maia Martins por toda a paciência que demonstrou para me explicar e indicar os passos a seguir;
- Ao meu camarada e amigo ASPOF EN-MEC Mártires Paulino pelo auxílio, colaboração e apoio que demonstrou durante todo este longo percurso;
- Ao meu camarada ASPOF EN-AEL Chadli Amir que se mostrou sempre disponível a ajudar e com o qual colaborei na preparação dos testes e execução dos mesmos;
- Ao CNOCA (Clube Náutico de Oficiais e Cadetes da Armada), em especial ao Mestre Dias, Sargento Frazão, Mestre Cardoso, Cabo Horta e Cabo Barreto. Foram bastante colaborativos, sempre prontos a ajudar, fizeram para além do que lhes era solicitado, e acima de tudo, excelentes pessoas que não se reservaram a palavras de incentivo e motivação;
- Ao Departamento de Armas e Eletrónica por possuírem excelentes técnicos que para além da abertura a qualquer esclarecimento de dúvidas, prestação de auxílio, também repararam a avaria do motor elétrico, tudo reflexo da insistência e dedicação demonstrada.
- Ao Sr. Engenheiro Lobo que apesar das peripécias que ocorreram, foi sempre compreensivo e encarou-as de uma forma leve e ponderada;
- Ao CMG M Dias Pinheiro, por ter dado auxílio na preparação da embarcação;

Resumo

No âmbito do projeto ICARUS pretende-se desenvolver um veículo autónomo de salvamento marítimo. O objetivo é que este constitua o primeiro meio de socorro a náufragos. Enquadrado neste projeto, proponho-me na modelação dos hélices que equiparão esta plataforma.

Para o efeito, irá ser utilizado uma abordagem por “*Surrogate Modeling*” com recurso a Redes Neurais Artificiais. Este método irá consistir na análise dos dados de diversas provas realizadas com diferentes hélices a várias condições. Após o tratamento dos mesmos, chegar-se-á, idealmente, a um hélice que se encontrará perfeitamente adaptado à plataforma e à sua especificidade a nível de missão.

Palavras-chave: Redes Neurais; Hélice; Modelação; Otimização; *Surrogate Modeling*.

Abstract

In accordance with *ICARUS* project, the intention is to develop an autonomous vehicle suitable for maritime Search and Rescue. The purpose of this unmanned vehicle, is to constitute the first mean of assistance to people who are in distress or imminent danger. Framed to this project, it is proposed the modeling of the propellers that will equip this vehicle.

It will be investigated an innovative way of dealing with this problem, "*Surrogate modeling*" using Artificial Neural Networks. This method consists on the analysis of data from a series of tests performed with different propellers under a variety of conditions. After processing this data, it will be possible to get a propeller perfectly adapted for the platform and its specificity in terms of the nature of the missions it is supposed to execute.

Key-words: Neural Networks; Propeller; Modelling; Optimization; Surrogate Modeling.

Índice Geral

Índice de Figuras	XIV
Índice de Equações	XVI
Índice de Quadros	XVIII
Lista de Símbolos.....	XX
Abreviaturas.	XXII
Introdução.....	2
Capítulo 1. Projeto <i>Icarus</i>.....	4
1.1. Objetivos	4
1.2. Estado da investigação no sistema de propulsão do projeto <i>Icarus</i>	5
Capítulo 2. Hélices	6
2.1. Introdução Histórica	6
2.2. Características dos hélices	10
2.3. Princípio de Funcionamento	17
2.4. Teorias de projeto hélices.....	19
2.4.1. Teoria do disco atuador e elementos de pá	19
2.4.2. Teoria da linha de sustentação e superfície sustentadora.....	23
2.4.3. Séries sistemáticas de hélices.....	27
2.4.4. <i>Computational Fluid Dynamics Analysis (CFD)</i>	29
2.4.5. “ <i>Surrogate Modeling</i> ”: Uma alternativa na modelação.....	30
2.5. Cavitação.....	31
2.5.1. Princípio físico.....	32
2.5.2. Considerações geométricas.....	38
2.6. Relação entre motor e hélice.....	40
Capítulo 3. Propulsão elétrica	46
3.1. Princípio de funcionamento	50
3.2. Motores Torquedo	52
Capítulo 4. Testes	56
4.1. Propósito dos testes	56
4.1.1. Ações de planeamento e preparação para testes.....	56
4.2. Testes efetuados.....	60
4.2.1. Preparativos para testes.....	60
4.2.2. Realização dos testes.....	61
4.2.3. Dificuldades sentidas	64
4.2.4. Discussão de resultados	69

Capítulo 5. Redes neuronais	72
5.1. Neurónios Artificiais.....	73
5.2. Arquiteturas de rede.....	75
5.3. Algoritmos de treino	77
5.4. Redes <i>Feedforward Back-Propagation</i>	78
5.5. Processamento dos dados	79
5.6. Divisão dos dados	80
5.7. Overfitting.....	81
Capítulo 6. Sequência de testes com Redes Neuronais	84
6.1. Preparação dos dados.....	84
6.2. Programação em MATLAB	85
6.2.1. Programa de treino da rede neuronal.....	85
6.2.2. Programa para achar configurações de rede com menor erro.....	88
6.3. Discussão de resultados.....	88
6.3.1. Experiências iniciais	88
6.3.2. Experiências com configurações de rede até dez neurónios	90
6.3.3. Experiências com as quatro configurações vencedoras.....	93
6.3.4. Análise da evolução do erro, consoante número de neurónios, com a configuração vencedora.	94
6.3.5. Escolha da melhor arquitetura de rede.....	96
6.3.6. Importância das variáveis de entrada para a rede neuronal	97
Capítulo 7. Resultados Obtidos com rede neuronal	98
7.1. Discussão de resultados.....	99
Capítulo 8. Conclusões e trabalhos futuros	104
Lista bibliográfica	106
Anexo A - Especificações técnicas	110
Apêndice A – Caderno de Provas	112
Apêndice B - Resultados obtidos para o hélice v8/p350.....	122
Apêndice C - Resultados obtidos para o hélice v19/p4000	130
Apêndice D - Resultados obtidos para o hélice v30/p4000.....	138
Apêndice E - Quadro resumo dos resultados obtidos.....	146
Apêndice F - Condições Meteorológicas (V8/p350).....	148
Apêndice G - Condições Meteorológicas (V19/p400)	150
Apêndice H - Condições Meteorológicas (V30/p4000)	152
Apêndice I - Dados Normalizados.....	154
Apêndice J - Código do programa utilizado para testes de configurações da rede ..	158

Apêndice K - Código do programa para achar configurações de rede com menor erro	
160	
Apêndice L - Quadro erros para treino da rede com configurações até 150 neurónios	
162	
Apêndice M - Três melhores configurações de redes até 10 neurónios, por experiência realizada.....	164
Apêndice N - Resultados das experiências com configurações vencedoras.....	166
Apêndice O - Gráfico da evolução do erro em função do número de neurónios	168
Apêndice P - Comparação entre erros obtidos entre configuração vencedora com 3 e 4 neurónios	170
Apêndice Q - Escolha da melhor arquitetura de rede.....	172
Apêndice R - Pesos das variáveis de entrada	174
Apêndice S - Melhores soluções geométricas com maré a encher.....	176
Apêndice T - Melhores soluções geométricas com maré a vazar	178
Apêndice U - Testes das soluções geométricas obtidas com maré a encher	180
Apêndice V – Testes das soluções geométricas obtidas com maré a vazar	182
Apêndice W – Resultados obtidos para os hélices testados	184

Índice de Figuras

Figura 1 - Hélice de Robert Hooke (1683)	6
Figura 2 - À esquerda o projeto de Bernoulli e, à direita o Projeto de Paucton	7
Figura 3 - Solução de Bramah à esquerda e de Shorter à direita.....	8
Figura 4 - Hélices contra rotativos à esquerda, e Arquimedianos à direita	9
Figura 5 – Fixação por escatel e chaveta do cubo ao veio propulsor	10
Figura 6 - Elementos constituintes das pás de um hélice	11
Figura 7 - Esquemática do Passo, Avanço e Recuo de um hélice	13
Figura 8 - Medição do diâmetro de um hélice	14
Figura 9 - Elementos da secção de uma pá	15
Figura 10 - Área projetada, desenvolvida e expandida	16
Figura 11 - Abatimento axial (Rake)	16
Figura 12 - Pá simétrica à esquerda, e com deslocamento circunferencial à direita	17
Figura 13 - Sistema de forças que atuam nas pás de um hélice	19
Figura 14 - Variáveis implícitas na teoria do Disco Atuador	20
Figura 15 - Esquemática das variáveis envolvidas	22
Figura 16 - Teoria clássica da linha sustentadora de Prandtl.....	24
Figura 17 - Linha de sustentação (a); Ação do hélice descrito por linha de sustentação (b).....	24
Figura 18 - Distribuição dos vórtices na pá (a); Superfície de vórtices representativos da pá de perfil (b)	26
Figura 19 - Distribuição de correntes de entrada e saída ao longo do perfil da pá	27
Figura 20 - Aspeto geométrico das pás da série B de Wageningen	28
Figura 21 - Série B de Wageningen para hélices de duas pás, razão de área expandida 0.3 e razão passo-diâmetro entre 0.5 a 1.4.....	29
Figura 22 - Diagrama de fases da água.....	33
Figura 23 - Formação de bolhas de vapor	33
Figura 24 - Tipos de cavitação: (A) cavitação de bolha; (B) cavitação de bolsa; (C) Cavitação de vórtice de extremidade; (D) Cavitação de vórtice entre o hélice e a querena.....	35
Figura 25 - Processos de erosão: (a) onda de choque; (b) microjato.....	36
Figura 26 - Consequências da cavitação, “pitting” e erosão do hélice.	37
Figura 27 - Flutuação de pressão devido à passagem do hélice com cavitação e sem cavitação	38
Figura 28 - Diagrama de Burril para escoamento uniforme.....	39
Figura 29 - Curvas de potência e binário	41
Figura 30 - Curvas características de funcionamento do motor e hélice	43
Figura 31 - Área de operação do motor	44
Figura 32 - Exemplo de como o espaço poderá ser utilizado de melhor forma adotando uma instalação elétrica, de cima para baixo, disposição de uma instalação a diesel, diesel-elétrica, e “pod”	48
Figura 33 - Propulsores azimutais	50
Figura 34 - Estator de um motor de indução. Aspeto do elemento constituído por material ferromagnético e locais para alojar os enrolamentos à esquerda e, já com as cavas preenchidas pelos enrolamentos à direita	51
Figura 35 - Rotor bobinado à esquerda e em gaiola de esquilo à direita	51

Figura 36 - Torqueado Cruise e telecomando	52
Figura 37 - Baterias de lítio	53
Figura 38 - Comparativo de eficiência de diversos motores fora de bordo ³⁷	53
Figura 39 - Da esquerda para a direita: v8/p350; v19/p4000; v30/p4000.....	54
Figura 40 - Configuração do catamarã para suportar um motor elétrico em cada bordo	58
Figura 41 - Adaptação da embarcação para levar apenas um motor elétrico.....	59
Figura 42 - Componentes do veio do hélice	60
Figura 43 - À esquerda a preparação da embarcação e à direita a preparação dos pesos	61
Figura 44 - Trajeto de ida à esquerda, e regresso à direita.....	62
Figura 45 - Referência na rampa do CNOCA.....	63
Figura 46 - Pontão do Arsenal do Alfeite.....	63
Figura 47 - Embarcação que servia de referência	64
Figura 48 - Local onde ocorreu infiltração de água salgada.....	67
Figura 49 - Componentes danificados na placa de comando do motor elétrico	67
Figura 50 - Consequências do posicionamento e forma da estrutura de apoio aos motores, quando realizados os testes.....	68
Figura 51 - Estrutura de um neurónio artificial	73
Figura 52 - Funções transferência	74
Figura 53 - Função sigmoidal para $k=0,5$, $k=1,0$ e $k=2,0$	75
Figura 54 - Redes FeedForward de uma camada	76
Figura 55 - Redes Feedforward multicamada	76
Figura 56 - Rede Recorrente.....	77
Figura 57 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo Back-Propagation na fase de treino de uma rede neuronal	79
Figura 58 - Gráfico da evolução do erro durante o treino	79
Figura 59 - Respostas de funções polinomiais de diferentes ordens.....	82
Figura 60 - Exemplo de metodologia aplicada na organização dos dados	84
Figura 62 - Esquema de funcionamento da série de ciclos encadeada para configuração da rede.....	87

Índice de Equações

Equação 1 - Velocidade teórica do navio	12
Equação 2 - Coeficiente de recuo	12
Equação 3 - Cálculo do impulso gerado	21
Equação 4 - Potência fornecida pelo disco.....	21
Equação 5 - Rendimento ideal do hélice	21
Equação 6 - Cálculo do impulso gerado	22
Equação 7 - Cálculo do binário gerado	23
Equação 8 - Rendimento do hélice.....	23
Equação 9 - Força de sustentação gerada	25
Equação 10 - Número de cavitação	34
Equação 11 - Coeficiente de Burril	40
Equação 12 - Cálculo do parâmetro $q_{0,7R}$	40
Equação 13 - Velocidade local a 70% do raio do hélice	40
Equação 14 - Fórmula usada para o erro quadrático médio.....	96

Índice de Quadros

Quadro 1 - Características dos Hélices.....	57
Quadro 2 - Valores de referência para potência	61
Quadro 3 - Características das funções transferência	74
Quadro 4 - Nomenclatura das funções transferência da camada intermédia em MATLAB	87
Quadro 5 - Nomenclatura dos algoritmos de treino do Backpropagation da rede em MATLAB	87
Quadro 6 – Legenda de apresentação dos dados no Quadro de resultados.....	89

Lista de Símbolos

V – Velocidade teórica do navio

V' – Velocidade real do navio

p – Passo do hélice (metros)

n – Número de rotações por unidade de tempo

a – avanço do hélice

Z – Número de pás

C – Comprimento da corda

dT – Impulso

dF_Q – Binário

dL – Sustentação

dD – Arrasto

Ωr – Velocidade rotacional

β - Ângulo ente as duas componentes de velocidade

r – raio do hélice

c_l – Coeficiente de sustentação

c_d – Coeficiente de arrasto

L – Força de sustentação gerada

V_∞ - Velocidade do fluído que percorre as pás do hélice

Γ_b – Intensidade dos vórtices

P_o – Pressão não perturbada

P_v – Pressão de vapor à temperatura ambiente de referência

ρ – Massa específica

D – Diâmetro do hélice

σ – Número de cavitação

A_E – Área expandida

A_0 – Área total do círculo que circunscreve o hélice

τ_c – Coeficiente de Burril

A_p – Área Projetada

V_R – Valor absoluto da velocidade local

V_a - Velocidade de entrada do escoamento no plano do hélice

x - Valor do dado a normalizar

\bar{x} - Média

σ - Desvio padrão

n - Número de erros calculados

y_i - Resposta da rede

t_i – Dado de saída desejável

Abreviaturas

CINAV - Centro de Investigação Naval

SAR - Search and Rescue

PAR - razão da área projetada

DAR - razão da área desenvolvida

EAR - razão da área expandida

NSMB - Netherland Ship Model Basin

CFD - Computational Fluid Dynamics Analysis

NNTool - Neural Network Tool

Introdução

Na Marinha Portuguesa os hélices em motores fora de borda são utilizados em variadíssimos cenários como por exemplo nos zebros dos fuzileiros, semirrígidas da polícia marítima, nas semirrígidas das corvetas, das lanchas e das fragatas. Mesmo ao nível dos projetos em que a Marinha está envolvida, pouca importância se dá aos hélices, sem nunca se fazer a sua devida análise para a otimização, como é o caso do Projeto *Icarus*, desenvolvido a nível da Escola Naval pelo Centro de Investigação Naval (CINAV).

Estes hélices encontram-se disponíveis no mercado em modelos padrão. Esta modelação é algo que comumente não se realiza, a prática é adquirir um qualquer hélice no mercado, sem ter em conta, se o mesmo será o ótimo dentro das especificidades da plataforma onde se inserirá. É neste prisma que se insere esta dissertação, fazendo uso de uma abordagem alternativa na modelação de um hélice. Tipicamente, e até à atualidade, a modelação de um hélice tem por base conceitos físicos bastante complexos. É um procedimento extenuante, dispendioso e demorado, tudo fatores motivadores na procura de formas de alternativas de modelação. É nesta perspetiva que surge o “*Surrogate Modeling*”, caracterizado como um método de engenharia que gera modelos que aproximam o comportamento da relação entrada/saída de dados multivariados de sistemas complexos, baseado em simulações computacionais. É uma forma de responder a questões complexas de engenharia por permitirem a criação de modelos que mimicom o comportamento do modelo de simulação em prova.

Pela maior simplicidade que este método possibilita na resolução da problemática em questão, a modelação de um hélice, este será o método que se irá colocar à prova. Inserindo no projeto *ICARUS*, pretende-se obter o hélice que melhor se adapta às características de uma plataforma robótica de salvamento marítimo. Para o efeito, existem diversas questões associadas à mesma, e a modelação dos hélices é, justamente uma das problemáticas. A criação de um *design* de hélice, perfeitamente adequado à plataforma e à missão da mesma, será um marco na melhoria da eficiência de propulsão do mesmo e possibilita chegar a um produto que cumpra com os objetivos traçados para o mesmo.

O capítulo 2 desta dissertação, hélices, foi elaborado com estreita colaboração com o camarada Máires Paulino.

Capítulo 1. Projeto *Icarus*

1.1. Objetivos

Recentes catástrofes naturais, das quais se destacam os terremotos em L'Aquila (2009), Haiti (2010) e Japão (2011), todos com consequências devastadoras, alertaram para o fato de haver um enorme desnível entre o que é a realidade do avanço tecnológico atualmente disponível e até com aplicação em algumas áreas, e a tecnologia implementada atualmente em missões de Busca e Salvamento (SAR) e em cenários de catástrofe. Por forma a sucumbir esta necessidade houve uma aposta por parte da Comissão Europeia das Empresas e Indústria, com a fundação do projeto *Icarus*. O objetivo, passa por incentivar a criação de ferramentas robóticas, nomeadamente, veículos autónomos, para auxiliar na busca e salvamento, assim como, em cenários de catástrofe. Para tal, a Comissão Europeia para as Empresas e Indústria disponibilizou um *plafond* de 17,5 milhões de euros. O uso deste tipo de veículos poderá revelar-se fundamental na salvaguarda da vida humana, incrementando a dinâmica e o espectro de ação neste tipo de missões. Apesar de haver bastantes artigos e pesquisa nesta área da automação de veículos para as aplicações enunciadas, tem havido uma quebra na interligação entre esses estudos, e os potenciais interessados nesta tecnologia. O projeto *ICARUS* pretende unir estas duas partes, para que estas comuniquem e tornem esta visão uma realidade, com aplicação prática muito brevemente (*ICARUS*, s.d.).

Os objetivos traçados para este projeto são a inovação e desenvolvimento dos seguintes equipamentos:

- Sensor luminoso para deteção de seres humanos;
- Veículos autónomos de superfície, aéreo e terrestre para missões SAR;
- Colaboração heterogénea entre equipamentos autónomos;
- Rede sem fios para comunicação autonomamente organizada, assegurando a interoperabilidade entre sistemas;
- Integração de veículos autónomos nos sistemas das forças de busca e salvamento;
- Sistema de treino e apoio para os veículos autónomos desenvolvidos para operações SAR.

1.2. Estado da investigação no sistema de propulsão do projeto *Icarus*

Existem alguns projetos portugueses em curso no âmbito do projeto *Icarus*, nomeadamente na robotização de uma cápsula de busca e salvamento. Um dos que merece mais destaque, é o projeto “ROAZ” e “ROAZ II” que está a ser desenvolvido no Instituto Superior de Engenharia do Porto. Os aspetos de *design* deste projeto foram implementados tendo em consideração principalmente, a sua aplicação em estuários, rios e oceano, em missões de busca e salvamento. As vantagens enunciadas como motivadoras para estes projetos são o fato de estes equipamentos permitirem a sua aplicação em tarefas repetitivas e em diversos cenários, aliando ao fato de trazerem objetivos óbvios pela redução do fator humano, que poderá resultar na melhoria na qualidade dos resultados e custos mais reduzidos inerentes à operação destes equipamentos. (Martins, et al.)

O intuito destes projetos foi criar uma embarcação leve, com boa estabilidade e pouco suscetível ao fenómeno de arrasto. Optou-se por uma configuração de catamarã para ambos os veículos em fibra de vidro, com os motores fora de bordo montados externamente a ré. A nível da propulsão importa referir que foi desenvolvido um propulsor especificamente para o “ROAZ”, pese embora, que este não tenha sido alvo de grande investigação, foi aparentemente desenvolvido unicamente com vista ao seu baixo custo. (Martins, et al.)

A nível de Escola Naval, concretamente, do CINAV, existe um grande desenvolvimento no sentido da robotização de uma embarcação de salvamento marítimo. Pouco trabalho está desenvolvido, no entanto, em termos de eficiência da embarcação e propulsão da mesma. Este projeto conta com uma embarcação catamarã, de pequenas dimensões e adaptada para suportar dois motores elétricos, idênticos aos utilizados no projeto “ROAZ II”.

O objetivo deste trabalho será a otimização dos hélices utilizados nos motores elétricos que equipam a embarcação do Projeto *Icarus*, a ser desenvolvido pelo CINAV na Escola Naval. Para tal, propõe-se uma abordagem alternativa e, de certa forma, pioneira nesta área da Engenharia, a modelação por *Surrogate Modeling* com recurso a Redes Neurais Artificiais.

Capítulo 2. Hélices

2.1. Introdução Histórica

O conceito de hélice surgiu pela primeira vez no tempo de *Arquimedes*, o filósofo grego, que desenvolveu um parafuso, com o objetivo de transportar água até à superfície no século III a.C. *Leonardo Da Vinci* é incluído no percurso da história dos hélices, desenhando um sistema de pás propulsoras. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

Robert Hooke, apesar de ser mais conhecido pela Lei de *Hooke*, também contribuiu enormemente na idealização dos hélices tal como os conhecemos hoje em dia. Inicialmente desenvolveu projetos de moinhos de vento, os quais evoluíram para medidores de correntes e, por último, para hélices com o propósito de promoverem a propulsão de embarcações. A ideia base do hélice concebido por *Robert Hooke* era constituído por quatro pás retangulares dispostas em torno de um eixo, com inclinação segundo o plano de rotação das mesmas (Figura 1). (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

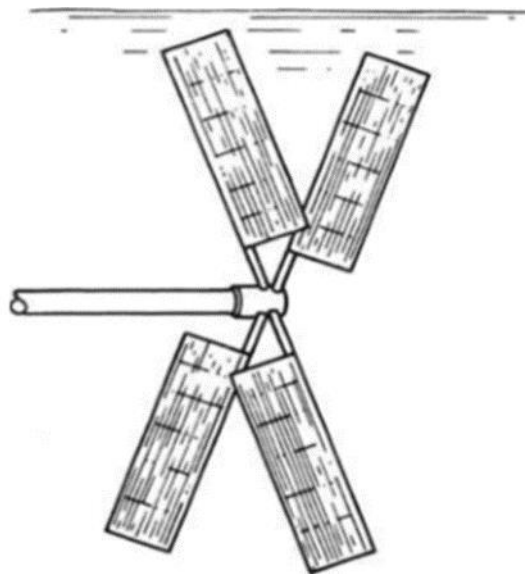


Figura 1 - Hélice de Robert Hooke (1683)¹

¹ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

Num concurso em 1752 na cidade de Paris, promovido pela *Académie des Sciences* com o intuito de promover investigação que proporcionasse um marco no avanço tecnológico na área de Arquitetura Naval, foram apresentados alguns modelos de hélices, com variadíssimos aspetos e formas de funcionamento. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

Bernoulli, um dos concorrentes do concurso, desenvolveu um hélice em roda propulsionado por um motor a vapor. O seu concorrente direto seria *Paucton*, um matemático Francês que trouxe uma alternativa projetada com base nos ideais de *Arquimedes*. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

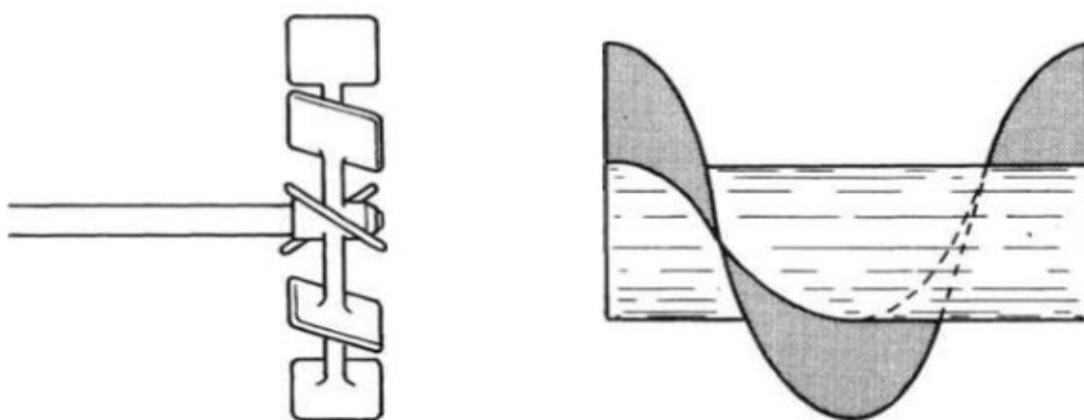


Figura 2 - À esquerda o projeto de Bernoulli e, à direita o Projeto de Paucton²

Mais tarde, em 1782, *Joseph Bramah*, um inventor britânico, propôs a localização dos hélices à popa das embarcações, uma sugestão que é utilizada até aos dias de hoje. A proposta de *Bramah* exigiria a utilização de um veio horizontal ao longo do casco abaixo da linha de água, ao qual seria afixado um hélice na sua extremidade. No entanto, surgiu outra proposta em 1802 por *Edward Shorter*, com o principal intuito de diminuir o emprego de vedantes que a solução de *Bramah* exigia. Sugeriu que o veio fosse posicionado acima da linha de água, e idealizou o seu projeto com o navio *Doncaster*, que navegou desde Malta a Gibraltar, regressando novamente a Malta, a uma velocidade de 1,2 nós. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

² CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

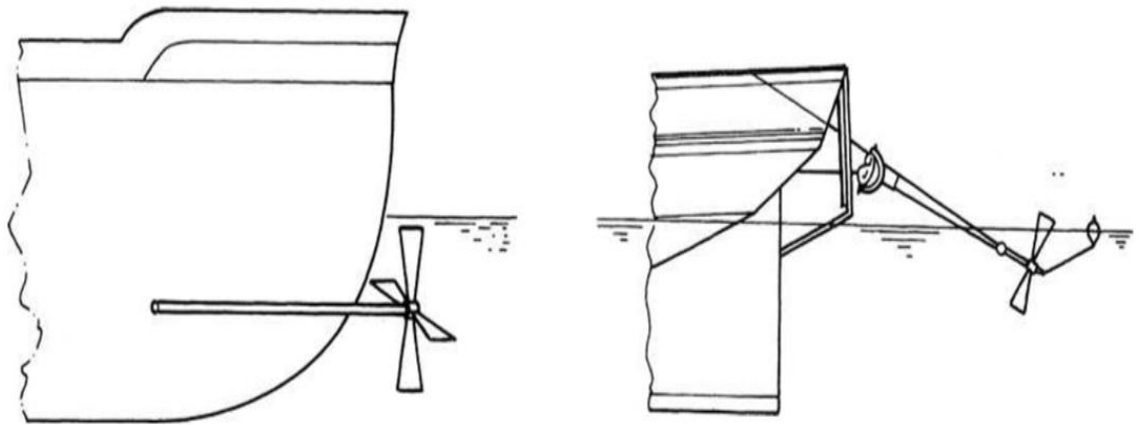


Figura 3 - Solução de Bramah à esquerda e de Shorter à direita³

O Coronel *John Stevens*, construiu uma embarcação com cerca de 7 metros de comprimento, e propulsionado por um motor a vapor acoplado a um hélice com 4 pás, um ano após a proposta de *Shorter*. Apesar de a embarcação ter conseguido atingir os 8 nós, não se mostrou satisfeito com os resultados e começou a aprofundar conhecimentos noutros modelos de propulsão marítima. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

Os primeiros hélices contra rotativos foram desenvolvidos em 1824, por *John Ericsson*. Uma solução em que dois hélices inseridos num mesmo veio rodam em sentidos opostos. O objetivo seria o de reduzir a perda de energia cinética de rotação do hélice mais a vante. No entanto, pouco tempo depois, *Francis Petit Smith* apresentou estudos que evidenciavam um melhor desempenho dos hélices *Arquimedianos* comparativamente aos contra rotativos propostos por *Ericsson*. Existiram diversos estudos, e navios projetados com este tipo de hélices. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

³ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

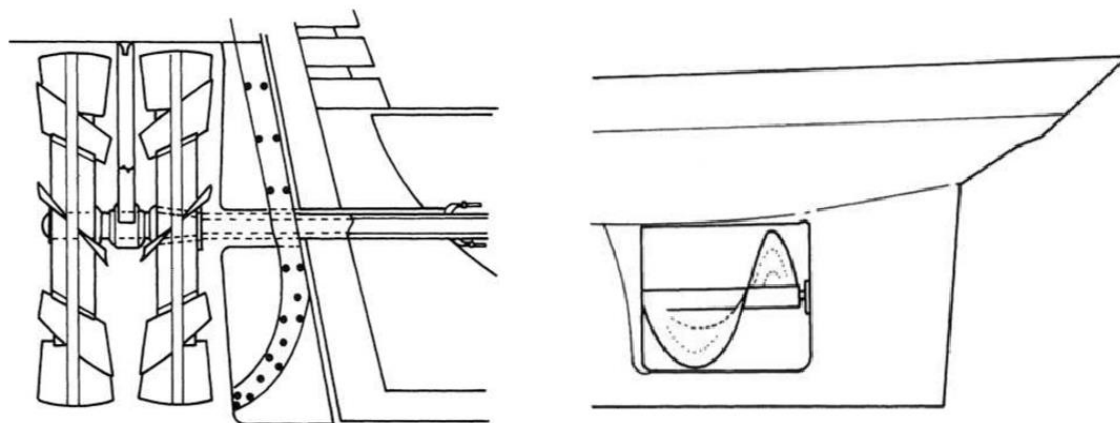


Figura 4 - Hélices contra rotativos à esquerda, e Arquimedianos à direita⁴

No entanto em 1842, o foco voltou-se novamente para os hélices tipo moinho, inicialmente propostos por *Robert Hooke*, e com bastantes desenvolvimentos até à data como reflete o caso da proposta de John Ericsson. Foi utilizado uma variante deste tipo de hélices, apesar de não ser contra rotativo como propunha *Ericsson*, no navio *Napoleon*, com 376 toneladas, e equipado com um motor a vapor capaz de atingir as 126 RPM (rotações por minuto), e uma velocidade de 12 nós. O hélice utilizado neste navio, ganha especial relevo por ter sido obtido através de uma série de testes com vários hélices com diferentes aspetos geométricos, nomeadamente com diferente passo, número de pás e diâmetro. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

O final do século XIX fica marcado pelos primórdios dos estudos com maior incidência na análise dos hélices em termos geométricos, nomeadamente de ajuste pás, morfologia de pás, cavitação, e na distribuição radial do passo. Estes estudos passam pela compreensão do funcionamento dos hélices e interação com o meio que os envolve. Importa também referir que em 1868, o Sr. *H.B. Young*, patenteou um método de alteração do passo de um hélice, ideia que é bastante implementada hoje em dia sob a forma do denominado hélice de passo controlável. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

É, portanto, possível verificar pela história, que os hélices já têm sido alvo de investigação que data desde há muitos anos atrás, mais de 2000 anos. O seu estudo

⁴ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

revela-se complexo, pela dificuldade de integrar todas as variáveis que influenciam o funcionamento de um hélice. Na maioria dos casos, o que se verifica é que os grandes fabricantes apresentam uma gama de hélices que é resultado de inúmeras experiências onde diversos aspetos geométricos foram testados até encontrar a melhor solução. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012)

2.2. Características dos hélices

O hélice é um elemento composto por uma peça central denominada por cubo, onde se ligam um determinado número de pás dispostas simetricamente em torno deste, cuja sua rotação permite o avanço da embarcação onde se insere. É posicionado à extremidade do veio propulsor, veio que recebe o movimento de rotação do motor.

As pás ligam-se ao cubo através de parafusos ou, em alternativa, poderá estar tudo integrado no mesmo elemento, pás e cubo, sob a forma de uma única peça. Existem diversas formas de efetuar a ligação entre o cubo do hélice e o veio propulsor, sendo a mais usada tipicamente, a ligação por escatel e chaveta, tal como evidencia a Figura 5. (Silva, 2007)

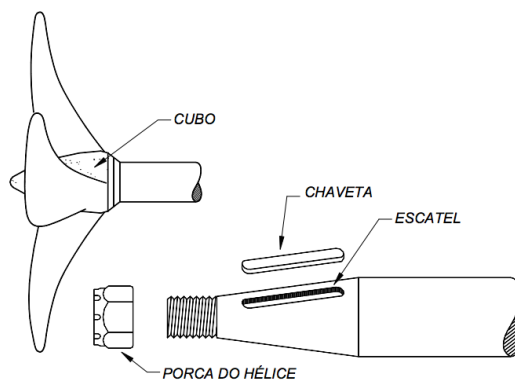


Figura 5 – Fixação por escatel e chaveta do cubo ao veio propulsor⁵

Os hélices são fabricados com vários materiais, os mais comuns são o ferro fundido, ligas de metais não ferrosos ou aço inoxidável. (Silva, 2007)

⁵ SILVA, J. E. (2007). Tecnologia Marítima. *Características e Elementos do Navio*. Obtido em: http://www.enautica.pt/publico/professores/baptista/TecMar/cap2_tecmaritima.pdf

Consoante o sentido de rotação do hélice, assim este poderá ser denominado hélice de passo direito ou esquerdo. O sentido de rotação é determinado quando observado o hélice para vante do lado da descarga, em marcha avante. (Silva, 2007)

As pás de um hélice têm uma zona de sucção e outra de pressão, respetivamente referentes ao dorso e face da pá. O perfil de uma pá é composto por vários elementos, são estes:

- Bordo de ataque – Linha frontal das pás;
- Bordo de fuga – Linha traseira da pá;
- Extremidade – Ponto do hélice de maior raio. (Volvo Penta, 1998)

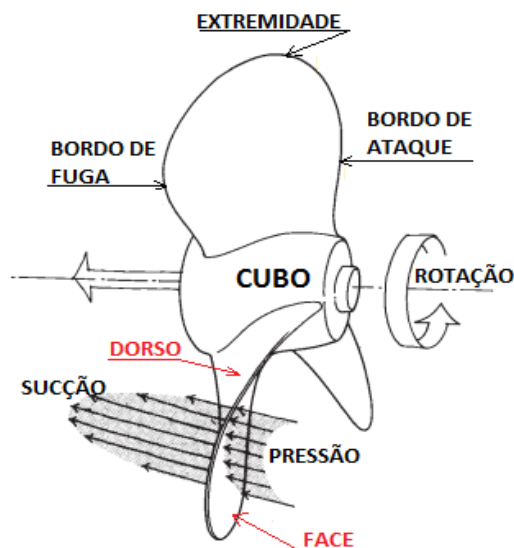


Figura 6 - Elementos constituintes das pás de um hélice⁶

Passo

O passo do hélice é o comprimento medido na direção do veio, correspondente a uma revolução completa, ou uma rotação da pá. Se a água fosse um meio rígido, o passo do hélice corresponderia ao avanço que o hélice provocaria no navio por cada rotação. Neste contexto, a velocidade do navio seria determinada por:

⁶ Adaptado: Volvo Penta. (1998). *Propellers: Inboard Propellers and speed calculation marine engines 2.1L-16L*.

$$V = p \times n$$

Equação 1 - Velocidade teórica do navio

Sendo:

- p – o passo do hélice (metros);
- n – número de rotações por unidade de tempo.

Esta velocidade é meramente teórica, pois na realidade, a água não se comporta como um corpo sólido, mas sim como um corpo deformável, o que resulta num avanço por rotação inferior ao passo do hélice. A diferença entre a velocidade teórica e a velocidade real (V') denomina-se por recuo do hélice. Toma o nome de coeficiente de recuo a relação:

$$\frac{p - a}{p} = \frac{V - V'}{V}$$

Equação 2 - Coeficiente de recuo

Onde:

- p – Passo do hélice (metros);
- V – Velocidade teórica (m/s);
- a – avanço do hélice (metros).

Com bom tempo, o recuo do hélice verificado está normalmente compreendido entre os 5 a 10% em navios de um só hélice e, entre 10 a 20% para navios com dois hélices (Figura 7).

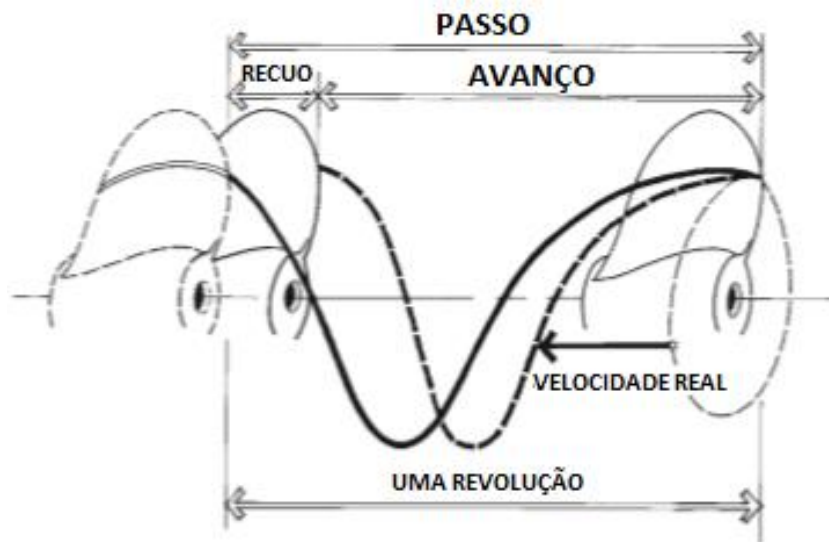


Figura 7 - Esquemática do Passo, Avanço e Recuo de um hélice⁷

Os hélices podem ser de passo fixo ou controlável. Os hélices de passo controlável distinguem-se por poderem alterar a posição das pás relativamente ao cubo do hélice, resultando numa mudança do passo. Esta possibilidade permite alterar a velocidade e sentido de marcha do navio mantendo as rotações do veio constantes. Porém, estes hélices são mais complexos e mais caros, carecendo de sistemas de acionamento e de controlo intrincados. (Silva, 2007)

Número de Pás

O número de pás de um hélice está comumente compreendido entre 3 a 5. Hélices com menor número de pás tendem a apresentar uma eficiência superior, por outro lado, produzem níveis de vibrações notoriamente superiores aos hélices com maior número de pás. Neste contexto, o principal foco na escolha do número de pás de um hélice está associado às vibrações que este transmite ao casco do navio e instalação propulsora, pelo que existe um esforço para encontrar um equilíbrio entre a vibração produzida pelo hélice e a eficiência que este permite atingir. (Trindade, 2012)

Diâmetro

O diâmetro de um hélice corresponde ao diâmetro da circunferência descrita pelas extremidades das pás do mesmo, tendo como centro o eixo do hélice (Figura 8).

⁷ Adaptado: Volvo Penta. (1998). *Propellers: Inboard Propellers and speed calculation marine engines 2.1L-16L*

Naturalmente um hélice de maior diâmetro exige uma instalação de maiores dimensões, com mais potência, pois o volume de água deslocado é superior, existindo conseqüentemente uma maior resistência. De uma forma geral, a escolha do diâmetro de um hélice está, portanto, intimamente ligada às capacidades de entrega de potência da instalação propulsora. (Padovezi, 1997)

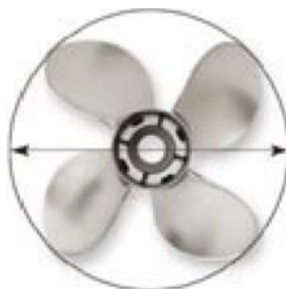


Figura 8 - Medição do diâmetro de um hélice⁸

Secção das pás

As pás de um hélice, quando observadas transversalmente, apresentam um perfil alar. Este perfil é projetado de forma que a interação das forças hidrodinâmicas na superfície das pás, possibilitem o deslocamento de determinada embarcação.

Na Figura 9 é possível verificar quais os elementos geométricos mais preponderantes para descrever a secção de uma pá:

- Corda – Linha imaginária que une os pontos extremos do bordo de ataque ao bordo de fuga;
- Espessura – Distância da face ao dorso da pá;
- Linha de Camber – Linha imaginária traçada a partir dos pontos médios entre a face e o dorso da pá. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012)

⁸MERCURY. (s.d.). *Propellers: Everything you need to know and more*. Obtido em Dezembro de 2014, de Mercury Marine: www.mercurymarine.com.au

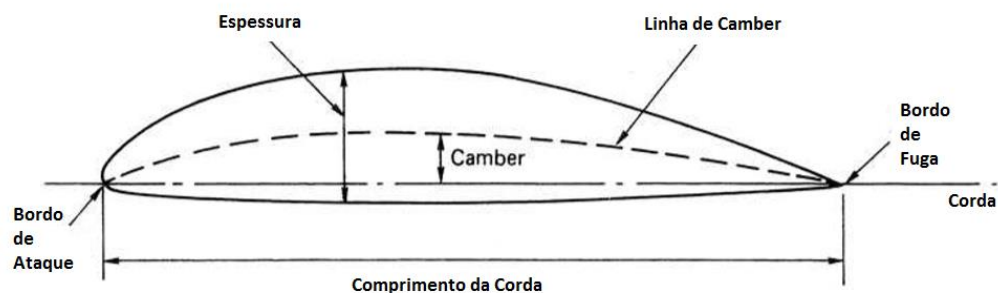


Figura 9 - Elementos da secção de uma pá⁹

Área das Pás

A área das pás de um hélice é descrita através de três relações:

- PAR (razão da área projetada);
- DAR (razão da área desenvolvida);
- EAR (razão da área expandida).

Estas relações traduzem a razão entre a área total das pás obtida em cada uma, pela área total do círculo que circunscreve o hélice. São utilizadas nomeadamente para limitar a ocorrência de cavitação no hélice, não esquecendo no entanto, que a alteração de qualquer um destes parâmetros terá consequências na eficiência do hélice.

A área das pás que define a PAR, é obtida quando o hélice é colocado numa superfície plana e, observado de cima, os seus contornos são desenhados.

A DAR corresponde à área que as pás do hélice apresentariam caso as mesmas fossem “distorcidas”, expresso de outra forma, caso o passo do hélice fosse zero.

A área que define a EAR é obtida por intermédio da DAR, com a diferença que corresponde à área que o hélice apresentaria caso a sua superfície fosse plana, com linhas de secção paralelas entre si (Figura 10). (HydroComp)

⁹ Adaptado: CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

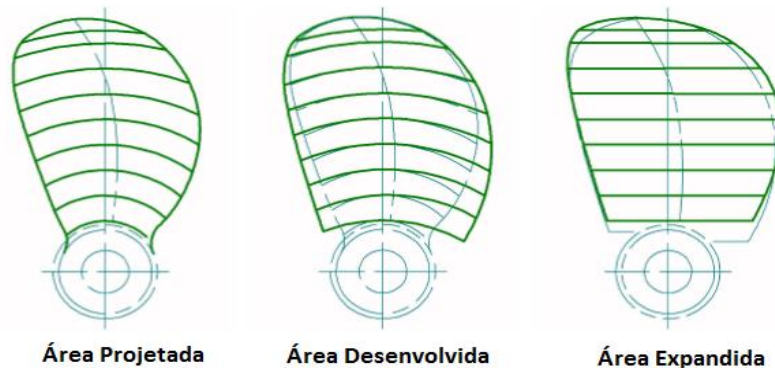


Figura 10 - Área projetada, desenvolvida e expandida¹⁰

Abatimento axial (*Rake*)

O abatimento axial é a inclinação observada entre a perpendicular que passa pelo cubo do hélice e a orientação da pá. Tipicamente, as pás estão orientadas para ré da embarcação, situação em que o abatimento axial é positivo. (BBlades, s.d)

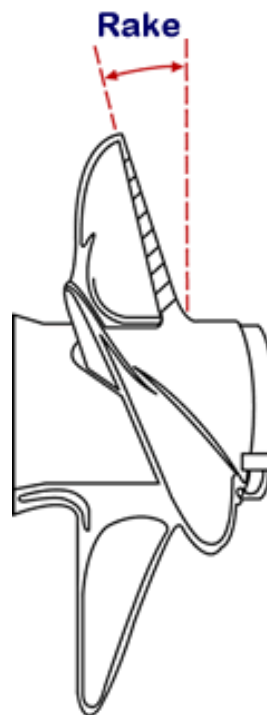


Figura 11 - Abatimento axial (*Rake*)¹¹

¹⁰ HydroComp. (s.d.). *Blade Area Ratio Defined: A hydrocomp technical report*. Obtido em 11 de Fevereiro de 2015, de HydroComp: <http://hydrocompinc.com/wp-content/uploads/documents/HC135-BladeAreaRatio.pdf>

¹¹BBlades. (s.d). Obtido em Abril de 2015, de BBlades Professional Propellers: <http://bblades.com/props-101/>

Deslocamento circunferencial (*Skew*)

As pás de um hélice apresentam tipicamente uma curvatura, não sendo simétricas relativamente à linha imaginária que passa no cubo do hélice. O deslocamento circunferencial (*Skew*) traduz a assimetria existente nas pás de um hélice.

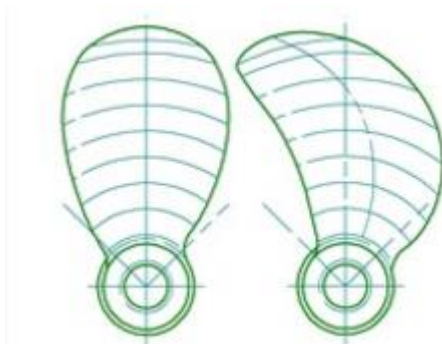


Figura 12 - Pá simétrica à esquerda, e com deslocamento circunferencial à direita¹²

O deslocamento circunferencial tem como principal objetivo a redução dos níveis de cavitação e vibrações induzidas, diminuindo as flutuações de pressão ao longo das pás. (Hydrocomp, Inc)

2.3. Princípio de Funcionamento

Os hélices têm como propósito, a criação de propulsão através do movimento giratório de um conjunto de pás centradas num mesmo ponto. As suas aplicações acontecem, sobretudo, ao nível das aeronaves e navios. Apesar dos diferentes meios de ação, ar e água, os hélices têm muito em comum numa perspetiva teórica. Ambos assemelham-se em aspeto e, são desenvolvidos por forma a produzirem o máximo de força de propulsão, através da movimentação de fluído desde montante para jusante do hélice. (Barry, 2005)

Os hélices marítimos estão geralmente localizados o mais a ré possível, na popa do navio. Esta escolha tem vários propósitos, tais como, maior eficiência da propulsão,

¹² HydroComp. (s.d.). *Blade Area Ratio Defined: A hydrocomp technical report*. Obtido em 11 de Fevereiro de 2015, de HydroComp: <http://hydrocompinc.com/wp-content/uploads/documents/HC135-BladeAreaRatio.pdf>

o arranjo das máquinas a bordo e a vulnerabilidade do hélice a danos. Recebem o movimento de rotação do motor propulsor por intermédio de um veio. Esta energia de rotação que é conferida ao hélice é denominada por binário (*Torque*), conforme se verifica na Figura 13, traduzindo-se no movimento rotativo das pás do hélice, o qual proporciona o movimento do navio. As pás de um hélice ficam, portanto, animadas de velocidade de rotação e avanço, a soma dos vetores da velocidade de rotação e velocidade do navio resultam no vetor da velocidade de escoamento do fluido que atravessa o hélice (*Combined Flow into Prop*). (Barry, 2005)

O hélice está sujeito a um sistema de forças (Figura 13), onde se inclui o binário (Torque) que é transmitido ao hélice e que se traduz por uma força tangencial ao eixo de rotação, aplicada em determinado ponto do hélice com distância ao eixo de rotação. O escoamento do fluido pelo hélice gera uma força de impulso (*Thrust*), força esta que é caracterizada por apresentar o sentido do escoamento do fluido e ser paralela ao eixo de rotação do hélice. Para obtermos a força total exercida na pá (Total Force), temos uma de duas opções, a primeira será pegar nas duas componentes de força referidas, e somá-las vectorialmente, por outro lado, temos também a hipótese de fazer a soma vetorial das forças de sustentação (*Lift*) e arrasto (*Drag*) a que a pá do hélice está sujeita. A força de sustentação toma direção perpendicular à face da pá, e é originada pelas zonas de pressão díspares, havendo uma de alta e outra de baixa pressão, como acontece em analogia com a asa de uma aeronave. A força de arrasto tem direção paralela à face da pá, é o resultado do atrito existente entre a pá e o meio onde se insere (água). (Barry, 2005)

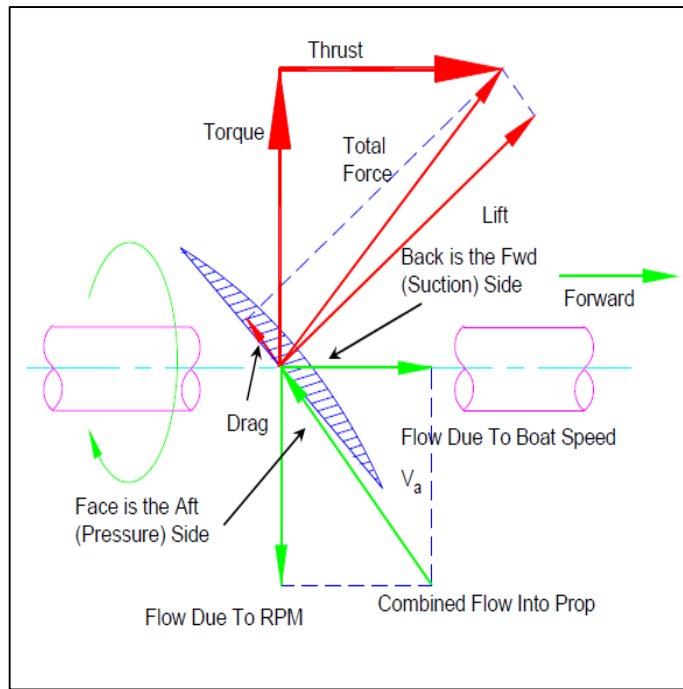


Figura 13 - Sistema de forças que atuam nas pás de um hélice¹³

No entanto, o escoamento do fluido (água) à popa não é uniforme, levando a uma consequência inevitável, a criação de forças de vibração nas pás do hélice e casco. Questões como o número de pás de um hélice e forma do contorno das mesmas são medidas que visam minimizar este fenómeno.

2.4. Teorias de projeto hélices

2.4.1. Teoria do disco atuador e elementos de pá

As teorias mais elementares relativamente ao projeto de hélices tomaram duas linhas de raciocínio independentes, são elas a teoria do disco atuador (ou teoria da quantidade de movimento) e a teoria de elementos de pá. A teoria do Disco Atuador, proposta por *Rankine* em 1865 e complementada por *Froude* em 1887, vê o hélice como um mecanismo que permite a aceleração do fluido onde se insere (ar, água), discriminando como são geradas as forças nas pás do hélice que permitem esse fenómeno. Tem alguns pressupostos associados, são eles:

¹³ BARRY, C. (Fevereiro de 2005). *Propeller Selection For Boats and Small Ships*. Obtido em Abril de 2015, de Davis&Co. Ltd.: https://www.daviscoltd.com/Engineering/documents/PDFs%20Chris%20Barry/Hydrodynamics/Propeller_course.pdf

- Escoamento de fluido ideal (não viscoso e incompressível) e permanente;
- O hélice é considerado como um disco infinitamente fino, ou seja, uma descontinuidade plana;
- Escoamento limitado pelas linhas de corte.

A principal limitação da teoria do Disco Atuador é que esta não fornece informações necessárias relativamente à forma do hélice. Embora bem fundamentada, não possibilita o projeto de hélice por si só, apenas permite calcular a propulsão resultante da variação de velocidade aquando a passagem pelo hélice, nas condições descritas anteriormente, de determinado caudal mássico de fluido (Figura 14). É também relevante mencionar, que as perdas associadas ao fenómeno de arrasto, são pelas condições impostas, ignoradas nesta teoria. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012; Trindade, 2012)

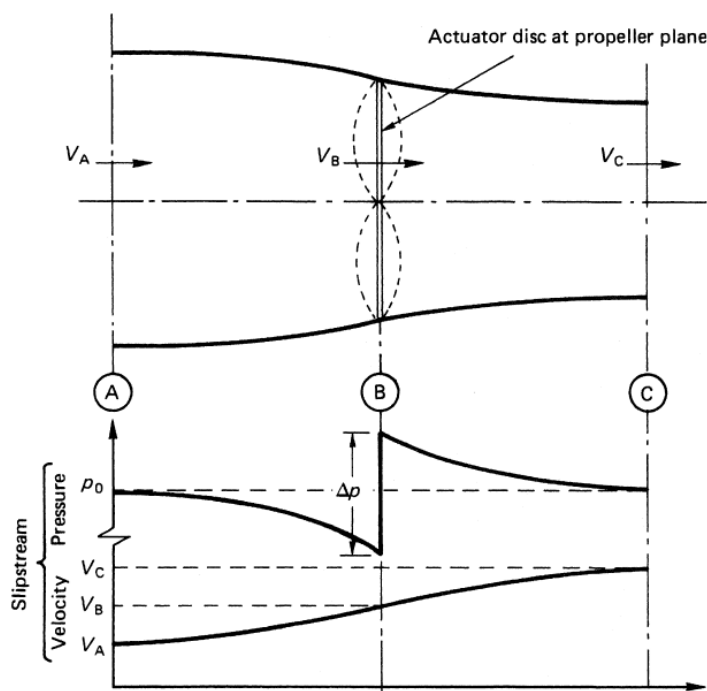


Figura 14 - Variáveis implícitas na teoria do Disco Atuador ¹⁴

O cálculo do impulso gerado (T) é feito recorrendo ao caudal mássico que flui através do disco:

¹⁴ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

$$T = \dot{m}(V_C - V_A)$$

Equação 3 - Cálculo do impulso gerado

A potência fornecida pelo disco (P_D) é, aplicando a equação de *Bernoulli*¹⁵, obtida através do aumento em energia cinética do escoamento do fluido:

$$P_D = \left(\frac{\dot{m}}{2}\right) (V_C^2 - V_A^2)$$

Equação 4 - Potência fornecida pelo disco

O rendimento ideal do hélice propulsor é calculado recorrendo à perda de energia cinética axial por unidade de tempo (\dot{E}_p) e à potência efetiva do hélice (P_E):

$$\eta_i = \frac{\text{Potência de impulso}}{\text{Potência fornecida}} = \frac{P_E}{P_E + \dot{E}_p} = \frac{1}{1 + \dot{E}_p}$$

Equação 5 - Rendimento ideal do hélice

Por outro lado, surge a teoria dos elementos de pá, de *Froude*, que procura explicar o mecanismo de produção de forças nas pás do hélice. Para tal, recorre ao seccionamento das pás do hélice, seguido pela análise das forças de sustentação e arrasto desenvolvidas nessas seções e, por fim, integra-se as forças previamente determinadas ao longo do raio do hélice (Figura 15). (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012)

¹⁵ A equação de Bernoulli refere que em condições normais, a energia total do escoamento permanece constante desde que não exista trabalho realizado pelo fluido.

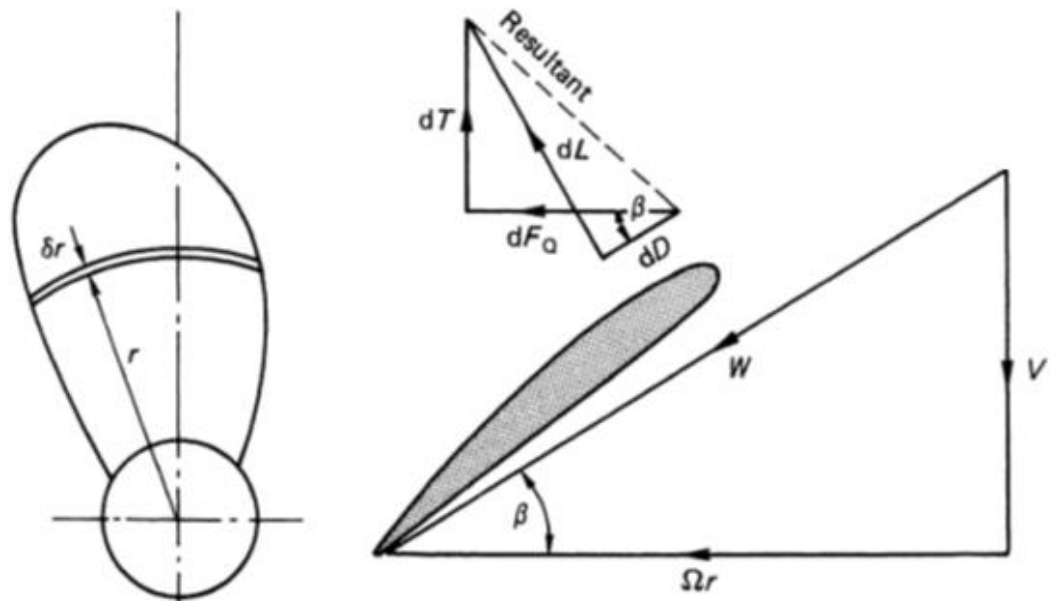


Figura 15 - Esquemática das variáveis envolvidas¹⁶

Na Figura 15 estão representadas as variáveis que mais importam no seccionamento da pá do hélice, segundo esta teoria, onde:

- dT : Impulso
- dF_{α} : Binário
- dL : Sustentação
- dD : Arrasto
- V : Velocidade axial
- Ωr : Velocidade rotacional
- β : Ângulo ente as duas componentes de velocidade

Pode-se deduzir, portanto, que o impulso e binário são obtidos através das fórmulas:

$$dT = \frac{1}{2} \rho Z c W^2 (c_l \cos \beta - c_d \sin \beta) dr$$

Equação 6 - Cálculo do impulso gerado

¹⁶ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

$$dQ = \frac{1}{2} \rho Z c W^2 (c_l \sin \beta + c_d \cos \beta) r dr$$

Equação 7 - Cálculo do binário gerado

$$\eta = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta + \gamma)}$$

Equação 8 - Rendimento do hélice

Onde c_l , c_d , representam, respetivamente, o coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto, Z e c representam o número de pás e comprimento da corda, r é raio, ρ a densidade e $\gamma = \frac{c_d}{c_l}$. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012)

Infelizmente esta teoria assenta no pressuposto que cada elemento da pá será responsável pela aplicação da força que gerará a mudança na quantidade de movimento do fluido varrido neste, sem considerar as interações radiais existentes entre os escoamentos em cada secção. Portanto, esta teoria assume que o escoamento axial é uniforme. É por este motivo que surgiu a necessidade de combinar as duas teorias mencionadas, passando a denominar-se teoria da quantidade de movimento do elemento da pá. Recorrendo à teoria do disco atuador é possível calcular as interações radiais do escoamento nas direcções axial e tangencial ao mesmo. (Alves, 2011)

2.4.2. Teoria da linha de sustentação e superfície sustentadora

Face aos progressos computacionais e todo o potencial associado a esta evolução, foi possível o desenvolvimento e aplicação das teorias da linha de sustentação e superfície sustentadora. Genericamente falando, a teoria da linha de sustentação representa cada pá do hélice por uma linha de vórtices de circulação ao longo do raio do hélice, enquanto, a teoria da superfície de sustentação, representa a pá como uma superfície de vórtices, o que permite a obtenção de um modelo tridimensional.

A teoria da linha de sustentação, introduzida por *Prandtl*, e posteriormente desenvolvida por outros físicos, assume que a pá do hélice é seccionada e retratada por uma linha de vórtices, cuja intensidade varia entre secções. A linha é contínua na direcção radial da pá, atuada por vórtices e assume-se que esta passa, geralmente, através do centro aerodinâmico das secções (Figura 16).

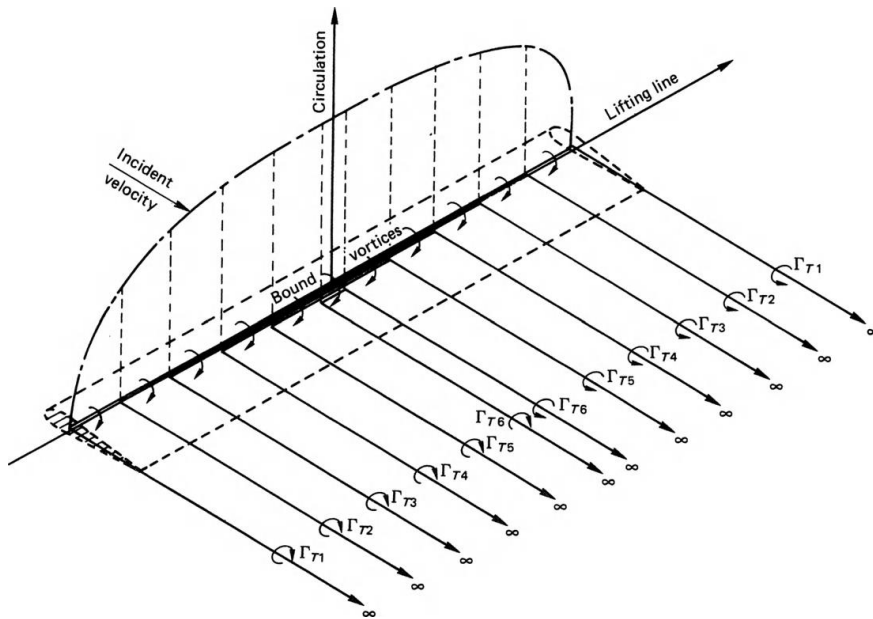


Figura 16 - Teoria clássica da linha sustentadora de Prandtl¹⁷

Numa determinada secção, a geometria de um hélice, segundo esta teoria, poderá ser representada por um único ponto, tal como se pode verificar na Figura 17 (a).

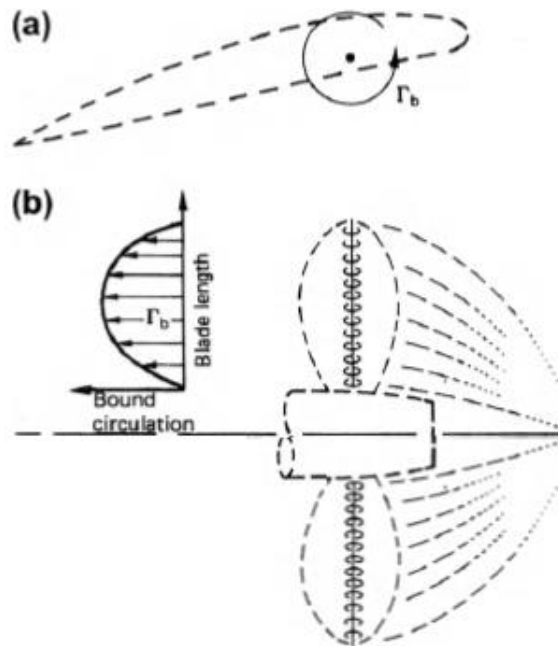


Figura 17 - Linha de sustentação (a); Ação do hélice descrito por linha de sustentação (b)¹⁸

¹⁷ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

¹⁸ Adaptado: CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

Como já referido, a intensidade dos vórtices (Γ_b) varia na direção radial, tal como demonstrado no gráfico da Figura 17 (b). Integrando a intensidade dos vórtices ao longo da linha de sustentação e tendo em conta a velocidade do fluido (V_∞) que percorre as pás do hélice, assim como, a sua densidade, obtemos o total das forças aplicadas. O valor obtido corresponde à força de sustentação gerada, segundo o teorema *Kutta-Joukowski*:

$$L \approx \rho \times V_\infty \times \int_0^y \Gamma_b(y) dy$$

Equação 9 - Força de sustentação gerada

A teoria da linha de sustentação contudo, apesar de simples, tem uma fraca adequabilidade aos hélices marítimos, é mais apropriado para hélices de aeronaves.

A teoria da superfície de sustentação permite obter uma representação da pá muito mais detalhada comparativamente à obtida segundo a teoria da linha sustentadora. Nesta teoria, a pá é representada por uma superfície de vórtices infinitamente fina, que refletem as propriedades de impulso gerado por determinado perfil de pá. Esta superfície acompanha a curvatura da pá, assumindo a distribuição de vórtices presente nesta, nas direções do raio e envergadura do hélice (Figura 18).

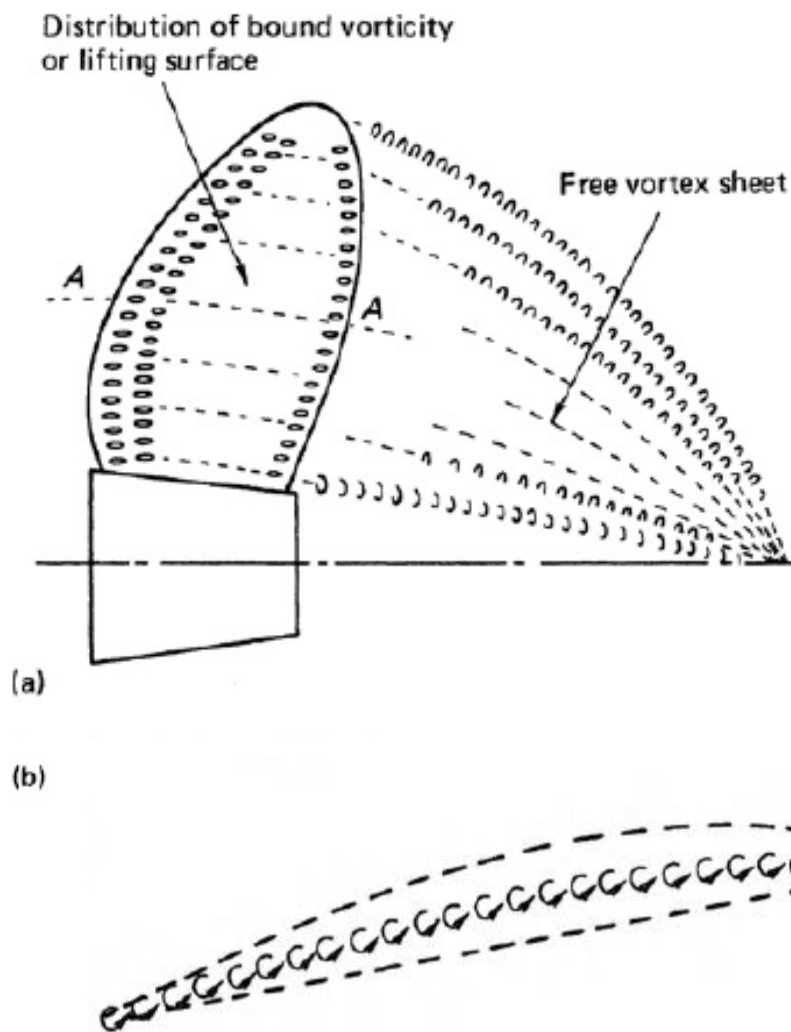


Figura 18 - Distribuição dos vórtices na pá (a); Superfície de vórtices representativos da pá de perfil (b)¹⁹

Futuros desenvolvimentos desta teoria permitiram criar modelos onde é possível a predição da ocorrência de cavitação nos hélices. Para tal, foi introduzida a distribuição de correntes de entrada e saída em determinados pontos ao longo do perfil da pá, acompanhando a mesma (Figura 19). Esta distribuição permite determinar a espessura do hélice seccionalmente, por forma a estimar-se de forma mais acertada a distribuição

¹⁹ Adaptado: CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

MOLLAND, A. F. (Ed.). (2008). *The Maritime Engineering Reference Book: A guide to ship design, construction and operation*. (1ª ed.). Reino Unido: Elsevier.

de pressões ao longo da superfície do mesmo, a qual será um elemento chave à predição do fenómeno de cavitação.

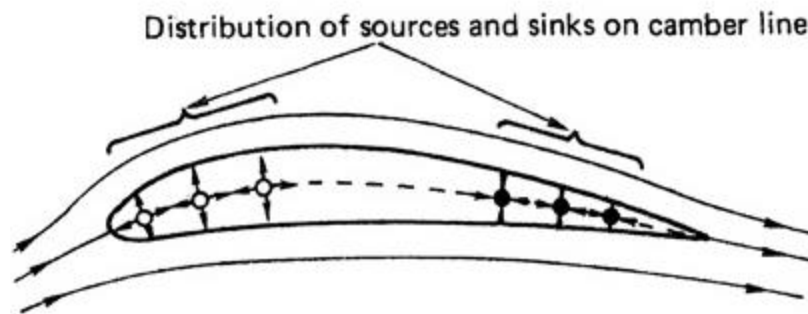


Figura 19 - Distribuição de correntes de entrada e saída ao longo do perfil da pá²⁰

Naturalmente, criar um modelo por via desta teoria torna-se muito mais extenuante devido à complexidade de cálculo envolvido na mesma. (Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2012; Molland, 2008)

2.4.3. Séries sistemáticas de hélices

A utilização de séries sistemáticas de hélices teve e tem uma ampla aplicação. As séries são obtidas através dos testes efetuados a um conjunto de hélices, onde se faz variar alguns aspetos geométricos, criando assim curvas características de cada hélice. A base de dados gerada permite auxiliar o projetista na identificação dos fatores mais preponderantes para uma eficiente operação do hélice nas mais diversas situações e, mais significantes para a ocorrência do fenómeno de cavitação. São também, uma ótima fonte de informação na seleção das características mais convenientes do hélice para o propósito a que se propõe o navio em termos do que serão as suas funções. (Trindade, 2012)

Em 1936, *van Lammeren* publicou os resultados dos testes efetuados por si, a cinco hélices de quatro pás em tanque de ensaio, variando o seu passo sistematicamente. Esta série foi apelidada A4.40, onde o 4 indica o número de pás, o 40 a razão da área expandida (neste caso 0.4) e o "A" simplesmente designa o fato desta ser a primeira série, apontando para o continuar deste trabalho e promovendo futuros desenvolvimentos. As pás dos hélices em questão, da série A, apresentavam já um perfil

²⁰ MOLLAND, A. F. (Ed.). (2008). *The Maritime Engineering Reference Book: A guide to ship design, construction and operation*. (1ª ed.). Reino Unido: Elsevier.

“moderno”, comparativamente aos perfis mais comuns da altura. A ponta dos hélices era bastante abicada, o que, em conjunto com outras características dos hélices desta série, os tornava suscetíveis a cavitação. Houve, portanto, a necessidade de criar uma nova série onde estes problemas fossem resolvidos, tendo-se chegado então à série B de *Wageningen*. Noventa modelos de hélices foram utilizados para elaborar esta série, modelos estes, que já haviam sido estudados e investigados na NSMB (*Netherland Ship Model Basin*). Estes hélices apresentavam uma ponta muito mais larga, assim como, foram feitos ajustes no contorno das pás e outros, para melhorar o comportamento à cavitação do hélice. Futuramente criou-se também a série C, criada com um conjunto de sete hélices com uma relação potência-rotação constante. (Kuiper, 1992)

As séries mais comuns são as de *Wageningen* (Figura 20) e as de *Gawn*, sendo a mais popular a série B de *Wageningen*, que tem como principais características as seguintes:

- Distribuição radial do passo constante;
- Pequeno deslocamento circunferencial;
- Distribuição radial do abatimento axial linear 15°;
- Contorno largo da pá na ponta;
- Secção das pás NSMB, tal como se pode verificar na Figura 20;
- Entre 2 a 7 pás;
- Razão de área expandida entre 0.3 a 1.05;
- Razão passo-diâmetro entre 0.5 a 1.4.

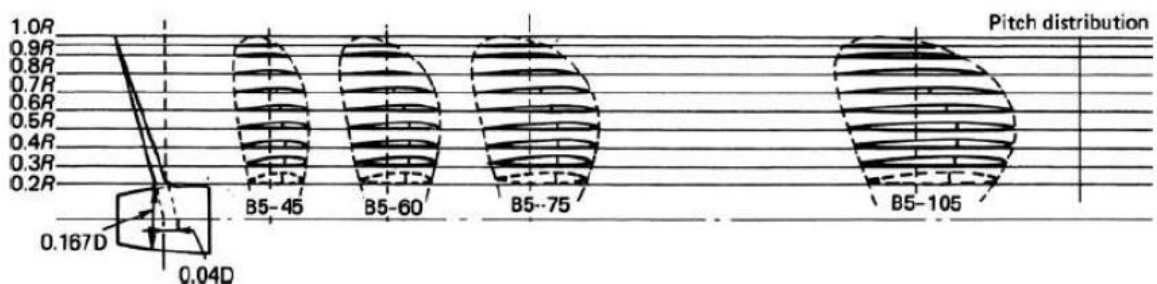


Figura 20 - Aspecto geométrico das pás da série B de Wageningen²¹

O emprego destas séries é relativamente simples, através de coeficientes polinomiais, poderemos obter as especificações de um hélice recorrendo aos diagramas com as

²¹ TRINDADE, J. (2012). *Hidrodinâmica e Propulsão*.

curvas características de águas livres para cada caso e diferentes razões passo-diâmetro (Figura 21). A principal desvantagem na utilização das séries é que não há espaço a inovação, uma vez que, a geometria base do hélice já se encontra estabelecida. (Trindade, 2012)

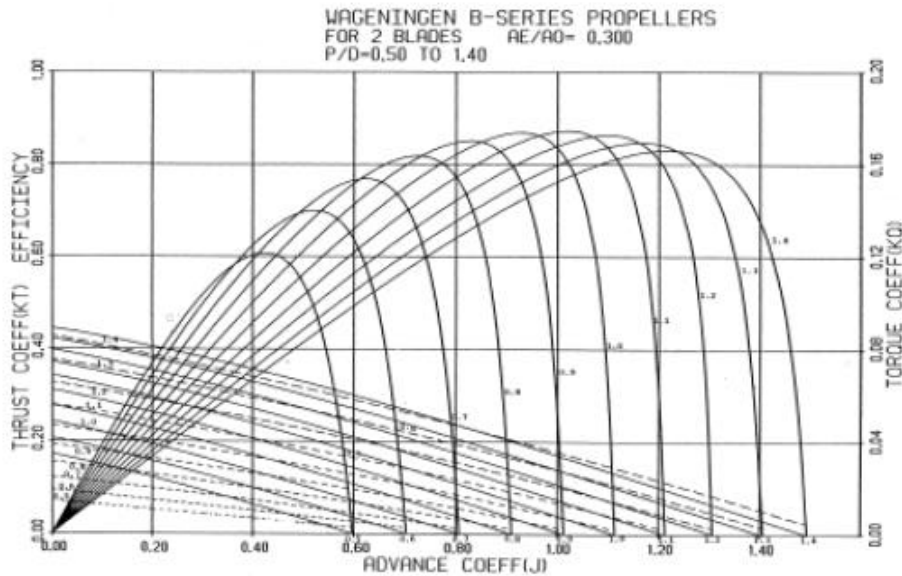


Figura 21 - Série B de Wageningen para hélices de duas pás, razão de área expandida 0.3 e razão passo-diâmetro entre 0.5 a 1.4²²

2.4.4. Computational Fluid Dynamics Analysis (CFD)

Recentemente assistimos a consideráveis avanços nas aplicações relacionadas com a análise e projeto de hélices, designadamente hélices marítimos, recorrendo à análise dinâmica de fluidos por computador, os chamados CFD's. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012)

A vertente com a mais ampla aplicação é a de análise dos hélices, donde se retiram informações relativamente ao comportamento dos mesmos à cavitação e a escoamento viscoso. As questões referentes ao projeto de hélices são, no entanto, mais particulares e de mais difícil resposta, considerando-se que ainda não estamos ao nível destes métodos serem dignos de aceitação geral, sendo contudo, inevitável o seu sucesso num futuro próximo. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012)

²² TRINDADE, J. (2012). *Hidrodinâmica e Propulsão*.

Apesar de algumas dificuldades na aplicação de métodos de análise de escoamento de fluídos por computador para efeitos de descrição do comportamento hidrodinâmico do hélice, existe um trabalho contínuo nesta área, que tem demonstrado o ultrapassar de inúmeras barreiras e o ganho de maturidade nesta matéria. Uma das questões essenciais que esta abordagem permite, é transmitir a perceção do comportamento do hélice em grande pormenor, reunindo todas as forças envolvidas no mesmo, onde estão aplicadas, fatores que as influenciam, questões onde as técnicas clássicas já mencionadas e as demais existentes, simplesmente não se aplicam. Portanto, o projeto de hélices recorrendo a simulações de computador, é uma realidade atualmente tangível, que sofre alterações e mudanças constantes, tem a desvantagem de possuir ainda algumas lacunas pela dificuldade de codificar todos os fenómenos associados à interação do hélice com o fluido onde se encontra, e de correlacioná-los. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012)

2.4.5. “*Surrogate Modeling*”: Uma alternativa na modelação

Inúmeras áreas científicas e de engenharia deparam-se com uma necessidade preponderante na aposta em simulações computacionais, que permitam entender determinados eventos ou na resolução de intrincados problemas de *design*. A criação de simulações computacionais capazes de auxiliar nesta problemática tem sofrido grande adesão, no entanto, determinados problemas exigem simulações altamente fiáveis e complexas, cujo custo poderá não ser muitas das vezes suportado. Portanto, é totalmente compreensível a aposta no uso de redes neuronais, métodos de *Kernel*, assim como outras formas enquadradas dentro daquilo a que se chama “*Surrogate Modeling*”. São abordagens acima de tudo bastante acessíveis economicamente e relativamente simples de utilizar. Têm dado frutos em algumas tarefas, nomeadamente na otimização de *design* e criação de protótipos, motivo pelo qual seja uma ferramenta perfeitamente sensata para resolver a problemática da modelação de hélices. (Koziel, Ciaurri, & Leifsson, 2011)

Tipicamente, e até à atualidade, a modelação de um hélice tem por base conceitos físicos bastante complexos. É um procedimento extenuante, dispendioso e demorado, tudo fatores motivadores na procura de formas de alternativas de modelação, é nesta perspetiva que surge o “*Surrogate Modeling*”. A busca de métodos

alternativos na modelação de hélices atinge o seu expoente máximo na atualidade, fazendo, para o efeito, uso das possibilidades computacionais acrescidas dos dias de hoje. A modelação de hélices é facilitada pela possibilidade de simulações computacionais, numa área cuja aplicação ainda não se encontra perfeitamente proliferada, mas que no entanto simplificariam significativamente a realização da mesma. O *“Surrogate Modeling”* é justamente uma metodologia que assenta nos meios de análise computacional para modelação. Na abordagem utilizada neste trabalho, com recurso a redes neuronais artificiais distingue-se pela criação de modelos, que têm por base a análise de dados multivariados, na perspetiva da relação entrada/saída dos mesmos. Esta relação é utilizada como forma de aprendizagem comportamental, permitindo criar um modelo que correlacione determinadas condições de entrada com os efeitos de saída da mesma. A abordagem do *“Surrogate Modeling”*, com recurso a redes neuronais, exige uma grande base de dados, relativos a provas realizadas em diferentes condições. Quanto maior o volume de dados, maior será a exatidão desta metodologia, uma vez que, o que esta realiza de forma genérica, é uma aprendizagem supervisionada a partir de bases de dados. Pode-se dizer que é um método autodidata, executando interpolação não-linear entre os dados. (Koziel, Ciaurri, & Leifsson, 2011)

O que se pretende, com as provas que terão de ser efetuadas, é que estas sejam realizadas mediante determinadas condições de entrada, com diversas respostas associadas às mesmas. A análise que esta metodologia fará, tem por base a aprendizagem pela observação dos efeitos nas alterações das condições de entrada. Esse estudo permitirá obter uma previsão estimada, de quais são as condições de entrada que trarão o efeito desejado, ou mais proveitoso.

2.5. Cavitação

A cavitação é um fenómeno físico bastante recorrente, ocorre em todo o tipo de equipamentos que durante o seu funcionamento induzam flutuações quer de pressão quer da velocidade do fluído. São exemplos as turbinas, bombas, hélices, rolamentos, entre outros, sendo um fenómeno com consequências nefastas nestes equipamentos. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012)

O estudo deste fenómeno físico remonta a meados do século dezoito, quando *Euler*, um matemático suíço, apresentou um estudo na *Berlin Academy of Science and*

Arts onde fazia referência que um determinado *design* de uma azenha, ou moinho de água, influenciava o desempenho do mesmo. No entanto, e virando o foco para a indústria marítima, só no século dezanove foram feitos progressos e associou-se este complexo fenómeno ao desempenho de um hélice, estudo que foi introduzido por *Reynolds*. Dado o pontapé de saída, foi então que se tentou decifrar a origem deste fenómeno recorrendo a testes em tanque, investigação que *Charles Parsons* iniciou. Atualmente existem diversos centros de investigação, focados nesta área, nos mais diversos cantos do mundo. (Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 2012)

2.5.1. Princípio físico

Em termos físicos, a origem deste fenómeno está relacionada com a formação de regiões de baixa pressão associadas à alta velocidade do escoamento de água pelo hélice, fenómeno facilmente perceptível recorrendo ao teorema de *Bernoulli*, donde se deduz que um aumento da velocidade de escoamento resulta numa redução da pressão. É neste aspeto que a cavitação se distingue da ebulição, a mudança de fase não é resultado do aumento de temperatura por fornecimento de calor, mas sim, resultado da queda repentina de pressão, distinguindo-se por ser um fenómeno aproximadamente isotérmico. As quedas repentinas de pressão referidas são críticas quando caem abaixo do valor de pressão mínima à qual ocorre a vaporização do fluído, no nosso caso de hélices marítimos, quando atinge uma pressão menor à minimia de vaporização da água, a qual é função da temperatura da mesma (Figura 22).

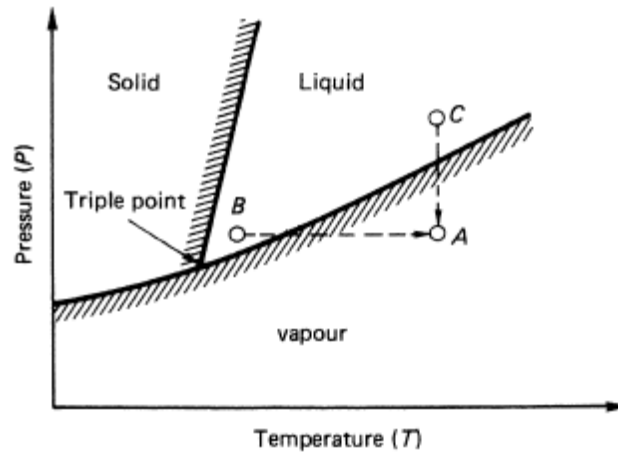


Figura 22 - Diagrama de fases da água²³

Se tal ocorrer, formar-se-ão cavidades preenchidas com vapor, comumente designadas como bolhas de vapor, que desaparecem sob a forma de implosão quando sujeitas a um aumento de pressão (Figura 23). (Resistência e Propulsão (Apontamentos teóricos), 2002)

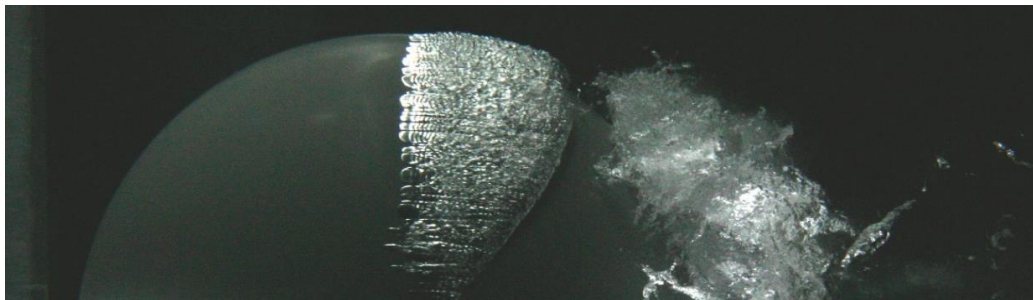


Figura 23 - Formação de bolhas de vapor²⁴

A cavitação é um agregado de fenómenos bastante complexos, porque em torno do hélice temos o escoamento de água em duas fases, líquida e vapor, os quais não são linearmente modeláveis. O que tipicamente se observa é que, dependendo da posição de determinada pá do hélice numa rotação completa, esta alternadamente passará por regiões onde as condições permitem a formação das bolhas e outras onde estas

²³ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

²⁴ BRANDNER, P. (13 de Outubro de 2010). University of Tasmania. Obtido em Fevereiro de 2015, de Australian Maritime College: <https://www.amc.edu.au/news/postgraduate-opportunities-cavitation-research>

colapsam. Sendo do senso comum, e rapidamente perceptível, que devido à pressão hidrostática, tendencialmente na zona de máxima imersão, a pressão total será superior e, na posição de menor imersão, a pressão total será inferior, gerando um diferencial de pressão que poderá permitir a ocorrência e colapso das bolhas durante uma rotação do hélice. Idealmente a água transita de estado, como já mencionado, num ponto em que a pressão total atinge um valor menor à da pressão de vapor a essa temperatura, uma relação bastante simples mas que, no entanto, apenas se aplica a água sem impurezas ou ar dissolvido. Na prática, a água contém ar dissolvido e partículas microscópicas na sua solução, o que permite que o fenómeno de cavitação ocorra mais facilmente, invalidando a sua ocorrência exclusivamente quando obtida a simples relação de pressões. Para efeitos de cálculo da probabilidade de ocorrência do fenómeno de cavitação em determinado escoamento, recorre-se ao número de cavitação σ , parâmetro adimensional, que se obtém através da equação:

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2}$$

Equação 10 - Número de cavitação

onde:

- P_o é a pressão não perturbada;
- P_v é a pressão de vapor à temperatura ambiente de referência;
- ρ é a massa específica do fluido;
- nD é a velocidade característica, onde n representa as rotações por segundo e D o diâmetro do hélice.

Enquanto se verificar σ inferior a σ_v , sendo σ_v o número de cavitação correspondente para a pressão de vapor, o fenómeno de cavitação não ocorrerá, considerando um fluido ideal. Esta abordagem permite uma análise generalista, pese embora, em casos práticos, deve-se considerar uma pressão limite ligeiramente superior à pressão de vapor, aplicando-se um fator de segurança apropriado. (Trindade, 2012)

Existem diversos tipos de cavitação que poderão ocorrer num hélice, dos quais se destacam (Figura 24):

- Cavitação de bolha;

- Cavitação de bolsa;
- Cavitação na raiz da pá;
- Cavitação de vórtice de extremidade;
- Cavitação de vórtice entre o hélice e a querena.

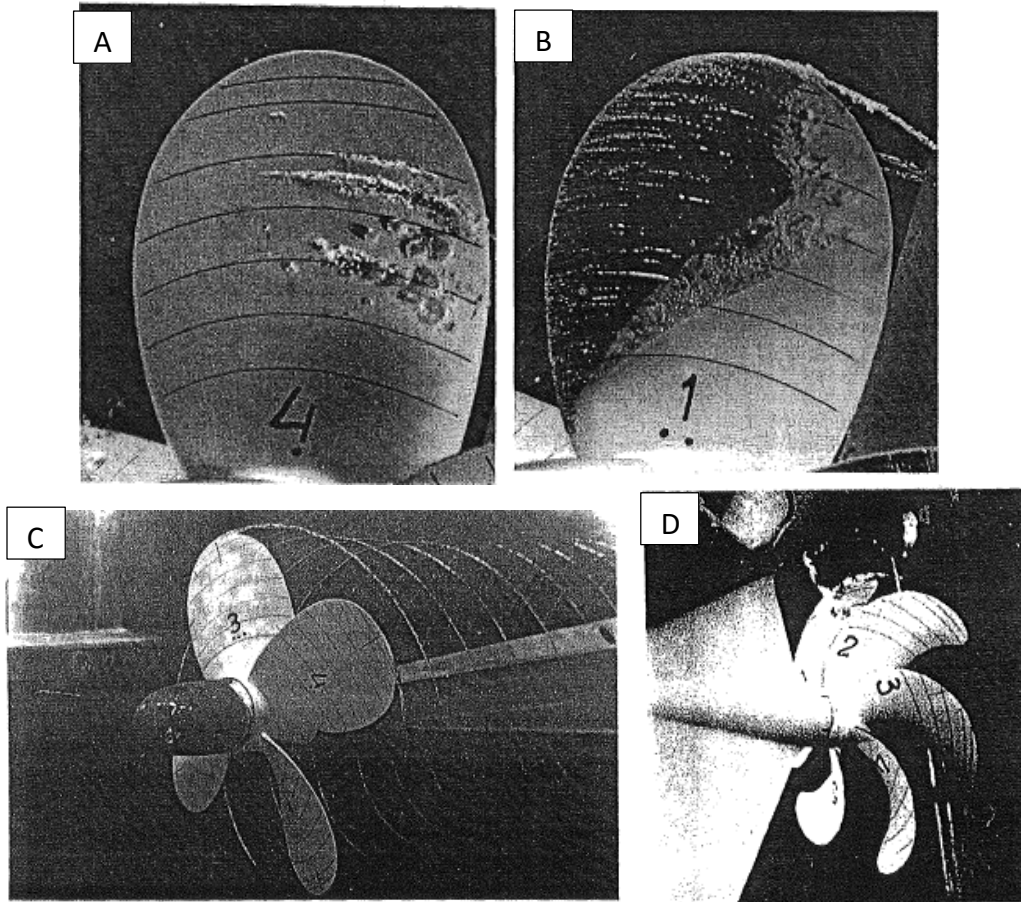


Figura 24 - Tipos de cavitação: (A) cavitação de bolha; (B) cavitação de bolsa; (C) Cavitação de vórtice de extremidade; (D) Cavitação de vórtice entre o hélice e a querena²⁵

O colapso destas bolhas provocam efeitos prejudiciais sob a superfície com que contatam, dos quais se destacam:

- Ruído;
- Vibrações;
- Erosão da superfície das pás;

²⁵ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

- Perda de força propulsiva. (Resistência e Propulsão (Apontamentos teóricos), 2002)

Ruído

A radiação de ruído ocorre porque no colapso das bolhas de vapor formadas no fenómeno de cavitação, são produzidas ondas de choque que apresentam um ruído característico e bastante ensurdecedor. O ruído emitido abrange frequências altas, característica do fenómeno de cavitação e praticamente singular num navio, no entanto, também emite ruído em frequências baixas, contribuindo juntamente com equipamentos tais como o motor, escoamento, rotação do hélice, entre outras. (Resistência e Propulsão (Apontamentos teóricos), 2002)

Erosão

A erosão ocorre devido a dois processos distintos associados ao colapsar das bolhas de vapor, o microjato e as ondas de choque.

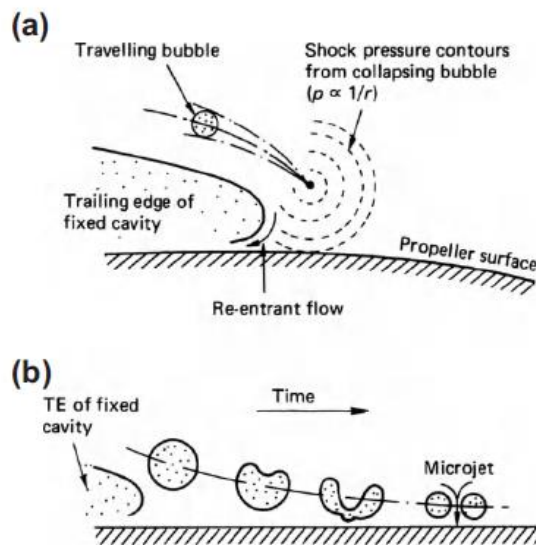


Figura 25 - Processos de erosão: (a) onda de choque; (b) microjato.²⁶

O microjato ocorre na fase final do colapso das bolhas, quando estas deixam de assumir a sua típica forma esférica dando lugar a este mecanismo físico de microjato na direção da superfície das pás do hélice. As consequências do impacto do microjato sobre a superfície é o aparecimento de pequenos orifícios (“pits”) na superfície. As ondas de

²⁶ CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

choque são de idêntica atuação, à semelhança do microjato, ocorrem igualmente na fase final do colapso das bolhas, devido à velocidade da parede da cavidade ser substancialmente superior à do som, provocando a erosão da superfície das pás do hélice (Figura 26). (Resistência e Propulsão (Apontamentos teóricos), 2002)



Figura 26 - Consequências da cavitação, “*pitting*” e erosão do hélice.²⁷

Vibrações

As vibrações são geralmente uma consequência da cavitação de bolsa. As bolsas de cavitação presente nas pás estão preenchidas com um grande volume de vapor, o qual varia consideravelmente no percurso de revolução da pá. O dinamismo destas variações provocam grandes flutuações de pressão à frequência da pá e aos seus múltiplos, frequências essas, abaixo das audíveis. As flutuações de pressão apresentam um grande comprimento de onda, maior que a distância ao casco, refletindo-se num comportamento do fluido como incompressível e flutuações de pressão em fase com a pressão na cavidade. A fase constante das flutuações de pressão gera efetivamente vibrações no casco do navio, no entanto, a própria passagem da pá gera também flutuação de pressão que também contribui para o efeito, sendo mais notável na ocorrência de cavitação no hélice (Figura 27). (Resistência e Propulsão (Apontamentos teóricos), 2002)

²⁷ *National Park Service*. (s.d.). Obtido em Fevereiro de 2015, de <http://www.nps.gov/safr/learn/historyculture/propsaquaticpark.htm>

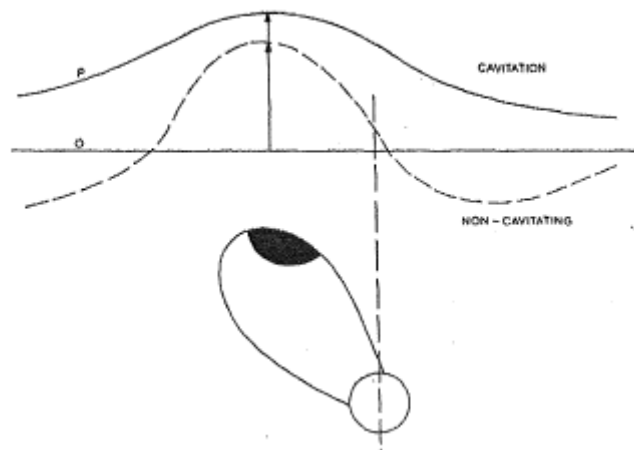


Figura 27 - Flutuação de pressão devido à passagem do hélice com cavitação e sem cavitação²⁸

Perda de força propulsiva

A perda de força propulsiva é mais significativa quando o fenómeno de cavitação ocupa uma boa parte das pás do hélice, entre 20% e 25% de cada pá. Isto irá refletir-se numa perda de impulso e binário que o hélice poderá entregar. A perda de impulso é mais significativa do que a perda de binário, no entanto, são consequências que se opõem ao funcionamento eficiente de um hélice. Outro dos fatores que influencia a perda de força propulsiva, é a velocidade rotacional do hélice, caso esta apresente grandes valores poderá intensificar a perda de eficiência do hélice. (Resistência e Propulsão (Apontamentos teóricos), 2002)

2.5.2. Considerações geométricas

Tem-se feito um grande esforço na matéria da cavitação, no sentido de minorar o aparecimento deste fenómeno e suas consequências. No que concerne ao fenómeno de cavitação, é sabido que, é predominantemente influenciado pelo campo de pressão gerado no plano do hélice. A sua prevenção terá que passar obrigatoriamente pelo controlo da pressão mínima absoluta naquele escoamento, para que não se estabeleçam as condições necessárias para a formação das bolhas de cavitação. Em termos geométricos tipicamente opta-se por soluções que permitam uma distribuição

²⁸ (2002). *Resistência e Propulsão (Apontamentos teóricos)*. Universidade Técnica de Lisboa

da força propulsiva por uma área maior, tais como, aumentar o diâmetro do hélice ou a razão da área expandida (A_E/A_0). (Trindade, 2012)

Existem também soluções para estimar a possibilidade de ocorrência de cavitação, tal como a utilização do diagrama de *Burril* (Figura 28), ainda que não sejam métodos muito rigorosos, são uma referência. (Trindade, 2012)

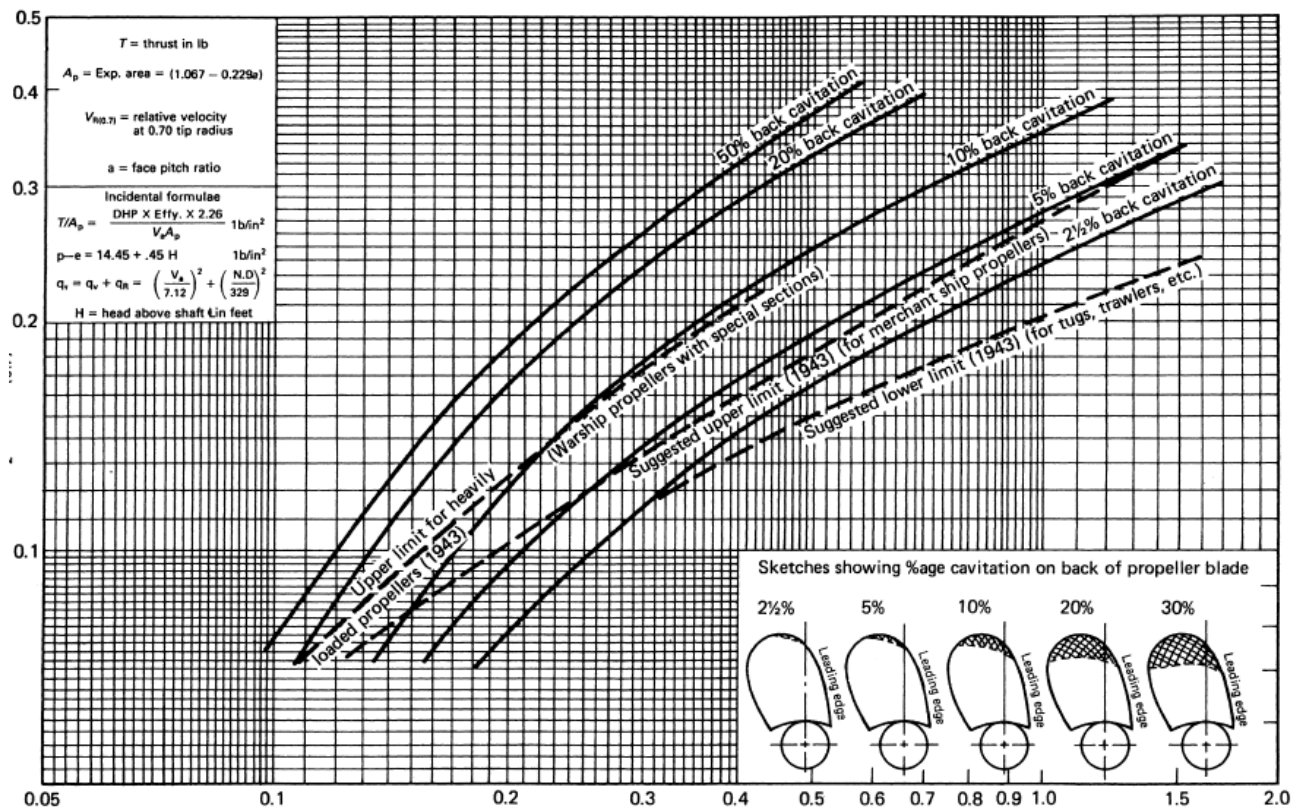


Figura 28 - Diagrama de *Burril* para escoamento uniforme²⁹

O diagrama de *Burril* tem representado nos eixo das abcissas o número de cavitação e, nas ordenadas, o coeficiente de *Burril*. São sugeridos diversos limites para a área projetada do hélice, quer de navios mercantes, de guerra, rebocadores entre outros, que permita prevenir o fenômeno de cavitação. Existem também alguns limites que admitem a ocorrência de cavitação, em determinada percentagem, a qual reflete a área afetada pelo fenômeno de cavitação relativamente à área da pá do hélice. O coeficiente de *Burril* é calculado da seguinte forma:

²⁹ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

$$\tau_c = \frac{T}{q_{0,7R} \cdot A_p}$$

Equação 11 - Coeficiente de Burrell

onde, T representa o impulso, A_p é a área projetada do hélice e o parâmetro $q_{0,7R}$ é dado por:

$$q_{0,7R} = \frac{1}{2} \rho V_R^2$$

Equação 12 - Cálculo do parâmetro $q_{0,7R}$

em que V_R é o valor absoluto da velocidade local a 70% do raio do hélice:

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + (0,7\pi nD)^2}$$

Equação 13 - Velocidade local a 70% do raio do hélice

onde V_a é a velocidade de entrada do escoamento no plano do hélice. (Trindade, 2012)

2.6. Relação entre motor e hélice

A fase de projeto de uma instalação propulsora terá de passar obrigatoriamente por um aspeto essencial, a relação entre motor e hélice. A fundamentação do estudo da mesma, assenta na permanente procura pela otimização da conversão da energia que o motor entrega, em impulso, para condições nominais de utilização. Esta relação entre motor e hélice é materializada pela análise de duas características elementares de ambos os sistemas, o binário e a potência. O motor é responsável por gerar o binário e potência que o hélice recebe, esta interação entre ambos, é estabelecida respeitando o princípio da conservação de energia, ou seja, considera-se que o hélice recebe toda a potência desenvolvida pelo motor, negligenciando desta forma, as perdas que eventualmente surjam no sistema. O binário, e à semelhança da potência, seguindo o mesmo princípio enunciado, será igual no motor e hélice, isto para o caso em que não existe uma caixa de velocidades que possa criar uma desmultiplicação da rotação do motor para o hélice. Neste caso, terá de ser equacionado essa relação na análise do sistema. (Woodward, 1976)

Convencionou-se que a relação ótima entre o motor e hélice poderá ser definida pela análise da representação gráfica das curvas de potência dos motores e dos hélices.

As curvas de potência e binário são elaboradas em função das rotações por minuto (RPM) do motor ou do hélice. (Woodward, 1976)

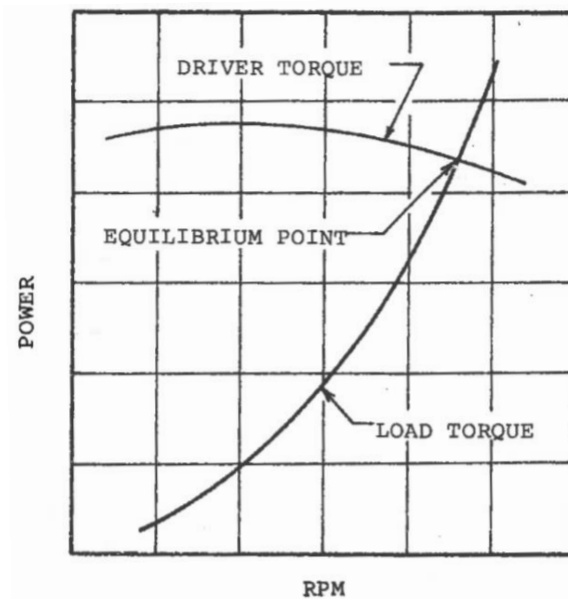


Figura 29 - Curvas de potência e binário³⁰

Na Figura 29 estão representadas as curvas do binário gerado pelo motor (*Driver Torque*) e o binário que o hélice recebe (*Load Torque*). A interseção destas duas curvas representa o que se considera como o ponto de funcionamento ideal (*Equilibrium Point*), pelo que a configuração do motor e hélice é ajustada até que se alcance esta relação ideal. No entanto, este ponto de funcionamento é dinâmico, consequência da influência de fatores que provocam oscilações no binário e potência que é transmitido e rececionado. Fatores como a resistência do casco, condições climatéricas, sistemas auxiliares acoplados ao motor principal, entre outros, provocam maior resistência, menor eficiência da instalação, tudo consequências que tornam o ponto de funcionamento ideal variável. (Woodward, 1976)

Num motor fora de borda, seja ele elétrico ou de combustão interna, a transmissão de potência e binário entre o motor e o hélice é feita por intermédio de um veio rotativo. Este veio rotativo, como intermediário, apresenta uma determinada velocidade de rotação (RPM) e binário. A velocidade de rotação, a menos que exista

³⁰ WOODWARD, J. B. (Setembro de 1976). Matching Engine And Propeller. Universidade de Michigan. Obtdo de http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/91735/Publication_No_142.pdf?sequence=4

alguma desmultiplicação, tipicamente manter-se-á inalterada face à do motor, no entanto, o binário poderá ser afetado pela existência de retentores e rolamentos. Existem diversas abordagens que permitem uma análise da operação das inúmeras configurações motor-hélice. Concretamente, no caso dos motores fora de bora de combustão interna, as características de funcionamento destes sistemas poderá ser representada graficamente pelas curvas dos motores sob diferentes pressões médias efetivas ao freio (*Brake Mean Effective Pressure – BMEP*). É uma característica utilizada como termo de comparação do desempenho de motores, e refere-se à pressão média necessária no ciclo de um êmbolo, ou do conjunto de êmbolos de um motor, para obter uma determinada potência à saída. O *BMEP* é um conceito meramente teórico, não se traduzindo na pressão a que os êmbolos estão sujeitos de fato. O *BMEP* poderá ser portanto, utilizado como indicação para obtermos uma relação entre a potência e o número de rotações por minuto (RPM). (Woodward, 1976)

A representação gráfica dos diferentes motores, consoante o *BMEP*, a diferentes regimes de rotação (RPM) ou de um motor a diferentes regimes de funcionamento, originam as retas que se apresentam no gráfico da Figura 30 (*Engine Power*). Nesse mesmo gráfico, também estão representadas as curvas de potência de diferentes hélices (*Propeller Power*), as quais são elaboradas, tipicamente, pela variação do passo para um hélice com determinado diâmetro, número de pás e razão da área da pá (*Blade Area Ratio*). (Woodward, 1976)

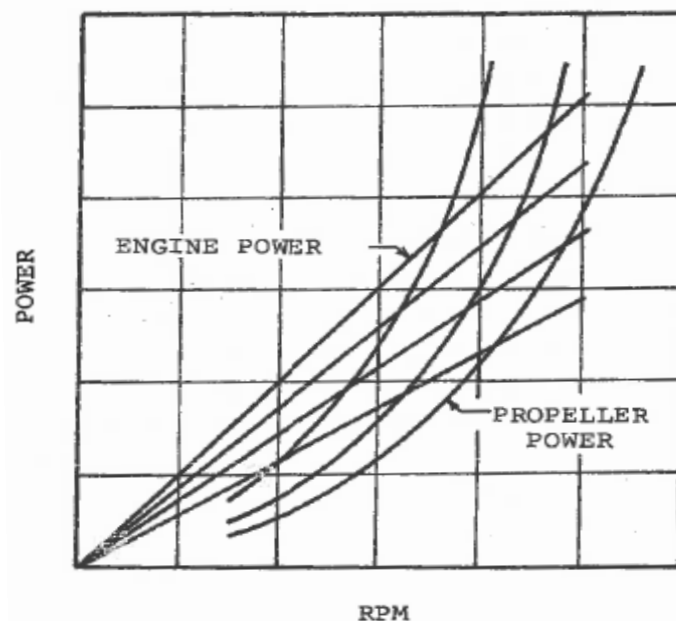


Figura 30 - Curvas características de funcionamento do motor e hélice³¹

As condições de operação do sistema motor-hélice ficam assim definidas pela interseção entre as curvas de potência do hélice (*Propeller Power*) e as retas das condições de funcionamento dos diferentes motores (*Engine Power*). Na Figura 30 é possível verificar que existem diversas possibilidades de associação entre motor-hélice. A escolha mais acertada do sistema motor-hélice é, mesmo assim, bastante complexa. A eficiência de um hélice ao longo das curvas de potência do mesmo é variável, sendo que existe uma determinada velocidade (RPM) para o qual este obtém a máxima eficiência, pelo que é necessário averiguar se o sistema motor-hélice se encontra bem balanceado, porque existe o risco do motor se encontrar subdimensionado ou sobredimensionado para um hélice ou vice-versa. Por instância, um motor sobredimensionado para um hélice, poderá estar a entregar uma velocidade de rotação acima daquela para que o hélice foi projetado, resultando na sobrecarga deste último. Por outro lado, o motor poderá não conseguir entregar uma velocidade de rotação correspondente ao ponto em que o hélice atinge a máxima eficiência, neste caso,

³¹ WOODWARD, J. B. (Setembro de 1976). Matching Engine And Propeller. Universidade de Michigan. Obtdo de http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/91735/Publication_No_142.pdf?sequence=4

estamos perante um motor subdimensionado ou um hélice sobredimensionado, consoante a perspetiva. (Woodward, 1976)

Em suma, existem diversos fatores a considerar quando se pretende estabelecer um ponto de operação ideal. Na Figura 31, encontra-se um gráfico representativo de um apanhado de fatores que influenciam o ponto de operação ideal, onde se circunscribe a área de operação do motor (*Operating Region*). Esta área é delimitada pelos regimes de rotação (RPM) e *BMEP*, sendo possível encontrar o ponto de operação ideal (*Intended Design Point*) onde a curva do hélice e do motor se cruzam para a entrega de potência máxima possível. (Woodward, 1976)

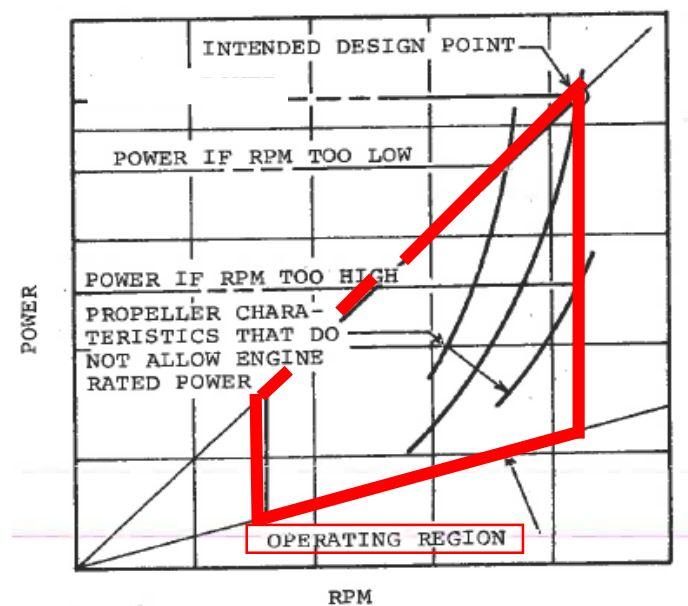


Figura 31 - Área de operação do motor³²

Da análise do gráfico da Figura 31, também é possível verificar que hélices com outras características não permitem uma entrega de potência tão acentuada como o hélice que oferece o melhor ponto de operação ideal. Neste caso, um hélice de menor passo atingirá a velocidade de rotação ideal antes da *BMEP* ideal (*Power if RPM Too High*), no caso do hélice de passo maior, a *BMEP* ideal é atingida mas não corresponderá à velocidade de rotação ideal (*Power if RPM Too Low*). (Woodward, 1976)

³² WOODWARD, J. B. (Setembro de 1976). Matching Engine And Propeller. Universidade de Michigan. Obtdo de http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/91735/Publication_No_142.pdf?sequence=4

Capítulo 3. Propulsão elétrica

A propulsão elétrica, apesar de se julgar ser uma abordagem recente, foi originalmente idealizada há mais de cem anos. No entanto, a sua aplicação prática, tendo em vista aspetos tais como, controlar o motor para entregar diversos regimes de velocidade numa gama de potências elevada, apresentar uma configuração compacta, fidedigna e competitiva comercialmente com as alternativas existentes no mercado, só surgiu no início da década de oitenta sensivelmente, marcado pelas crescentes necessidades e exigências das plataformas marítimas. Esteve durante um bom período, reservada a aplicações de elevada especificidade, como em navios quebra-gelo, de investigação, entre outros, mas o surgimento de tecnologias que permitem a conversão AC/DC abriram novas possibilidades, tendo-se assistido a uma rápida proliferação deste tipo de tecnologia noutro tipo de navios, nomeadamente, navios de passageiros. (Ådnanes, 2003)

Tipicamente, a configuração existente nestes navios, é constituída por grandes motores elétricos que acionam os hélices, cuja energia é obtida através de grupos eletrogéneos. A configuração mais comum é sem dúvida a *diesel*-elétrica, não sendo exclusiva, os geradores poderão também estar associados a turbinas a gás, turbinas a vapor, entre outros, consoante as necessidades energéticas da plataforma onde se inserem. Os principais fatores motivadores à utilização deste tipo de configuração, mais complexa e, sobretudo, mais dispendiosa, são os seguintes:

- Menor custo do ciclo de vida;
- Ocupa menos espaço e existe uma maior flexibilidade na distribuição dos equipamentos;
- Menor ruído e vibrações;
- Menor impacto ambiental e maior segurança de operação;
- Melhor manobrabilidade do navio. (Alves R. N., 2007)

Menor custo do ciclo de vida

O menor custo do ciclo de vida está associado principalmente a dois fatores, diminuição dos custos associados à manutenção e operação do navio, concretamente, neste último, relativamente ao consumo de combustível do mesmo.

Os custos de manutenção poderão ser menores quando comparados aos que a propulsão tradicionalmente utilizada, propulsão a *diesel*, apresenta. Os motores elétricos, ou mesmo, qualquer sistema elétrico, no atual patamar de desenvolvimento, apresentam elevada automação, o que permite uma deteção antecipada das necessidades de manutenção do sistema. Inclusivamente os custos e períodos das intervenções de manutenção nestes sistemas são geralmente inferiores aos de outras instalações. Ainda comparativamente aos motores a *diesel*, é do conhecimento geral que grandes variações de carga nestes motores é nefasta aos mesmos, no entanto, os motores elétricos conseguem-no abstando-se de efeitos tão prejudiciais. (Alves R. N., 2007)

A redução dos consumos está associada à possibilidade de otimizar a carga imposta aos motores geradores, visto que nesta disposição estes não estão mecanicamente interligados ao acionamento do hélice. Normalmente teremos mais que um, e poderemos associá-los por forma a não sobrecarregar nenhum, e atingir o ponto de máxima eficiência dos mesmos. (Alves R. N., 2007)

Menor espaço ocupado e maior flexibilidade na distribuição de equipamentos

Numa instalação a *diesel* não existe grande flexibilidade no que diz respeito à localização dos motores propulsores, os quais são sempre de grandes dimensões quando comparados com a dimensão do navio, apresentando-se como um grande entrave à disposição interna do navio. No caso de uma instalação elétrica, temos a vantagem de podermos decidir os locais mais apropriados à colocação dos grupos eletrogéneos, uma vez que é possível conduzir a energia elétrica gerada nestes grupos para onde mais nos convier. A casa da máquina, neste caso em concreto, será muito mais compacta, permitindo criar espaço para carga e/ou passageiros. A cablagem e encanamentos também poderão ser reduzidos através de uma distribuição engenhosa dos motores elétricos e grupos eletrogéneos (Figura 32). (Alves R. N., 2007)

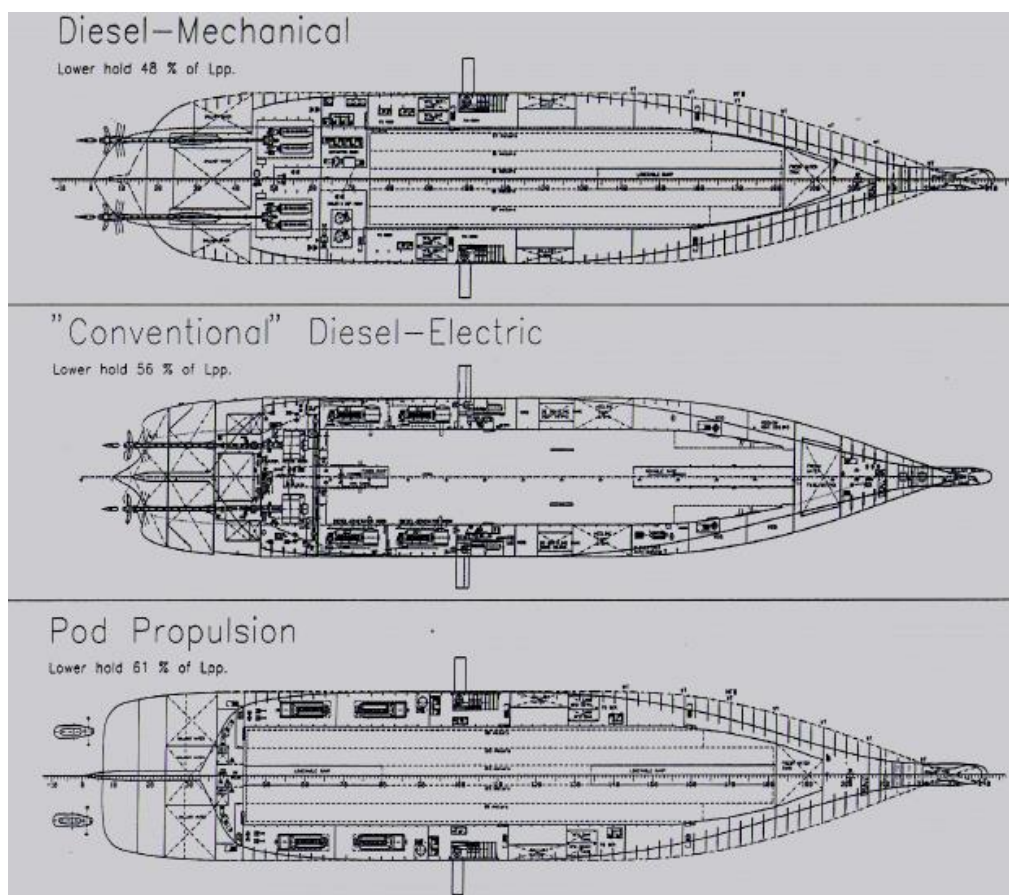


Figura 32 - Exemplo de como o espaço poderá ser utilizado de melhor forma adotando uma instalação elétrica, de cima para baixo, disposição de uma instalação a *diesel*, *diesel-elétrica*, e "pod"³³

Menor ruído e vibrações

Um motor elétrico, por natureza, emite pouca vibração, o que se continua a verificar ainda que o propósito seja o acionamento de um hélice. Em adição a esta característica, na fase de projeto poderá ser feito um estudo relativamente à localização dos motores, pois existe uma maior flexibilidade na disposição dos mesmos, tal como referido, para que a transmissão de vibrações à estrutura seja diminuta, não negligenciado ainda o fato de tipicamente as caixas redutoras serem dispensáveis. Existem ainda outras soluções como a simples introdução de amortecedores de vibração aos motores. (Alves R. N., 2007)

³³ ÅDNANES, A. K. (2003). *Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion*. ABB.

Menor impacto ambiental e maior segurança de operação

O fato dos motores geradores funcionarem a velocidade constante e carga otimizada resulta em menores emissões de gases nocivos ao ambiente.

No que diz respeito à segurança na operação, esta é aumentada pela redundância que inevitavelmente a instalação terá que ter, nomeadamente, nos motores geradores, que caso algum falhe teremos sempre outro que continuará a funcionar. Relativamente aos motores elétricos, optando por uma configuração que tenha pelo menos dois, muito comum na propulsão *diesel*, teremos também uma importante redundância. Em caso extremo de falha completa dos motores geradores, sempre haverá uma reserva de energia suficiente para que os motores elétricos funcionem durante algum tempo, que poderá ser o suficiente para fazer a diferença. (Alves R. N., 2007)

Melhor manobrabilidade do navio

Este tipo de propulsão permitiu o desenvolvimento de hélices especiais, tais como os “*pods*” ou propulsores azimutais. Comparativamente às habituais instalações com linha ou linhas de veios, estes propulsores têm em si incorporados o motor elétrico, numa cápsula de forma hidrodinâmica com a capacidade de rotação em 360°. Esta característica permite uma enorme capacidade de manobra e propulsão (Figura 33). (Trindade, 2012)

Em condições de baixas temperaturas, e conseqüentemente, formação de gelo os motores elétricos destacam-se por conseguirem entregar o binário máximo a baixos regimes de rotação. (Trindade, 2012)



Figura 33 - Propulsores azimutais³⁴

3.1. Princípio de funcionamento

O tipo de máquina mais utilizado é a máquina assíncrona, ou máquina de indução, uma máquina acessível, simples e bastante sólida, com diversas aplicações possíveis. Apesar de apresentar um funcionamento a velocidade constante quando alimentada diretamente pela rede de distribuição elétrica, poderá apresentar um funcionamento a regimes variáveis se lhe associarmos uma fonte de alimentação eletrónica que permita uma alimentação com tensão e frequências variáveis, o que permite uma ampla gama de utilizações nas mais diversas áreas. (Dente, 2012)

Um dos aspetos mais interessantes das máquinas assíncronas, é que são reversíveis, pelo que a máquina não funciona exclusivamente como força motriz, mas também, como gerador. (Dente, 2012)

O aspeto construtivo geral de uma máquina assíncrona é composto por uma peça fixa denominada por estator, e outra móvel, o rotor. O estator tem forma de tubo cilíndrico que na sua periferia interna apresenta cavas onde estão inseridos os enrolamentos. (Figura 34). Estes enrolamentos serão os responsáveis pela formação de um campo magnético no estator. (Dente, 2012)

³⁴ TRINDADE, J. (2012). *Hidrodinâmica e Propulsão*.



Figura 34 - Estator de um motor de indução. Aspeto do elemento constituído por material ferromagnético e locais para alojar os enrolamentos à esquerda e, já com as cavas preenchidas pelos enrolamentos à direita³⁵

Na Figura 34, à esquerda, denota-se o fato do estator ser constituído por material que reduz ao mínimo as perdas no circuito magnético que se forma, tipicamente ferro silicioso. A armação exterior do estator é constituída por aletas que facilitam o arrefecimento do mesmo. (Dente, 2012)

O rotor tem também forma cilíndrica, e é inserido coaxialmente no interior do estator, onde irá ser sujeito a movimento rotativo. É constituído por material com alta permeabilidade magnética, e apresenta duas soluções construtivas, o rotor bobinado e em gaiola de esquilo. O rotor bobinado apresenta uma distribuição de condutores semelhante à do estator, já o rotor em gaiola de esquilo é bastante mais simples pois dispõe de barras condutoras em alumínio que são posicionadas em intervalos regulares na periferia do rotor, no entanto, em ambas as soluções os circuitos são curto-circuitados (Figura 35). O espaço que separa o rotor e o estator é denominado de entreferro. (Dente, 2012)



Figura 35 - Rotor bobinado à esquerda e em gaiola de esquilo à direita³⁶

³⁵ DENTE, A. (2012). Máquina Assíncrona.

³⁶ DENTE, A. (2012). Máquina Assíncrona.

Geralmente os condutores do estator formam um enrolamento trifásico, e as espiras são distribuídas de uma forma tal, que no entreferro é obtida uma distribuição de indução magnética. Quando o enrolamento é percorrido por tensão trifásica origina um campo magnético girante, com velocidade síncrona. Nos circuitos fechados do rotor irão ser induzidas forças eletromotriz que originam correntes elétricas. Os condutores do rotor são sujeitos a forças de *Lorentz*³⁷, o que gera binário motor, binário esse que só será originado caso a velocidade de rotação do rotor seja diferente da do campo girante. (Dente, 2012)

3.2. Motores Torqeedo

Os motores que serão utilizados nos ensaios que a ser realizados, são motores elétricos da marca *Torqeedo*, especificamente, o modelo *Cruise 2.0 R* da referida marca (Figura 36). É um motor comandado por intermédio de um telecomando. As especificações técnicas deste motor poderão ser consultadas no Anexo A.



Figura 36 - *Torqeedo Cruise* e telecomando³⁸

Estes motores obtêm a energia para o seu funcionamento a partir de baterias de lítio recarregáveis (Figura 37).

³⁷ Força ocasionada em cargas devido à sua interação com um campo eletromagnético

³⁸ Torqeedo Starnberg.Germany. (s.d.). Obtido em Março de 2015, de Torqeedo Starnberg.Germany: <http://www.torqeedo.com/en/products/outboards/cruise>



Figura 37 - Baterias de lítio³⁹

Entre as vantagens já referidas, a empresa que manufatura estes motores fora de bordo alega que são substancialmente mais eficientes do que outros motores de combustão equiparados (Figura 38). O motivo pelo qual isto é possível, está associado ao fato dos motores elétricos conseguirem a mesma potência propulsiva que um motor de combustão interna, embora com uma menor entrega de potência no veio. A razão deste fenómeno está nas diferenças das curvas de binário de um motor de combustão interna e um elétrico, pois um motor de combustão interna atinge o pico de binário máximo a determinada velocidade do motor, enquanto um motor elétrico ostenta uma gama mais ampla de regimes aos quais a entrega de binário é máxima. (Torqeedo Starnberg.Germany, s.d.)

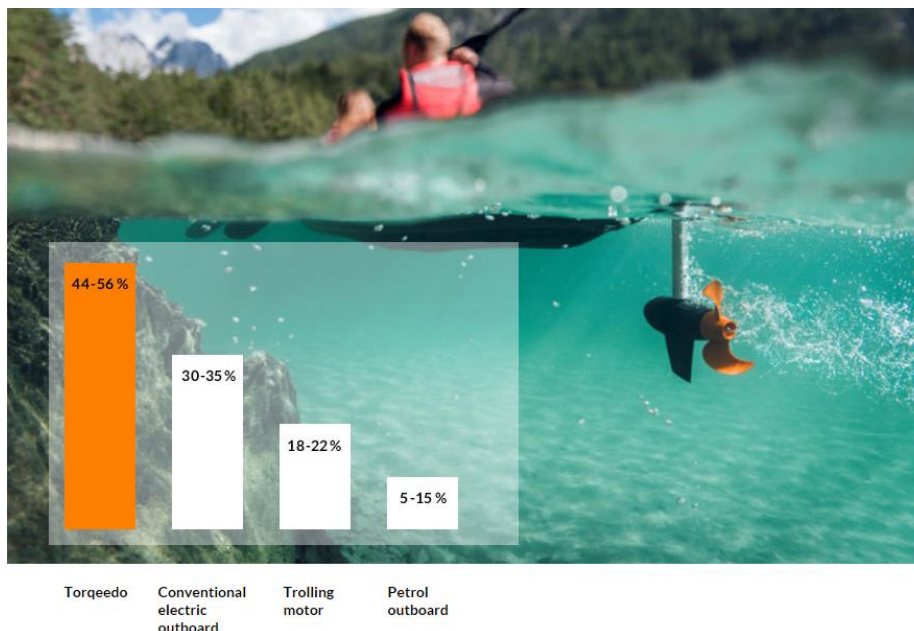


Figura 38 - Comparativo de eficiência de diversos motores fora de bordo³⁹

³⁹Torqeedo Starnberg.Germany. (s.d.). Obtido em Março de 2015, de Torqeedo Starnberg.Germany: <http://www.torqeedo.com/en/products/outboards/cruise>

Irão ser utilizados 3 modelos de hélices distintos e especificamente destinados para este modelo, de construção da *Torqueedo* (Figura 39).



Figura 39 – Da esquerda para a direita: v8/p350; v19/p4000; v30/p4000⁴⁰

⁴⁰ Torqeedo Starnberg.Germany. (s.d.). Obtido em Março de 2015, de Torqeedo Starnberg.Germany: <http://www.torqeedo.com/en/products/outboards/cruise>

Capítulo 4. Testes

4.1. Propósito dos testes

A finalidade dos testes a realizar, será recolher os dados de operação dos distintos hélices que serão utilizados mediante as condições que lhes forem impostas, concretamente, regime de motor e condições de carga. Estes dados serão posteriormente utilizados para treinar a rede neuronal por forma a obter uma relação entre todos estes parâmetros e assim, chegar a conclusões relativas à viabilidade da modelação de hélices através do *“Surrogate Modeling”*.

4.1.1. Ações de planeamento e preparação para testes.

Inevitavelmente, algumas ações teriam de ser efetuadas antes de iniciar os testes, estas foram, essencialmente:

- Obtenção dos hélices;
- Planeamento dos testes e elaboração de folhas de registos;
- Preparação da embarcação;
- Preparação do motor elétrico.

Obtenção dos hélices

O processo de aquisição dos hélices foi iniciado prontamente, por se desconhecer quanto tempo demoraria. Os dois motores elétricos à disposição para os testes apresentavam, por si só, dois hélices distintos, da gama de três hélices disponíveis para estes motores. Portanto, para possuir os hélices necessários para os testes, faltava adquirir apenas um dos hélices. Infelizmente, o hélice em falta era o mais caro dos três, mas o processo decorreu normalmente e até celeremente.

Planeamento dos testes e elaboração folhas de registos.

Nesta fase foi necessário estabelecer os aspetos a serem testados, o local de operação, a fita de tempo prevista, os dados a serem recolhidos e como seriam feitos os registos dos mesmos.

Apesar de ter havido uma tentativa de situar o período de testes mais cedo, houve a impossibilidade de o fazer, por diversas questões, nomeadamente no que diz

respeito à disponibilidade de pessoal e falta de um período específico apenas para desenvolvimento da dissertação de mestrado numa altura mais antecipada.

Relativamente aos hélices, decidiu-se recolher os dados de passo do hélice e diâmetro. O passo do hélice e diâmetro são dados fornecidos pelo fabricante, pese embora, um dos hélices não tinha especificação quanto ao seu passo. Apesar das inúmeras tentativas de obter esta informação junto do fabricante, nenhuma foi bem-sucedida. O passo do hélice em falta foi calculado de forma expedita⁴¹. Os dados relativos aos hélices são, portanto:

	Hélice v8/p350	Hélice v19/p4000	Hélice v30/p4000
Passo	10 Polegadas	12 Polegadas	15,59 Polegadas
Diâmetro	300 mm	300 mm	320 mm

Quadro 1 - Características dos Hélices

A escolha das unidades baseou-se no fato de ser mais perceptível a diferença em milímetros entre os diâmetros do hélice, do que seria caso fosse em polegadas, sendo que, a informação disponibilizada pelo fabricante também vem nesta unidade. O passo varia consideravelmente em polegadas, também é fornecido pelo fabricante nesta unidade, não havendo necessidade de converter para centímetros.

O propósito seria testar individualmente cada hélice a determinadas condições de funcionamento. Estipulou-se testar cada hélice a quatro condições de carga, sem pesos adicionados (Carga inicial), com 10kg, 20 kg e, por último, com 30kg adicionados à embarcação. Cada condição de carga seria testada a um regime do motor, num total de quatro. Cada teste, a determinada condição de carga e regime de motor, seria repetido três vezes, por forma a obter-se o maior número de dados possíveis e uma maior exatidão na definição do funcionamento do hélice sob as condições impostas.

⁴¹ Seguindo os procedimentos apresentados em: HERRERA, R. (Abril de 2015). Propeller Pages. Obtido de http://www.propellerpages.com/?c=articles&f=2006-03-27_manual_pitch_measurement

A elaboração das folhas de registos foi feita com base nos dados que seriam recolhidos. Esses dados seriam a potência instantânea entregue ao motor, disponibilizada no telecomando do mesmo, e o tempo demorado a executar cada teste. Elaborou-se também uma folha para registo dos dados meteorológicos referentes a cada teste. A decisão da recolha de dados meteorológicos foi algo que aconteceu pouco antes da data de início dos testes, embora não se tivesse colocado essa hipótese anteriormente, de fato o desempenho dos hélices é influenciado pelos mesmos, por isso julgou-se ser a melhor opção. Esta decisão tardia deu pouco tempo para planear como, quando e onde seriam recolhidos estes dados.

Todos os aspetos referentes ao planeamento estão sucintamente descritos no Apêndice A.

Preparação da embarcação

Naturalmente, um dos aspetos mais fundamentais será a preparação da embarcação (um catamarã), no que toca à segurança da sua operação e modo de emprego. A estabilidade do catamarã é um aspeto fulcral, este terá que suportar o peso de uma pessoa, motor elétrico, leme e, ainda, a carga que lhe for imposta. É uma embarcação de pequenas dimensões, no entanto, tem a vantagem de ser um veleiro, o que à partida é uma mais-valia no aspeto da estabilidade. A embarcação teria que ser sujeita a uma adaptação para suportar apenas um motor, em vez de dois, como a configuração estava preparada (Figura 40).



Figura 40 - Configuração do catamarã para suportar um motor elétrico em cada bordo

A solução encontrada passou pela construção de uma estrutura que suportasse o motor, a qual seria fixa à calha existente no catamarã, onde assentam os dois motores. O modo de fixação seria feito por intermédio de parafusos, num total de seis. Para manobrar a embarcação, foi necessário também adaptar uma cana de leme para este motor elétrico (Figura 41).



Figura 41 - Adaptação da embarcação para levar apenas um motor elétrico

Preparação do motor elétrico

As ações de preparação do motor elétrico envolveram verificar o seu funcionamento e a forma de desmontagem/montagem dos hélices.

As verificações de funcionamento foram feitas juntamente com o camarada Chadli Amir, que também necessitaria de usar os motores para realizar alguns testes no âmbito da sua dissertação. Verificou-se o correto funcionamento de ambos os motores, com o objetivo de atestá-los como prontos para os testes e, perceber o funcionamento dos mesmos. O manual de instruções dos motores é bastante direto e simples de interpretar. Está tudo explicado de forma sucinta, revelando o quão simples estes motores são de operar, como verificámos na preparação dos mesmos.

Foi também pelo manual de instruções que se averiguou como se procederia para a montagem/desmontagem dos hélices. De imediato verificou-se que seria uma tarefa simples, a qual está bem esclarecido no manual de instruções, e que envolve a desmontagem/montagem dos componentes representados na Figura 42.

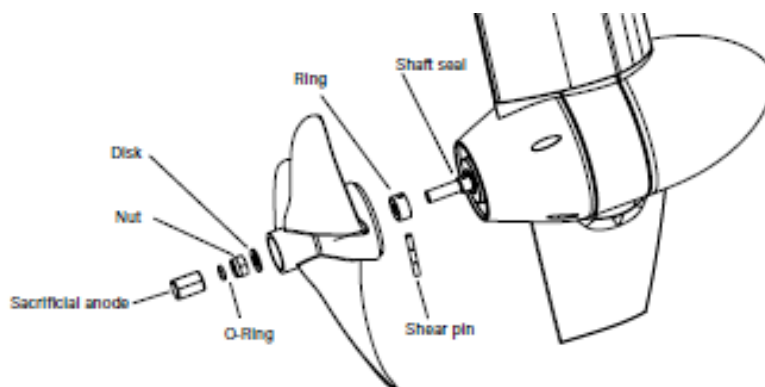


Figura 42 - Componentes do veio do hélice⁴²

4.2. Testes efetuados

4.2.1. Preparativos para testes

Os testes foram planeados para serem concluídos num período de tempo inferior a duas semanas. No entanto, e devido a algumas peripécias, a linha de tempo inicialmente planeada, não foi cumprida.

O aprontamento da embarcação foi realizado, e tal como previsto, na Segunda-Feira dia 27 de Abril de 2015. As ações de preparação envolveram (Figura 43):

- Preparação dos pesos que definem as diferentes condições de carga (10kg, 20kg e 30kg);
- Montagem do motor na embarcação e atestamento do seu funcionamento;
- Acondicionamento das baterias;
- Proteção dos equipamentos para evitar problemas de infiltração de água salgada;
- Certificação da estanqueidade da embarcação e preparação da mesma para ser içada pela grua;
- Montagem do leme;

⁴² Torqeedo Stanberg.Germany. (s.d.). Operating Instructions Cruise R/T. Alemanha.

- Levantamento de colete salva vidas;
- Levantamento de cronómetro;
- Levantamento de rádios para comunicações e verificação de funcionamento dos mesmos.



Figura 43 - À esquerda a preparação da embarcação e à direita a preparação dos pesos

4.2.2. Realização dos testes

A primeira fase da realização dos testes envolveu a definição dos regimes de motor a ser testados. Inicialmente, o pretendido seria definir os regimes na alavanca do motor, definindo as posições da mesma como os diferentes regimes, no entanto, o telecomando do motor disponibiliza informação relativamente à potência instantânea entregue ao motor. Por este motivo decidiu-se testar o motor a quatro regimes diferentes que ficariam definidos a valores de referência de potência, concretamente:

Regime 1	Regime 2	Regime 3	Regime 4
150 W	350 W	850 W	Potência máxima

Quadro 2 - Valores de referência para potência

O intuito seria testar um leque de regimes abrangente, para que a rede neuronal consiga interpretar o funcionamento dos diferentes hélices consoante o regime aplicado. Importa referir que com o primeiro hélice testado (modelo v30/p4000) o regime 3 estava estipulado para uma potência de referência na ordem dos 1360 W, o que rapidamente se revelou pouco relevante testar por haver uma grande discrepância do regime 2 para o regime 3 nesse caso. De qualquer das formas o hélice mencionado foi também testado ao regime 3 com referência nos 850 W. Importa referir que o regime 4

corresponde ao regime máximo do motor, o qual era conseguido com a colocação da alavanca do telecomando na posição de regime máximo. Naturalmente, os valores de referência não foram cumpridos sempre escrupulosamente. Havia a tentativa de colocar a alavanca do telecomando numa posição que correspondesse o mais próximo possível aos valores de referência do regime a testar e, assim se mantinha a posição da mesma durante as três corridas de ida e volta a realizar para cada condição de carga, por hélice testado. No decorrer de cada teste, o valor indicado de potência instantânea não era constante, no entanto, variava sempre entre um valor de consumo base, era possível verificar um ponto médio de consumo, e foi esse o dado recolhido por teste.

Fundamentalmente o interesse seria o de testar os hélices a vários regimes, independentemente que estes não fossem rigorosamente correspondentes de hélice para hélice, isto porque, o que importa é introduzir os dados dos diferentes regimes e carregá-los na rede neuronal, a qual, teoricamente, conseguirá interpretá-los e indicá-los as condições de funcionamento de um hélice na gama de valores testados.

A contagem do tempo foi efetuada em duas fases durante cada teste, no trajeto de ida e volta (Figura 44).



Figura 44 - Trajeto de ida à esquerda, e regresso à direita⁴³

Existiam duas referências de início e fim de contagem do tempo, a primeira era um bloco de cimento existente na rampa do CNOCA (Figura 45) e a outra era um pontão do Arsenal do Alfeite (Figura 46).

⁴³ Adaptado de: Google Maps. (19 de Abril de 2015). Obtido de Google: <https://www.google.pt/maps>



Figura 45 - Referência na rampa do CNOCA



Figura 46 - Pontão do Arsenal do Alfeite

Por cada teste, no trajeto de ida, o início da contagem de tempo era definido pela passagem da proa pelo bloco de referência da Figura 45 e, a paragem ocorria quando a embarcação passava totalmente o pontão da Figura 46. No trajeto de regresso, o inverso acontecia, a contagem do tempo iniciava-se quando a proa passava o pontão e o término ocorria assim que a popa da embarcação passasse pelo bloco da rampa do CNOCA. Em cada teste, ou seja, para uma determinada condição de carga e regime de motor, o objetivo foi fazer este trajeto de ida e volta três vezes.

Durante o percurso de ida, a embarcação seguia aproada ao pontão do Arsenal do Alfeite, já no regresso, o objetivo era aproar à embarcação que se encontra exposta na Base Naval de Lisboa, tal como se pode verificar na Figura 47.



Figura 47 - Embarcação que servia de referência

Para além dos dados de potência e tempo, também foi registada a hora e dia em que o teste foi efetuado, por forma a ser possível determinar os dados meteorológicos para cada teste.

4.2.3. Dificuldades sentidas

No primeiro dia de testes (28 de Abril de 2015), após o dia de aprontamento da embarcação, tudo começou à hora prevista. Na fase de aprontamento do dia anterior havia sido verificado o estado das baterias, que segundo indicação do telecomando, estavam totalmente carregadas. No entanto, na tentativa de realizar os testes, verificou-se de imediato que a partir de uma determinada posição da alavanca o motor parava. O telecomando dava conta de um erro, que depois se constatou no manual, tratar-se de um erro de falta de bateria. No aprontamento do motor, era possível colocar o motor ao regime máximo, no entanto, a potência exigida pelo mesmo dentro de água, não se compara à do motor a rodar livremente. De fato, as baterias não tinham carga, e teve que se proceder ao carregamento das mesmas, o que demoraria pelo menos oito horas a fazer. No primeiro dia não foram, portanto, feitos quaisquer testes.

No dia seguinte, as baterias estavam carregadas, logo que possível a embarcação foi colocada na água. Porém, surgiu de imediato outro contratempo, uma suposta falta de autorização para efetuar os testes, obrigou a encostar a embarcação, impossibilitando mais uma vez a realização dos testes. Tudo teve origem numa falha de

comunicação, tendo ficado tudo esclarecido, e concedidas as devidas autorizações para prosseguirmos os testes, os quais só seriam retomados no próximo dia.

Com o fim da primeira semana de testes próximo, adiantado pelo feriado do dia do trabalhador (1 de Maio de 2015), houve a necessidade de prosseguir os testes durante o fim-de-semana, para compensar a semana de percalços. Foram então realizados testes no decorrer do fim-de-semana.

Aquando o planeamento dos testes, não foi previsto o quão difícil seriam de realizar. Para fazer render um dia de testes, foi necessário prosseguir com estes muito para além do horário inicialmente previsto. Uma das principais limitações foram as baterias, que permitiam apenas algumas horas de navegação. Como existiam três, o que aconteceu é que quando o par de baterias utilizado chegava a um nível de carga tal que não permitisse testar a determinados regimes, trocava-se uma das baterias, o que era o suficiente para mais uns testes. No final dos testes, colocavam-se duas baterias a carregar de um dia para o outro, a capacidade máxima do carregador, a bateria restante, ficaria a carregar no decorrer dos testes do dia seguinte, para estar pronta quando fosse necessária.

Os testes foram bastante desgastantes, principalmente porque havia necessidade de os efetuar celeremente, pois o tempo era escasso. A rotina era colocar a embarcação na água pela manhã e avançar com os testes o dia inteiro. Sempre que havia necessidade de trocar de hélice, colocar outra bateria, ou por qualquer outro motivo, era necessário retirar a embarcação da água, intervir na embarcação e voltar a colocá-la na água para prosseguir testes. Esta ação era realizada por intermédio de uma grua, e apesar de aparentar ser uma tarefa simples, na realidade revelava-se bastante complicada. Envolveria pedir auxílio do pessoal do CNOCA e/ou do meu camarada Mártires Paulino, que tinha de interromper os seus testes, por forma a haver alguém na grua para a descer e uma embarcação na água para me acolher. Tentativamente evitava subir com a embarcação na grua, por ser extremamente perigoso em certas ocasiões, nomeadamente com maré baixa, pois a altura da linha de água até à rampa é considerável nesses casos.

As condições climatéricas também foram difíceis de suportar, num dia de testes havia bastante exposição solar e, num dia em especial, fez-se sentir uma forte chuva,

que impossibilitou prosseguir os testes durante algumas horas pela impossibilidade de fazer registos.

No meio de tantos entraves, eis que surgiu outro, e desta vez bastante impeditivo. No dia seguinte à realização dos testes com chuva, a 5 de Maio de 2015, procedeu-se da forma normal, e colocou-se a embarcação na água. No entanto, o motor não respondia, não havia qualquer sinal de funcionamento do mesmo, o qual era acompanhado por um aviso de erro no telecomando. O erro indicado apontava para uma falha de comunicação entre o motor e o telecomando, o que seria estranho estar a ocorrer, visto que nos preparativos para os testes realizados fora de água nesse mesmo dia, o motor funcionou impecavelmente. De qualquer das formas, procurou-se solucionar o problema com base no erro evidenciado no telecomando. Com um *spray* indicado para contatos elétricos, limpam-se todos os contatos do telecomando e motor, mesmo assim, o erro persistia, e o motor não dava qualquer sinal. Retirou-se a embarcação da água, e foi então que ficou claro que tinha havido uma infiltração de água salgada no motor. A entrada de água teria ocorrido no topo do motor, o que de alguma forma terá levado à avaria do motor. Na Figura 48 é bem perceptível o local onde se deu a entrada de água, e a que zonas chegou. É evidente que a água terá, de alguma forma, entrado e inundado toda a zona que fica debaixo da placa elétrica.

Uma posterior análise, efetuada pelo pessoal do ciclo de estudos (CE) de Engenheiros Navais Ramo de Armas Eletrónica, permitiu concluir que a infiltração de água salgada desceu por toda a coluna do motor, até chegar à placa de comando do motor elétrico, por intermédio do local evidenciado na Figura 48, o que consequentemente queimou alguns dos componentes da placa (Figura 49).

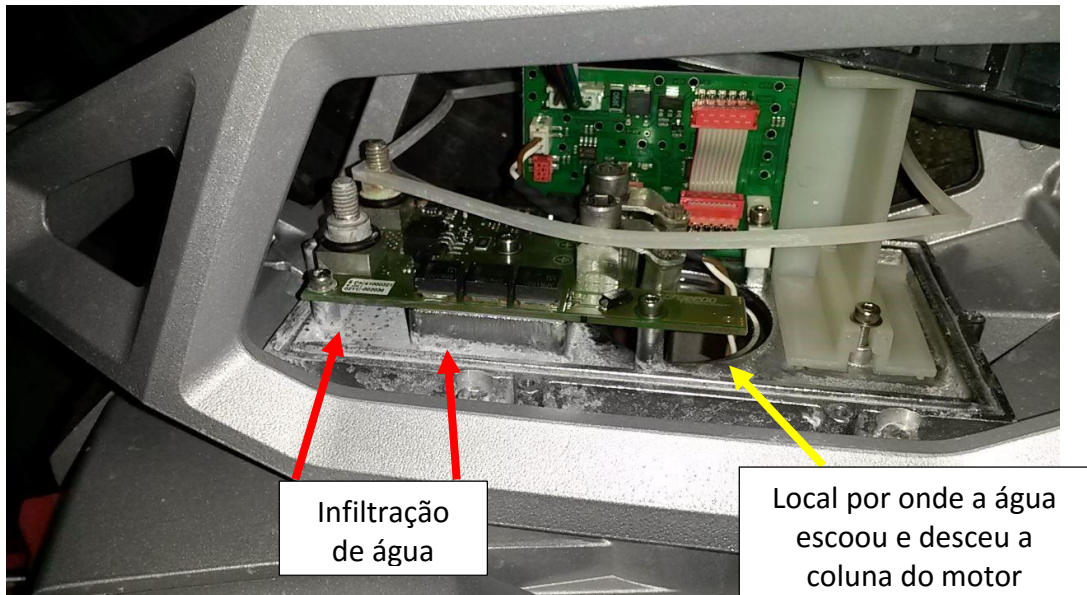


Figura 48 - Local onde ocorreu infiltração de água salgada



Figura 49 - Componentes danificados na placa de comando do motor elétrico

O motivo pelo qual ocorreu esta infiltração deverá estar associado a um conjunto de fatores. As condições em que foram realizados os testes foram bastante exigentes, e o motor funcionou durante muitas horas, dias seguidos. A embarcação possui uma estrutura que serve de apoio aos motores, que por ter sido mal estudada, provoca um “arrastamento” da embarcação, ao ser um entrave à normal progressão da mesma. Aos regimes de testes mais altos, provoca um “repuxo” de água que afunda bastante a popa da embarcação e expõe bastante o motor à água salgada (Figura 50).

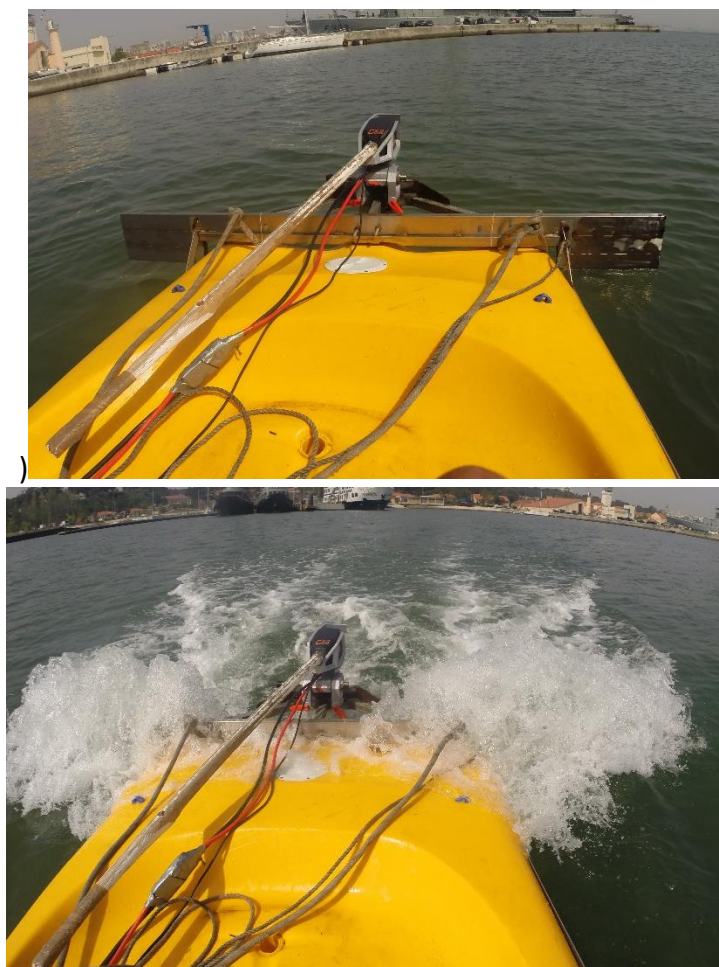


Figura 50 - Conseqüências do posicionamento e forma da estrutura de apoio aos motores, quando realizados os testes.

Os dados obtidos até à data eram bastante limitativos, apenas possuía os testes com um dos hélices concluídos, com outro quase concluídos e tinha apenas iniciado os testes com o terceiro hélice. No entanto, tinha outro motor à disposição, o qual me permitiu prosseguir os testes após dada a devida autorização para tal. Foram tomadas medidas de precaução extra, como um melhor isolamento do motor, proteção contra infiltrações de água salgada e menos corridas de ida e volta por teste. Ficou estabelecido que aos regimes 1,2 e 3 seriam feitas duas corridas de ida e volta por teste, e ao regime 4 seria feita apenas uma corrida de ida e volta, para diminuir a probabilidade de voltar a ocorrer nova infiltração e conseqüentemente danificar outro motor. No dia 5 de Maio de 2015, ainda foram realizados testes, se bem que por receio que não houvesse tempo suficiente, e por já ter tido bastantes obstáculos, após testado o regime 1 com uma carga de 30 kg, preferi completar os testes a essa carga, no entanto, apenas fazendo uma corrida de ida e volta por regime.

O receio de voltar a ter algum problema justificou-se no dia seguinte. Apesar do motor ter funcionado fora de água, nos preparativos para iniciar testes, quando se tentou ligar o mesmo e iniciar os testes, o visor do telecomando começou a evidenciar um mau funcionamento. Novamente foram limpos os contatos do telecomando, mas nada resultou. Dirigi-me ao CE de Armas e Eletrónica, na tentativa de obter uma opinião de quem está intimamente ligado à área. Lá foi feita uma limpeza mais pormenorizada, que mesmo assim não solucionou o problema. Durante o resto da segunda semana, não foi possível executar mais nenhum teste. Ambos os telecomandos, tanto de um motor como do outro, não funcionavam. Entretanto, tentou-se achar uma alternativa para obter mais dados, recorrendo a métodos estatísticos, ideia que pouco me agradava, mas que parecia ser a única solução possível. Continuei a insistir, de qualquer das formas, na resolução do problema do telecomando, e na sexta-feira da segunda semana de testes, juntamente com pessoal do CE de Armas e Eletrónica, conseguimos solucionar o problema. De imediato foram tomadas todas as ações para retomar os testes na semana seguinte, e assim se concretizou.

Os testes foram concluídos com as limitações referidas, no dia 12 de Maio de 2015.

4.2.4. Discussão de resultados

Os resultados obtidos nos testes realizados estão presentes nos Apêndice B, Apêndice C, Apêndice D, respetivamente relativos aos resultados do hélice v8/p350, v19/p4000 e v30/p4000. No Apêndice E apresenta-se em suma os resultados obtidos, com as médias resultantes de tempo e potência por teste. Também no Apêndice F, Apêndice G e Apêndice H, apresentam-se as condições meteorológicas dos testes realizados com os hélices v8/p350, v19/p4000 e v30/p4000, respetivamente. As alturas e estado da maré foram determinados recorrendo às tabelas de maré, infelizmente, em virtude da opção tardia da recolha dos dados de vento⁴⁴, não houve uma resposta atempada das entidades que poderiam fornecer esse serviço, para obtermos informações credíveis desta natureza.

⁴⁴ Dados de: Instituto Hidrográfico. (Maio de 2015). Porto de Lisboa. Obtido de http://www.portodelisboa.pt/portal/page/portal/PORTAL_PORTO_LISBOA/HIDROGRAFIA/TABELA_MARES

A primeira evidência ao analisar os resultados, é que em cada teste a um determinado regime de motor e condição de carga, existe uma certa discrepância nos tempos obtidos. Esta discrepância poderá estar associada a diversos fatores, dos quais se destacam a imprecisão na contagem do tempo e a mudança repentina das condições meteorológicas.

Normalmente, durante a realização de um teste, o tempo do trajeto de ida mantinha uma tendência para ser menor que o tempo despendido no trajeto de regresso ou vice-versa, dependendo do dia.

De fato, é difícil encontrar uma tendência nos dados, o que torna a comparação entre hélices pela análise dos dados, uma tarefa complicada. Isto deve-se fundamentalmente ao fato dos tempos obtidos, não corresponderem ao mesmo regime, em termos da potência instantânea entregue ao motor. No entanto, é possível verificar que em termos gerais, o hélice v30/p4000 foi o que obteve os piores resultados em termos de tempo, quando em comparação com os outros hélices aos mesmos regimes e condições de carga. Em termos de comparação direta entre o hélice v8/p350 e v19/p4000, ambos apresentam ligeiras diferenças de desempenho, sendo que, o v19/p4000 demonstra melhores resultados na generalidade dos casos.

Nos testes com o mesmo hélice às diferentes condições de carga, nota-se uma ligeira tendência para um decréscimo do tempo de teste com a adição da mesma. Não é totalmente abrangente para todos os testes, mas existe de fato essa propensão. É mais evidente aos regimes mais baixos, nomeadamente aos regimes 1 e 2. Apesar de parecer contra natura, é uma conclusão que tem algum fundamento, devido às características da embarcação. Como a adição de cargas foi feita o mais a vante possível, para evitar o “afundamento” da popa, isto tornou a embarcação mais equilibrada. Aos regimes mais baixos, o efeito de arrasto causado pela estrutura de fixação dos motores torna-se menos evidente quanto mais equilibrada ficar a embarcação, resultante da adição de cargas. No entanto, quando são exigidos regimes de motor mais altos, o efeito de arrasto torna-se novamente mais evidente, é instantaneamente intensificado pois o motor situa-se a ré e a estes regimes a popa tem tendência a afundar e a proa, por sua vez, a elevar-se. O peso extra na embarcação irá de certa forma tornar-se mais manifesto nestes regimes, a questão do equilíbrio da embarcação com adição de carga

deixa de ser tão evidente, daí os tempos não apresentarem de forma tão vincada a tendência verificada aos regimes 1 e 2.

Importa referir que com o hélice v30/p4000 os testes efetuados ao regime 4, regime de potência máxima, por motivos desconhecidos nunca atingiram os mesmos níveis de potência que os obtidos nos testes com os outros hélices.

Capítulo 5. Redes neuronais

As redes neuronais são uma ferramenta que tem vindo a ganhar reconhecimento em diversas áreas, pelas possibilidades que oferecem. O poder computacional de uma rede neuronal é de tal ordem, que esta possui capacidade de aprendizagem.

Donald Olding Hebb, um psicólogo ligado a pesquisa na área da neuropsicologia, é apontado como o principal impulsionador na conceção das redes neuronais, devido ao seu trabalho de investigação realizado entre os anos 1940 e 1950. (Müller & Cardon, 1994)

A inspiração para a criação das redes neuronais, tal como o nome indica, veio dos sistemas nervosos dos seres vivos, nomeadamente do cérebro humano. Os sinais entre os neurónios biológicos são transmitidos através de sinapses, os quais são preponderantes, porque é com base nesta interligação que as decisões são tomadas, adequando-se à informação recebida. No caso das redes neuronais artificiais, o conceito base é o mesmo, existe uma estrutura composta por um conjunto de neurónios, elementos de processamento, interligados entre si em paralelo, e que processam a informação que lhes é entregue. Essas interligações têm pesos associados, os quais são adaptados consoante o problema que se queira resolver. A aprendizagem da rede é realizada fornecendo-lhe dados que apresentem valores de entrada e, os respetivos valores de saída. (Cortez & Neves , 2000)

As redes neuronais revelam-se uma ótima técnica de resolução de problemas, pois uma das suas principais características é a capacidade de se adaptar e aprender a partir das informações que lhe são entregues. Esta capacidade de aprendizagem ganha especial interesse pelo fato da rede neuronal artificial conseguir achar relações não lineares entre as variáveis. Fazendo uso desta capacidade, as redes neuronais artificiais poderão ser utilizadas, não restritamente, em problemas de diagnóstico, reconhecimento de padrões, regressão/previsão, otimização e filtragem. Após concluído o processo de aprendizagem, existe depois a possibilidade de utilizarmos a rede em nosso proveito, porque esta tem a capacidade de generalização para responder a conjuntos de variáveis novos, não apresentados na sua fase de treino. (Cortez & Neves , 2000)

5.1. Neurónios Artificiais

Como já foi mencionado, as redes neuronais podem possuir diversos elementos de processamento, os quais são comumente denominados por neurónios artificiais. Os neurónios artificiais (Figura 51) têm associado um conjunto de conexões, que são discriminadas por pesos (w_{ij}). É o peso dessas ligações multiplicado pelo respetivo sinal de entrada (x_j) que irá estimular o neurónio, podendo ainda existir uma ligação extra, denominada de *bias* (w_{i0}), que é uma constante cujo objetivo da sua inclusão será criar uma determinada tendência no processamento do neurónio. Pesos positivos são indicadores de sinais excitatórios, em contraste, os negativos são inibitórios, no caso de serem nulos então a conexão é como se não existisse. Os pesos são definidos na fase de treino da rede neuronal, onde recorrendo a um conjunto de dados de entrada e saída disponibilizados, esta ajusta os pesos até os dados de saída obtidos serem próximos aos apresentados no conjunto disponibilizado. (Cortez & Neves , 2000)

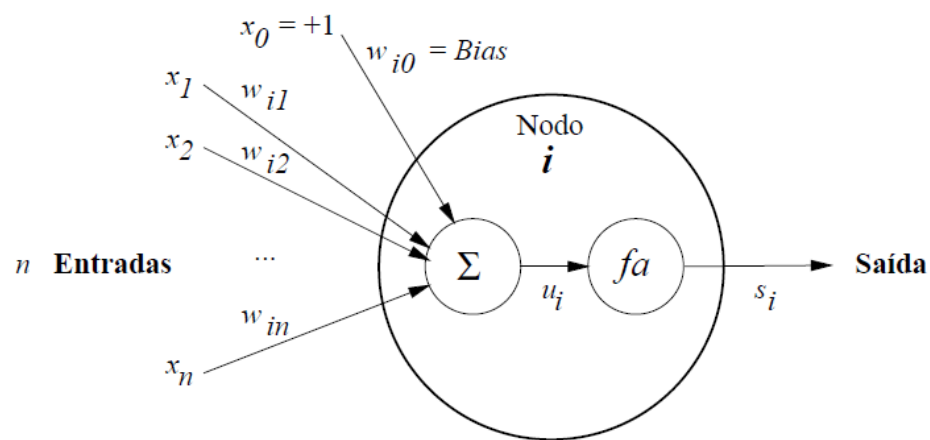


Figura 51 - Estrutura de um neurónio artificial⁴⁵

Os estímulos são somados (Σ), reduzindo-se os argumentos de entrada a um valor (u_i). Este valor é depois cedido à função transferência (f_a) que permite a introdução de uma relação de não linearidade no processamento do sinal. (Cortez & Neves , 2000)

Os três tipos de função transferência mais típicas são (Figura 52):

⁴⁵ CORTEZ, P., & Neves , J. (2000). *Redes Neuronais Artificiais*. Universidade do Minho, Departamento de Informática, Braga.

- Sigmoidal (*logsig*)
- Tangente hiperbólica (*tansig*);
- Linear (*purelin*).

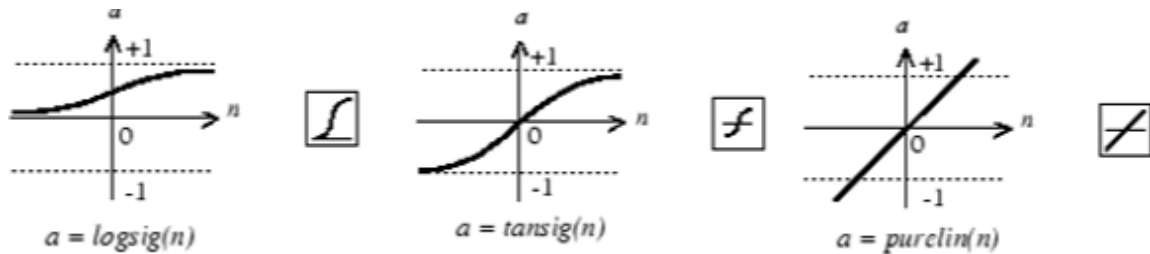


Figura 52 - Funções transferência⁴⁶

No Quadro 3 estão evidenciadas as características de cada uma das funções transferência mencionadas, onde k representa a inclinação da função.

Nome	Função	Contradomínio
Sigmoidal	$\frac{1}{1 + e^{(-ku_i)}}$	[0,1]
Tangente hiperbólica	$\tanh ku_i$	[-1,1]
Linear	u_i	$[-\infty, +\infty]$

Quadro 3 - Características das funções transferência⁴⁷

A função linear é sobretudo utilizada em problemas de regressão, por outro lado, a função tangente hiperbólica já introduz um processamento não linear, e poderá ser utilizada, por exemplo, em problemas de reconhecimento de padrões. A função mais utilizada nas redes neuronais é a função sigmoial, por poder apresentar um meio-termo entre um comportamento linear e não linear, consoante a inclinação que apresente (Figura 53). Estas não são as únicas funções transferência existentes, existindo também, a possibilidade do utilizador criar uma função transferência se for necessário. (Cortez & Neves , 2000)

⁴⁶ MathWorks. (s.d.). MathWorks. Obtido em Abril de 2015, de <http://www.mathworks.com/help/nnet/ug/multilayer-neural-network-architecture.html>

⁴⁷ CORTEZ, P., & Neves , J. (2000). *Redes Neuronais Artificiais*. Universidade do Minho, Departamento de Informática, Braga.

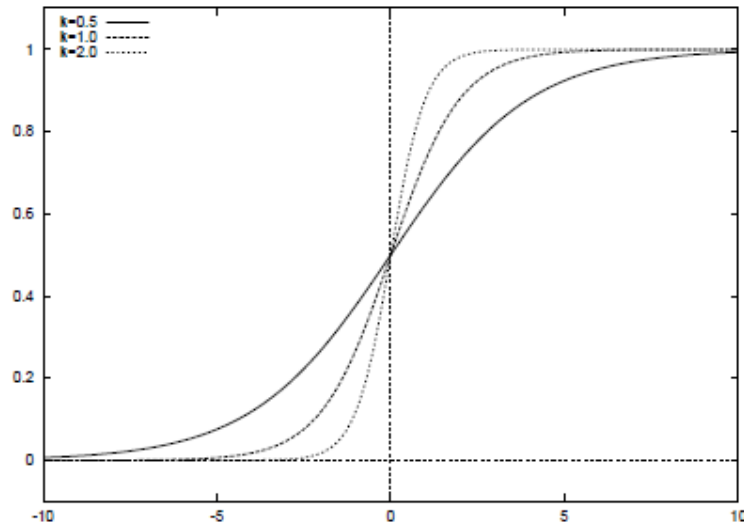


Figura 53 - Função sigmoideal para $k=0,5$, $k=1,0$ e $k=2,0$ ⁴⁸

5.2. Arquiteturas de rede

A arquitetura de rede define a forma como as ligações dentro da estrutura da rede ocorrem, ou seja, a forma como os neurónios se interligam. À semelhança das funções transferência dos neurónios, existem diversos tipos de arquiteturas de rede, sendo as mais usuais as redes *Feedforward* e Recorrentes. Dentro das redes *Feedforward* existem as de uma única camada e de multicamadas. As redes *Feedforward* são caracterizadas por poderem apresentar mais que uma camada, pois as ligações ocorrem unidireccionalmente, não existindo ciclos. Na configuração de uma única camada a rede dispõe de uma camada de entrada, que na realidade não é encarada como camada por não haver processamento de dados na mesma, e uma camada de saída (Figura 54). (Cortez & Neves , 2000)

⁴⁸ CORTEZ, P., & Neves , J. (2000). *Redes Neurais Artificiais*. Universidade do Minho, Departamento de Informática, Braga.

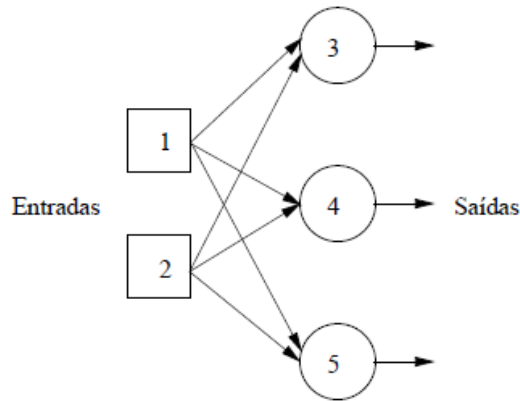


Figura 54 - Redes *FeedForward* de uma camada⁴⁹

As redes *Feedforward* multicamada distinguem-se por possuírem camadas intermédias de neurónios, cujo propósito é o de aumentar a capacidade da rede para resolver problemas mais complexos, no entanto, neste aspeto terá que ser feita uma escolha com um balanceamento criterioso no número de camadas a utilizar, pois a adição de camadas torna a aprendizagem da rede mais morosa, e nem sempre mais proveitosa (Figura 55). (Cortez & Neves , 2000)

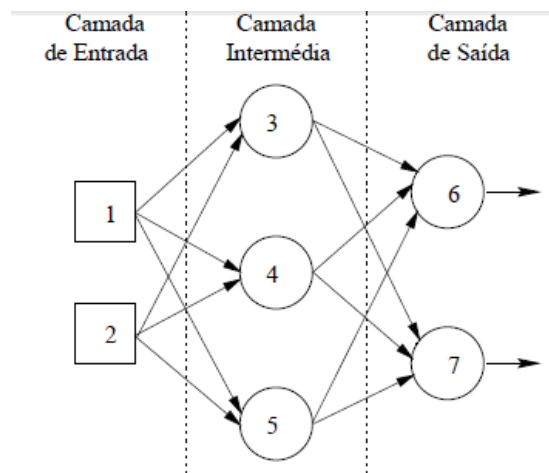


Figura 55 - Redes *Feedforward* multicamada⁴⁹

As redes recorrentes são, tal como o próprio nome indica, redes onde existe processamento cíclico, havendo sinais de saída de determinado elemento que influenciam o sinal de entrada nele mesmo, podendo existir diversos ciclos nas ligações

⁴⁹ CORTEZ, P., & Neves , J. (2000). *Redes Neurais Artificiais*. Universidade do Minho, Departamento de Informática, Braga.

da rede (Figura 56). São redes que apresentam um comportamento dinâmico, onde as saídas são função das ligações entre neurónios. (Cortez & Neves , 2000)

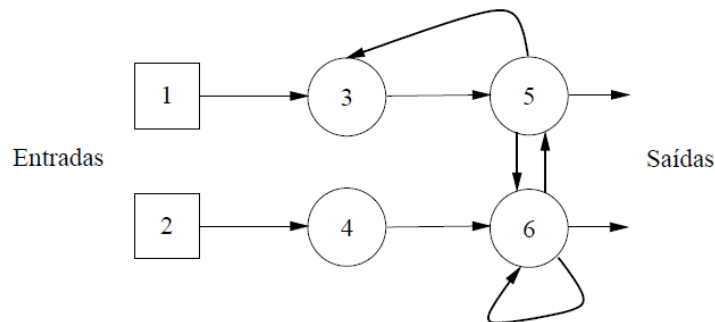


Figura 56 - Rede Recorrente⁵⁰

5.3. Algoritmos de treino

Como já foi mencionado, as redes neuronais têm capacidade para aprender a partir do ambiente que as rodeia. Os estímulos que recebem são transformados em sinais que irão promover o ajustamento dos pesos das ligações dentro da rede e, assim, tornar a rede neuronal numa ferramenta adaptativa com capacidade de responder de uma nova forma consoante a sua configuração interna. (Cortez & Neves , 2000)

O algoritmo de treino define a forma como a rede efetua o processo de aprendizagem e compreende um conjunto de regras, que poderão ser utilizadas em nosso proveito mediante o que é pretendido da rede neuronal. A aprendizagem da rede poderá ser efetuada das seguintes formas:

- Supervisionada;
- De reforço;
- Não supervisionada.

Na aprendizagem supervisionada são utilizados um conjunto de pares de dados de entrada e saída-alvo, sendo que os pesos das ligações são ajustados até o erro entre as saídas-alvo e as saídas que a rede apresenta seja mínimo. No caso da aprendizagem de reforço as saídas-alvo não são apresentadas à rede, no entanto, a rede dá um *feedback* mediante a resposta da mesma, sendo premiado os pesos que permitem uma resposta

⁵⁰ CORTEZ, P., & Neves , J. (2000). *Redes Neuronais Artificiais*. Universidade do Minho, Departamento de Informática, Braga.

mais acertada. No caso da aprendizagem não supervisionada, não existe qualquer indicação externa da resposta da rede, ficando esta limitada a investigar os dados de entrada na procura de regularidades estatísticas e padrões nos mesmos. (Cortez & Neves , 2000)

Existem diversas regras, ou modelos de aprendizagem, os quais se enquadram segundo as diferentes formas de aprendizagem mencionadas. No âmbito do método de aprendizagem supervisionada temos principalmente o modelo *Back-propagation*, no que diz respeito à aprendizagem não supervisionada temos as redes competitivas e *Kohonen* e, na aprendizagem por reforço os modelos de *Hebb* e *Hopfield*. (Cortez & Neves , 2000)

5.4. Redes Feedforward Back-Propagation

Dos algoritmos mencionados anteriormente, o mais utilizado dentro do método de aprendizagem supervisionada e no geral, é o algoritmo de *Back-Propagation* e seus derivados. Normalmente este algoritmo é utilizado em associação à arquitetura de rede *Feedforward*. Esta associação tem aplicabilidade em inúmeros problemas, não sendo restrita à aplicação apenas a alguns, como acontece na maioria dos casos, é portanto, uma solução que apresenta uma grande flexibilidade.

O algoritmo de *Back-Propagation* é caracterizado como um método que promove a alteração dos pesos das ligações da rede na fase de treino da mesma, até que os dados de saída da rede sejam idênticos aos dados de saída desejados. Para tal torna-se necessário apresentar à rede um conjunto de dados, que envolve pares de entrada e saída, sendo este conjunto que define os dados de saída desejáveis. Numa primeira etapa, é portanto, apresentada à rede um determinado dado de entrada, os pesos das ligações são atribuídos de forma aleatória, e a resposta obtida da rede com essa determinada configuração é comparada ao dado de saída desejável. Esta comparação é feita por intermédio do cálculo de erro, que caso não seja o pretendido é propagado pela rede promovendo o reajuste dos pesos das ligações. Este processo ocorre iterativamente, e para todos os casos disponíveis, e termina de acordo com determinados critérios de paragem, como por exemplo, quando as alterações de pesos resultarem em variações de erro insignificantes (Figura 57).

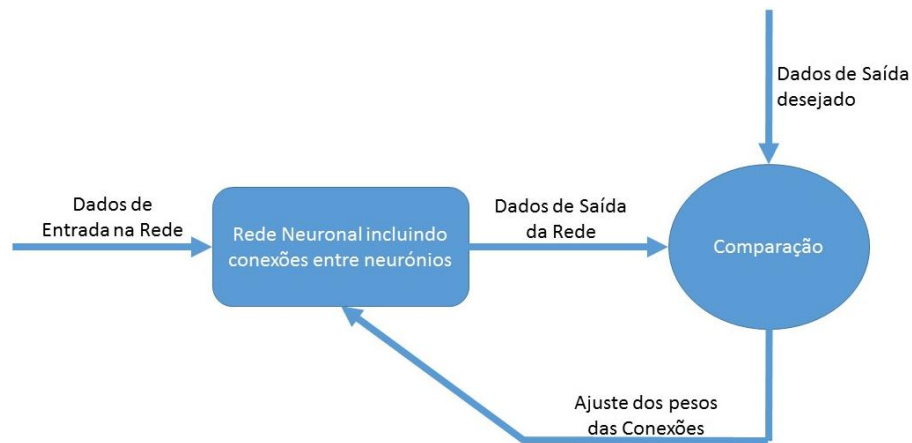


Figura 57 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo *Back-Propagation* na fase de treino de uma rede neuronal

Existe o risco do erro obtido convergir para um mínimo local, podendo este risco ser atenuado com um conjunto de dados de maiores proporções (Figura 58). (Cortez & Neves , 2000)

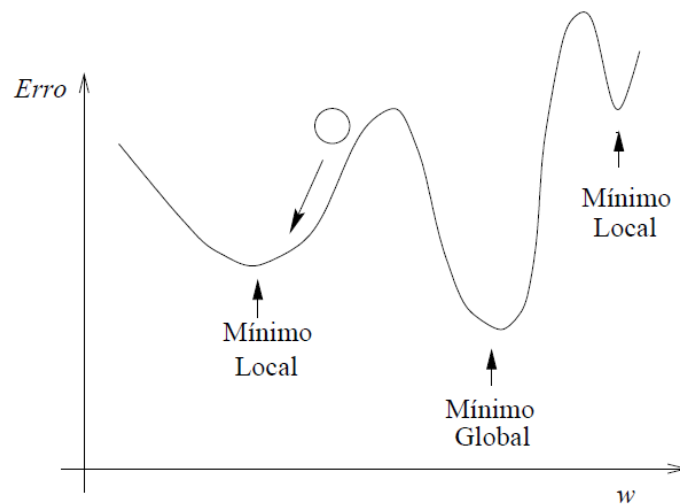


Figura 58 - Gráfico da evolução do erro durante o treino⁵¹

5.5. Processamento dos dados

Embora possuam uma excelente capacidade de aprendizagem, as redes neuronais não conseguem extrapolar resultados fora da gama dos dados disponibilizados durante o treino. Torna-se necessário disponibilizar o maior número de

⁵¹ CORTEZ, P., & Neves , J. (2000). *Redes Neuronais Artificiais*. Universidade do Minho, Departamento de Informática, Braga.

dados possíveis, numa gama ampla, para que a rede possua uma boa capacidade de resposta.

A eficiência da resposta de uma rede neuronal poderá ser melhorada caso haja um pré-processamento do conjunto de dados a ceder à rede. Basta considerar que a alteração do peso de determinado dado de entrada é muito mais influente caso a sua ordem de grandeza seja superior, comparativamente aos restantes dados. Apesar de teoricamente não ser necessário, a normalização revela uma melhor eficiência na resposta das redes. (McCaffrey, 2014)

5.6. Divisão dos dados

Na fase de treino da rede neuronal é necessário dividir os dados disponíveis em três conjuntos distintos, de forma aleatória:

- Conjunto de dados para treino;
- Conjunto de dados para validação;
- Conjunto de dados para teste.

O conjunto de treino, e tal como o nome indica, são os dados que serão utilizados durante o treino da rede para ajuste dos pesos de cada neurónio e ligações dos mesmos, por comparação da resposta da rede a um determinado dado de entrada, com a saída desejada. O erro de treino é obtido através destes dados, pelo que, o fato do seu valor ser baixo, não permite concluir de imediato que estamos perante uma boa configuração da rede neuronal, pois o que poderá de fato estar a acontecer é o chamado *overfitting* da rede aos dados de treino, fenómeno que será exposto de forma mais clara posteriormente, mas que poderá estar a limitar a rede tornando-a pouco generalista e muito ajustada aos dados de treino. O conjunto de validação engloba uma panóplia de dados desconhecidos à rede, que durante o treino da mesma, são utilizados para supervisionar o treino e evitar o fenómeno de *overfitting*. O conjunto de teste irá apresentar uma amostra de dados desconhecidos à rede, a fim de verificar o seu desempenho. (Simas, s.d)

Quando possuímos um grande número de dados disponíveis, deve-se dividir os dados equitativamente pelos três conjuntos mencionados, no entanto, quando temos

um número de dados reduzido é aconselhável diminuir a proporção dos conjuntos de validação e teste. (Simas, s.d)

5.7. Overfitting

O *overfitting* é um fenómeno passível de ocorrer numa rede neuronal. O pretendido de uma rede neuronal é que esta consiga aprender com o conjunto de dados que lhe são fornecidos para o treino, e que esta ganhe a capacidade para a partir dessa aprendizagem generalizar, ou seja, para responder eficazmente quando lhe é solicitada a resposta a um novo dado, ou um conjunto de novos dados. O erro de treino, que advém do conjunto de treino, nem sempre é o melhor indicador do desempenho da rede, esses dados pertencentes ao conjunto de treino podem ser mimificados pela rede, e poderemos estar perante uma rede demasiado ajustada aos dados do conjunto de treino, com fraca capacidade de generalização.

Este fenómeno é facilmente demonstrável, considere-se o exemplo apresentado na Figura 59. Foram gerados dados, os quais estão representados por pontos nos gráficos, recorrendo à função $Y = \text{Sen}(x/3) + \mu$, onde x é um número inteiro compreendido entre 0 a 20 e μ um número aleatório entre -0,25 e 0,25. Foram testadas funções polinomiais de ordens de 0 a 20, para verificar a sua adequabilidade de resposta perante estes dados. A função polinomial de 2ª ordem oferece uma resposta pouco satisfatória, muito desajustada aos dados, já a de 10ª ordem apresenta uma aproximação bastante razoável os dados. Nas funções polinomiais de 16ª e 20ª ordem o fenómeno de *overfitting* começa a ser perceptível, apesar de se ajustarem perfeitamente aos dados cedidos, pois ajustam-se aos pontos apresentados, estas funções são pouco generalistas, não havendo uma correta interpolação entre os dados de treino. (Lawrence & Giles, 2000)

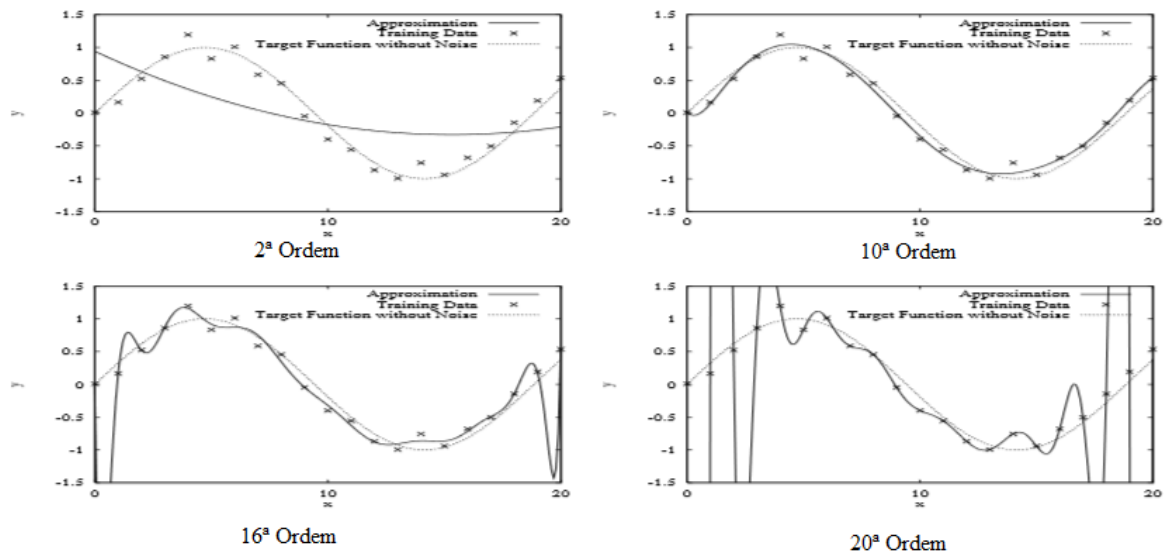


Figura 59 - Respostas de funções polinomiais de diferentes ordens⁵²

Para evitar que este fenómeno ocorra terá que haver uma escolha criteriosa de aspetos como a seleção dos modelos a utilizar, a paragem do treino atempadamente, evitar que haja pesos de valores elevados, entre outros. (Cortez & Neves , 2000)

⁵² LAWRENCE, S., & GILES, C. L. (2000). Overfitting and neural networks: Conjugate Gradient and Backpropagation. *International Joint Conference on neural networks*. Italia: IEEE Computer Society.

Capítulo 6. Sequência de testes com Redes Neurais

6.1. Preparação dos dados

A primeira etapa após recolher e organizar os dados experimentais observados foi a preparação dos mesmos, a fim de serem utilizados nas redes neurais. A preparação dos dados engloba a normalização destes.

Os testes realizados, como já foi mencionado, envolviam a contagem de tempo no trajeto de ida e volta, para um determinado regime de motor e condição de carga. Inicialmente, optou-se por considerar todos esses dados, dos tempos tanto de ida como de regresso, procedendo-se então à sua normalização. No entanto, devido às discrepâncias dos tempos obtidos optou-se pelo cálculo da média dos tempos obtidos por teste, a um determinado regime do motor e condição de carga. Esta abordagem diminui muito significativamente o número de dados disponíveis, no entanto, elimina a possibilidade de haver valores do tempo de trajeto relativamente díspares em cada teste (Figura 60).

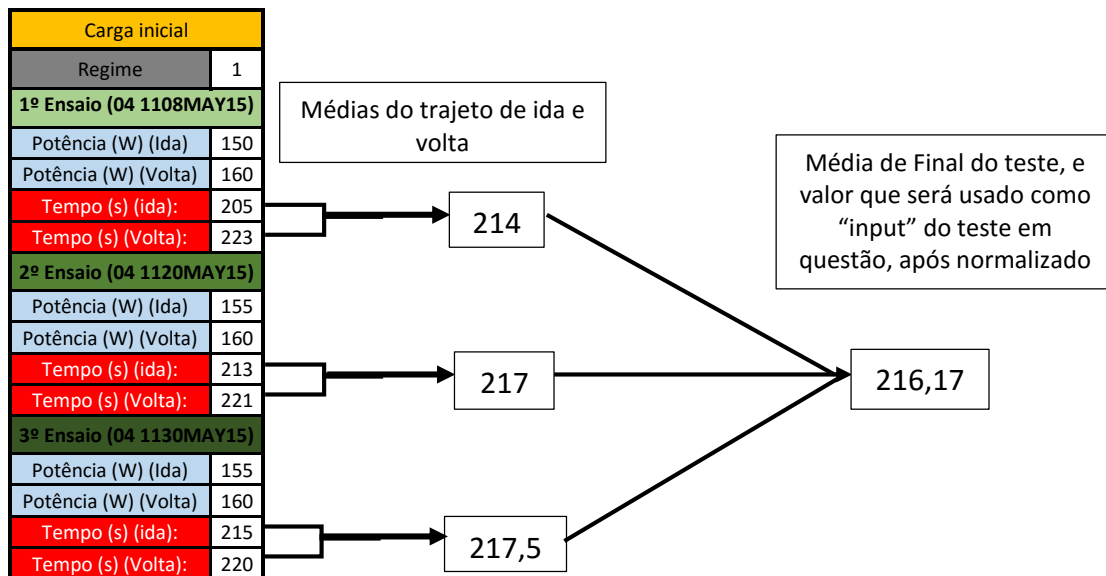


Figura 60 - Exemplo de metodologia aplicada na organização dos dados

O objetivo da normalização seria enquadrar os dados num valor compreendido no intervalo $[-1;1]$. Desta forma a rede irá interpretar de melhor forma os mesmos, e não atribui maior relevância a determinados dados relativamente a outros, por uma questão da diferença das ordens de grandezas associadas aos mesmos. Os dados normalizados, encontram-se no Quadro do Apêndice I.

6.2. Programação em MATLAB

6.2.1. Programa de treino da rede neuronal

Existem duas formas de desenvolver a rede neuronal, recorrendo à interface *NNtool* (*Neural Network Toolbox*), ou em alternativa, através de linhas de código. Tanto a interface *NNtool* como as linhas de código, permitem-nos configurar a rede no que diz respeito ao número de neurónios em cada camada, função transferência de cada camada e algoritmo de treino. No entanto, para testarmos os parâmetros referidos em ambiente *NNtool*, teríamos que inserir manualmente o conjunto de parâmetros que desejaríamos testar, e gravar os resultados individualmente, por conjunto. Esta tarefa revelar-se-ia extremamente extenuante, pelo que optou-se pela abordagem das linhas de código. O intuito seria criar um programa que de forma autónoma testasse todas as combinações possíveis dos parâmetros (nº de neurónios em cada camada, função transferência de cada camada e algoritmo de treino) e que guardasse numa matriz os resultados dos erros obtidos nas mesmas. O objetivo será fazer uma análise *à posteriori*, que permita identificar quais as configurações da rede que possibilitam o menor erro possível.

A arquitetura de rede empregue foi a *Feedforward Back-propagation*. O termo *Feedforward* refere-se à forma como as ligações dentro da estrutura da rede ocorrem, esta arquitetura distingue-se por estar organizada por camadas, as ligações são feitas de forma unidirecional e acontece entre as camadas sequencialmente, não existindo ciclos, desde as camadas de entrada, passando pelas camadas intermédias até à camada de saída. O *Backpropagation*, como já foi mencionado, é a forma de aprendizagem utilizada pela rede, neste caso, existe a correção e retro propagação do erro, o que consequentemente resulta no ajuste, ou reajuste, nos pesos de cada neurónio.

Foi então desenvolvido o programa do Apêndice J, composto por várias linhas de código, cujo objetivo seria devolver e guardar o erro de teste, validação e treino para todas as possibilidades de conjugação de parâmetros possíveis. Para obtermos os diferentes erros, é necessário dividir os dados disponíveis em três conjuntos distintos, de forma aleatória, tarefa que o programa desenvolvido executa com as linhas de código para o efeito. A divisão utilizada é na proporção de 70% dos dados para o conjunto de

treino, 15% para o conjunto de validação e 15% para o conjunto de teste, sobretudo devido ao número reduzido de dados existentes.

Relativamente à configuração da rede, inicialmente os parâmetros testados a fim de obter o conjunto ideal dos mesmos, foram:

- Número de neurónios da camada intermédia (entre 1 a 150);
- Função transferência da camada intermédia (*tansig*, *logsig* ou *purelin*);
- Função transferência da camada de saída (*logsig* ou *purelin*);
- Algoritmo de treino do *Back-Propagation* da rede (*trainlm*, *trainrp* ou *trainbfg*).

Nesta fase houve uma estreita colaboração com o camarada Mártires Paulino, com o intuito de diminuir o tempo consumido no treino da rede, foi acordado que cada um iria testar um conjunto de funções transferência e algoritmos de treino com algumas diferenças, embora determinados algoritmos de treino e funções transferência fossem de fato iguais. O objetivo seria verificar se uma combinação diferente entre estes aspetos poderia revelar-se mais proveitosa, embora estivéssemos cientes de quais seriam, à partida, as funções transferência e algoritmos de treino mais tipicamente usados, e que provavelmente dariam melhores resultados. As funções transferência da camada intermédia foram escolhidas por serem as mais usadas tipicamente, a da camada de saída foram seleccionadas apenas duas para não aumentar o tempo de treino e tendo em conta que a função *logsig* teria que ser uma das seleccionadas, por apresentar as características mencionadas no Capítulo das Redes Neurais e, os algoritmos de treino do *Back-Propagation* foram seleccionados com base nos estudos realizados, que apontam estes algoritmos como sendo os que possuem capacidade de resolução de problemas mais célere, e bastante flexíveis ao nível da sua aplicação a diferentes tipos de problemas. (MathWorks)

No Quadro 4 apresenta-se a nomenclatura em MATLAB no que diz respeito às funções transferência, já na Quadro 5 a nomenclatura em MATLAB para os algoritmos de treino.

Função em MATLAB	Descrição
<i>tansig</i>	Tangente hiperbólica
<i>logsig</i>	Sigmoide
<i>purelin</i>	Linear

Quadro 4 - Nomenclatura das funções transferência da camada intermédia em *MATLAB*

Função em MATLAB	Descrição
<i>trainlm</i>	<i>Backpropagation</i> Levenberg-Marquardt
<i>trainrp</i>	Resilient <i>Backpropagation</i>
<i>trainbfg</i>	<i>Backpropagation</i> Quasi-Newton

Quadro 5 - Nomenclatura dos algoritmos de treino do *Backpropagation* da rede em *MATLAB*

Para testar todos as combinações possíveis destes parâmetros, implementou-se no programa, um código constituído essencialmente por uma série encadeada de ciclos, um ciclo por parâmetro (Figura 61).

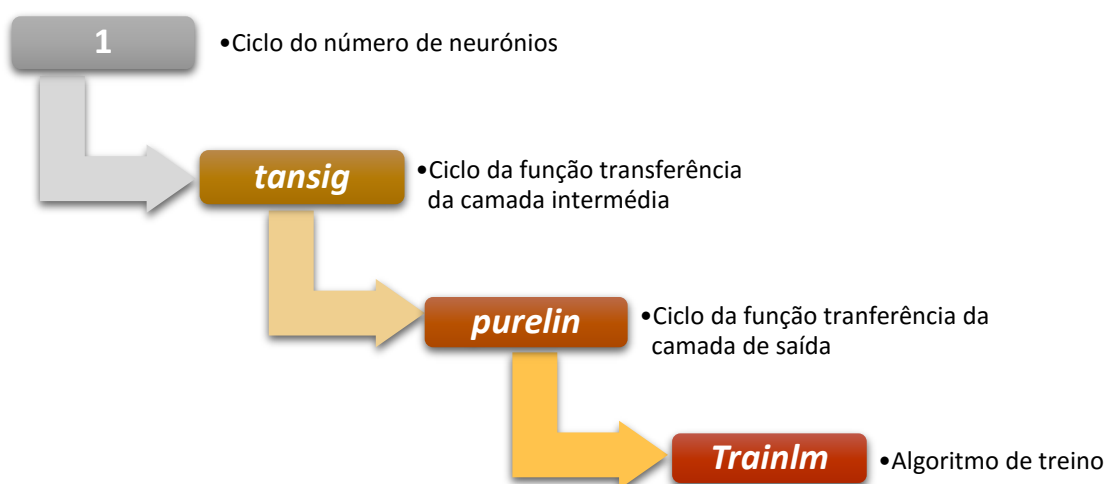


Figura 61 - Esquema de funcionamento da série de ciclos encadeada para configuração da rede

No esquema apresentado na Figura 61, representa-se a forma como a sequência de ciclos funciona. O primeiro ciclo irá atribuir o valor do número de neurónios da camada, neste caso apenas um neurónio, o segundo a função transferência da camada intermédia, neste caso a tangente hiperbólica (*tansig*), o terceiro a função transferência da camada de saída, que neste caso é a função linear (*purelin*) e, finalmente, o quarto dará o algoritmo de treino, que neste caso é o *Backpropagation Levenberg-Marquardt* (*Trainlm*). Após treinada a rede com esta configuração, o algoritmo de treino será mudado, mantendo-se os outros parâmetros iguais, e o programa volta a treinar esta nova configuração de rede, após testados todos os algoritmos de treino para os mesmos parâmetros, o ciclo da função transferência da camada de saída entra em ação, transitando para a próxima função transferência, alteração que fará o ciclo do algoritmo de treino percorrer todos os algoritmos novamente. Após percorridos todas as funções transferência da camada de saída para os diferentes algoritmos de treino, é a vez do ciclo de transferência da camada intermédia entrar em ação, passando para a próxima função, a qual desencadeará a mesma resposta dos ciclos abaixo que a referida anteriormente, estes percorrerão todos as possibilidades existentes dentro do seu domínio. Esta cadeia de ciclos repete-se para o intervalo de neurónios que se pretende testar (Apêndice J).

6.2.2. Programa para achar configurações de rede com menor erro

O programa anterior treina as configurações de rede para os diversos conjuntos de parâmetros possíveis, memorizando os valores de erro de cada um numa matriz. Por forma achar as configurações que oferecem os menores erros, criou-se um programa que fundamentalmente procura que número de neurónios oferece o menor erro para todas as combinações possíveis dos outros parâmetros, mais uma vez, recorrendo a uma série encadeada de ciclos (Apêndice K).

6.3. Discussão de resultados

6.3.1. Experiências iniciais

O raciocínio inicial, relativamente à sequência dos testes em *MATLAB* seria treinar todas as configurações possíveis de redes e guardar o seu erro, nomeadamente erro de teste, e posteriormente avaliar qual seria a configuração que apresentaria o

menor erro de teste. Essa configuração seria depois a utilizada para obter os resultados do desempenho esperado de um hélice com características de diâmetro e passo, dentro da gama de valores testados.

Os conjuntos de parâmetros testados foram, tal como já foi referido, os seguintes:

- Número de neurónios da camada intermédia (entre 1 a 150);
- Função transferência da camada intermédia (*tansig*, *logsig* ou *purelin*);
- Função transferência da camada de saída (*logsig* ou *purelin*);
- Algoritmo de treino do *Back-Propagation* da rede (*trainlm*, *trainrp* ou *trainbfg*).

Recorrendo ao programa que procura as configurações de rede com menor erro, obtiveram-se os resultados presentes no Quadro do Apêndice L. De referir que os parâmetros da função transferência da camada intermédia, camada de saída e algoritmo de treino estão identificados por números (Quadro 6).

Algoritmo de treino	Identificação na Quadro do apêndice
<i>trainlm</i>	1
<i>trainbfg</i>	2
<i>trainrp</i>	3

Funções transferência da camada intermédia	Identificação na Quadro do apêndice
<i>tansig</i>	1
<i>logsig</i>	2
<i>purelin</i>	3

Funções transferência da camada de saída	Identificação na Quadro do apêndice
<i>logsig</i>	1
<i>purelin</i>	2

Quadro 6 – Legenda de apresentação dos dados no Quadro de resultados

Na Quadro do Apêndice L estão identificados por cores as configurações com menores erros de teste obtidas. Desde logo, é possível verificar que um maior número de neurónios produz erros de teste de ordem superior, o motivo pelo qual isto acontece é simples, é o chamado *overfitting*, ou seja, com um maior número de neurónios, a rede “decora” os pares de entrada e saída do conjunto de treino, revelando-se pouco

generalista e produzindo maior erro quando lhe é apresentada um conjunto completamente desconhecido à mesma, o conjunto de teste. Esta conclusão alterou o rumo dos testes, revela-se desnecessário testar as configurações de rede para mais de dez neurónios. Foi então realizada uma série de experiências, seis no total, mantendo a mesma gama de funções transferência da camada intermédia, da camada de saída e algoritmo de treino, alterando-se apenas, o número de neurónios máximo para dez.

6.3.2. Experiências com configurações de rede até dez neurónios

O motivo pelo qual se realizaram seis experiências em vez de uma única, foi para chegar a uma conclusão o mais precisa possível. Serve para verificar de forma mais clara, se existe de fato uma tendência para determinadas configurações apresentarem menor erro, pois o erro obtido será naturalmente função do conjunto de teste entregue à rede, o qual é selecionado de forma totalmente aleatória, e dos pesos das ligações aos neurónios e termos dos mesmos, que são atribuídos à rede neuronal durante o treino, e que poderá variar de experiência para experiência.

Apresentando por traços gerais os resultados obtidos na Quadro do Apêndice M onde os parâmetros se regem pela mesma topologia de identificação implícita na Quadro 6, pôde-se verificar o seguinte:

- 14 Configurações de rede distintas;
- Nº de neurónios entre 1 a 9;
- Resultados apenas com função transferência de camada 1 (*tansig*) e 2 (*logsig*);
- Resultados apenas com função transferência da camada de saída 2 (*purelin*);
- Resultados apenas com algoritmo de treino 1 (*trainlm*) e 2 (*trainbfg*), com exceção para dois casos com o algoritmo de treino 3 (*trainrp*);
- Média de valores de erro de teste = 0,035677017;
- Erro de teste mínimo = 0,009607466;
- Média de valores de erro de validação = 0,045261931;
- Erro de validação mínimo = 0,010391309.

Analisando os resultados das experiências confirma-se, mais uma vez, que as configurações vencedoras são as que tipicamente apresentam um número reduzido de neurónios, a maioria apresenta até 5 neurónios. O aspeto preponderante para achar as

melhores configurações foi o erro de teste, no entanto, o erro de validação também tem uma grande importância por serem ambos erros conseguidos através do fornecimento de conjuntos de dados desconhecidos à rede. Existe uma dualidade na análise dos erros, embora estejamos à procura do erro de teste mínimo, este deverá também ser acompanhado por um baixo erro de validação, igualmente importante será também estabelecer uma comparação entre os dois erros, procurando as configurações que possuem um erro de teste inferior ao de validação, uma vez que, o erro de validação é um suporte à rede na sua fase de treino, sendo uma referência para a mesma, como já mencionado. Se o erro de validação for inferior ao de teste, poderá ser um indicador que a rede está demasiado ajustada ao conjunto de dados de validação.

Há uma configuração que se destaca evidentemente das outras, surgindo em quatro experiências no “pódio”, na experiência 3, 5 e 6, com os seguintes parâmetros:

- 3 Neurónios;
- Função transferência de camada 2 (*logsig*);
- Função transferência da camada de saída 2 (*purelin*);
- Algoritmo de treino 1 (*trainlm*).

Uma configuração que de todas as experiências efetuadas, ainda se destacou por ter sido a que obteve o valor mínimo de erro de teste, na experiência 3, e que em todas as experiências onde esteve no “pódio”, apresentou o valor mínimo de erro de teste, consideravelmente abaixo da média dos erros de teste obtidos. No que diz respeito ao erro de validação, também apresenta valores abaixo da média, apresentando sempre um erro de validação ligeiramente superior ao de teste.

Para as restantes configurações, é difícil encontrar tendências, pois nenhuma se evidencia tão notoriamente. No entanto, existem duas que foram reincidentes por duas vezes nas seis experiências, não sendo a reincidentência um fator muito determinante, continua a ser uma referência, as configurações foram as seguintes:

	Configuração 1	Configuração 2
Nº de neurónios	2	3
Função transf.	2	2
Função transf. saída	2	2
Algoritmo de treino	2	3

A configuração 1 foi a que das duas obteve o menor erro de teste, mas associado a este, está um erro de validação inferior ao mesmo. Esta evidência poderá indicar que a rede neuronal está algo ajustada aos dados do conjunto de validação. De resto, o erro obtido da segunda vez, também não é promissor, sendo consideravelmente acima da média. A configuração 2 apresentou sempre erros de teste e validação bastante acima da média. Os erros de validação são especialmente elevados. São ambas configurações que apresentaram resultados pouco coerentes, aparentando serem pouco promissoras.

De resto, e persistindo com os mesmos critérios, valor dos erros e comparação entre estes, chegou-se às seguintes configurações, que aparentavam ser promissoras:

	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3	Configuração 4
Nº de neurónios	2	5	5	6
Função transf.	2	1	2	1
Função transf. saída	2	2	2	2
Algoritmo de treino	1	1	2	1

Das quatro configurações apresentadas, as que mais se destacam são a configuração 1 e 4. As configurações 2 e 3 apresentam resultados algo parecidos, são caracterizadas por obterem erros de teste baixo e erros de validação ligeiramente altos, embora abaixo da média. A configuração 3 apresenta um erro de teste substancialmente inferior, e bastante baixo quando comparado à média dos erros de teste obtidos, evidenciando-se da configuração 2. Já as configurações 1 e 4 revelam-se um pouco mais coerentes. Apresentam ambas, igualmente, resultados parecidos, apesar da configuração 1 apresentar um erro de validação inferior ao erro de teste, os valores obtidos para ambos são bastante baixos. O erro de validação é inferior ao de

teste, mas não por muito, a diferença é marginal. O fato dos erros serem baixos e a diferença entre ambos não ser muito significativa, são motivos suficientes para considerar esta configuração, não fosse esta uma das configurações que apresenta os resultados mais baixos entre as quatro. A configuração 4 apresenta também resultados bastante positivos, com erro de teste e validação bastante abaixo da média, tal como a configuração 1. No caso dos resultados obtidos com a configuração 4, o erro de validação foi, mesmo assim, ligeiramente superior ao de teste, um resultado promissor.

Com base na análise efetuada, chegou-se às quatro configurações que merecem uma segunda análise, a fim de verificar por fim, qual será evidentemente a melhor para o problema apresentado, e foram as seguintes:

	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3	Configuração 4
Nº de neurónios	3	6	2	5
Função transf.	2	1	2	2
Função transf. saída	2	2	2	2
Algoritmo	1	1	1	2

6.3.3. Experiências com as quatro configurações vencedoras

O próximo passo desta análise será verificar dentro destas quatro configurações, qual será aquela que apresenta de fato o melhor desempenho. Esta tarefa envolveu treinar as configurações mencionadas até que o erro apresentado fosse inferior a um determinado valor, estipulado com base nas experiências feitas.

Inicialmente o erro de teste a utilizar como referência, seria o valor máximo obtido entre as quatro configurações, no entanto, era necessário estabelecer uma meta ambiciosa, chegou-se à conclusão que o valor a utilizar seria o valor de erro de teste obtido pela configuração 2 (erro de teste= 0,021245883), o qual aparentava estar ao alcance de todas as configurações.

Rapidamente se verificou que todas as configurações possuíam potencial para apresentar erros substancialmente abaixo deste último utilizado como referência. Portanto, a sequência destas experiências consistiram em testar até que valor o erro de teste poderia baixar, para as quatro configurações.

Desde logo, as configurações que demonstraram ter maior evolução a cada experiência, foram as configurações 1 e 3, que curiosamente partilham dos mesmos parâmetros diferindo apenas no número de neurónios. Estabeleciam ambas, valores “recorde” de erros de teste a cada experiência realizada, valores que rapidamente se tornaram referência para as experiências com outras configurações. Houve a tentativa de obter erros de teste de ordens tão baixas como os conseguidos pelas configurações 1 e 3, no entanto, como se pode verificar no Apêndice N, apesar do programa ter procurado durante bastante tempo, simplesmente não conseguia encontrar uma arquitetura de rede que entregasse um erro de teste de ordem tão baixa. As configurações 2 e 4, não conseguiram obter valores de erro de teste abaixo dos 0,004, ao passo que, as configurações 1 e 3 obtiveram valores abaixo dos 0,0025, uma diferença, que nesta ordem de comparação, é elevada.

Relativamente aos resultados obtidos, individualmente pelas configurações 1 e 3, importa referir que associado aos valores mais baixos de erro de teste, não correspondem necessariamente erros de validação baixos. No entanto, a configuração 1 apresenta resultados ligeiramente melhores, contando para a situação de desempate o fato de ter conseguido obter um erro de validação e teste baixos na experiência 2. Visto que são duas configurações que diferem apenas no número de neurónios, uma análise gráfica da evolução do erro de teste com o número de neurónios, será relevante para de fato confirmar quantos neurónios realmente oferecem o melhor desempenho da rede neuronal.

6.3.4. Análise da evolução do erro, consoante número de neurónios, com a configuração vencedora.

Os testes realizados até agora confirmam que existe de fato uma configuração que se destaca das outras. No entanto, os resultados obtidos foram bastante promissores para as configurações 1 e 3, que são duas configurações semelhantes não fossem ter uma diferença no número de neurónios. Com base neste aspeto, torna-se

necessário verificar quantos neurónios serão necessários para obter o melhor desempenho desta rede neuronal. Posto isto, foram realizadas quatro experiências com esta configuração, para que em cada uma o erro, tanto de validação como de teste, fosse apresentado sob a forma gráfica em função do número de neurónios, num máximo de dez.

Os resultados obtidos estão presentes no Apêndice O, e evidenciam resultados bastante coerentes. A configuração com quatro neurónios foi a que obteve o erro de teste inferior em duas experiências, tal como acontece com a configuração de três neurónios. As configurações com seis e sete neurónios também se evidenciaram, não apresentando no entanto, valores de erro de teste tão baixos como as anteriores. Ambas as configurações de quatro e três neurónios apresentam erros de teste baixos e são acompanhados por erros de validação inferiores ou muito próximos dos erros de teste. A configuração com dois neurónios não surgiu em nenhuma das experiências, também na análise feita anteriormente, a rede que obteve ligeiramente melhores resultados foi a de três neurónios, pelo que fará sentido procurar agora saber, se a rede com quatro neurónios tem potencial para apresentar melhores resultados que a de três e dois neurónios.

No Apêndice P, está o Quadro para comparação dos resultados obtidos com a arquitetura de rede mencionada com três e quatro neurónios. Por cada configuração, apresentam-se os resultados de cinco experiências efetuadas. É desde logo evidente, que a configuração 2, com quatro neurónios, consegue obter valores de erro de teste tão, ou mais baixos que a configuração com três neurónios. No entanto, e como é necessário mais uma vez implementar um critério para a escolha da melhor arquitetura, fez-se a escolha com base nos erros de validação, que também têm um grau de importância considerável na avaliação do desempenho da rede. De fato é possível verificar que a configuração 1, com três neurónios, obtém quase sempre erros de validação inferiores nas cinco experiências, quando em comparação com a configuração 2. Portanto, a configuração que será utilizada será a configuração 1, com três neurónios.

Resta agora saber, qual será a rede com a configuração 1, que possui arquitetura mais apropriada para o nosso problema, ou seja, a rede que possui os parâmetros tais como, o peso das ligações e termos dos neurónios, que oferece melhor desempenho

perante uma amostra de dados que lhe for apresentada. Esta medida já é feita na fase de treino da rede, o chamado erro de teste, no entanto, será necessário verificar com certeza se a rede com menor erro de teste será mesmo a ideal. A escolha será feita entre todas as arquiteturas de redes treinadas, durante as experiências anteriores, e outras que foram obtidas posteriormente.

Importa ressaltar, e fazendo um cruzamento entre os resultados obtidos pelo camarada Mártires Paulino, que a configuração de rede encontrada neste trabalho é em tudo semelhante à do camarada, em termos de funções transferência e algoritmos de treino, excetuando o número de neurónios, comprovando-se que teoricamente estaríamos perante o mesmo tipo de problema.

6.3.5. Escolha da melhor arquitetura de rede

Foram selecionados três dados de tempo obtidos em testes a determinadas condições de carga e regimes por cada hélice, num total de nove resultados. Depois, procedeu-se à análise da resposta das diferentes arquiteturas de rede, perante os dados de entrada que idealmente resultariam nos resultados verificados nos testes realizados.

No Apêndice Q apresentam-se os resultados, onde se demonstra os valores que a rede nos devolveu perante os nove conjuntos de dados de entrada. O ideal seria a rede devolver um valor o mais próximo possível ao valor expectável, que se trata do resultado verificado nos testes. Foi calculado o erro quadrático médio para cada configuração, por forma a verificar qual seria a que apresentava melhor resposta, pela seguinte equação:

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_i^n (y_i - t_i)^2$$

Equação 14 - Fórmula usada para o erro quadrático médio

onde n representa o número de erros calculados, neste caso nove, y_i a resposta da rede e t_i a saída desejável.

Perante os valores obtidos, verifica-se que a arquitetura 2 e 6, apesar de não serem as arquiteturas que apresentam os menores erros de teste, embora sejam

bastante baixos, são as que de fato apresentam o menor erro neste caso. Posto isto, a arquitetura selecionada será a arquitetura 6.

6.3.6. Importância das variáveis de entrada para a rede neuronal

Antes de avançar, torna-se apenas necessário verificar se todas as variáveis de entrada são preponderantes para a rede, ou seja, se todas elas são consideradas com um peso significativo nas ligações aos neurónios da rede. Esta verificação visa certificar que de fato a rede executa uma correlação entre todas as variáveis de entrada para conseguir dar uma resposta ao problema. No Apêndice R estão os pesos das ligações a cada neurónio por variável de entrada, e é bastante óbvio que todas as variáveis de entrada estão a entrar em linha de conta na rede neuronal, com um peso bastante significativo na generalidade.

Capítulo 7. Resultados Obtidos com rede neuronal

O intuito principal da análise dos resultados será entender se a rede neuronal consegue chegar à melhor solução de hélice, em termos de passo e diâmetro, para diferentes condições de carga e regime do motor. As melhores soluções serão aquelas que apresentam um menor tempo, que se traduz num hélice que é capaz de efetuar determinado trajeto de forma mais célere.

Para obter os resultados anteriormente referidos, seria necessário efetuar o processo inverso ao utilizado até agora, durante o treino da rede. Neste caso, seriam fornecidos determinados dados de entrada à rede (Passo e diâmetro do hélice, altura e estado de maré), por forma a obter os respetivos dados de saída (tempo). As melhores soluções geométricas seriam aquelas que, com determinada combinação de passo e diâmetro, oferecessem o menor tempo possível face às condições impostas, comparativamente a todas as outras combinações de passo e diâmetro fornecidas à rede. Mais uma vez, utilizou-se uma série encadeada de ciclos para efetuar essa comparação e achar a melhor combinação destes aspetos geométricos, testando todas as soluções de passo para todas as soluções de diâmetro, dentro da gama de valores testada. Para o efeito, fixou-se o valor de altura de maré no valor médio obtido entre todos os testes realizados. No que diz respeito ao estado da maré, verificou-se para os estados a encher ou a vazar, a fim de verificar se o estado da maré poderia trazer influência nos resultados.

Foram definidos quatro regimes diferentes em termos de potência:

- 180 W;
- 350 W;
- 850 W;
- 1550 W.

Para cada regime foram impostas quatro condições de carga:

- Carga inicial;
- 10kg;
- 20kg;
- 30kg.

Os resultados relativos à melhor solução geométrica de hélice para as condições referidas, encontram-se no Apêndice S e Apêndice T, respetivamente na condição de maré a encher e a vazar.

7.1. Discussão de resultados

Dos resultados para as melhores soluções geométricas de hélices conforme as condições impostas, verifica-se que de fato, tanto para o estado de maré a encher como a vazar, os valores de tempo obtidos pelas melhores soluções são bastante parecidos, assim como o passo de hélice encontrado. Por outro lado, o diâmetro é algo que não se mantém muito coerente em todos os resultados.

É desde logo bastante óbvio, que a adição de peso resulta numa gradual melhoria dos tempos obtidos. Esta observação já havia sido apontada na discussão de resultados obtidos na realização dos testes. De fato, o posicionamento mais a vante dos pesos poderá ter sido preponderante na dinâmica desta embarcação, porque de certa forma fica mais equilibrada, a popa não afunda tanto. A embarcação apresenta naturalmente uma tendência a ter um calado a ré superior ao calado a vante, a colocação do motor a ré vem acentuar esta atitude. Com o motor a funcionar, e mesmo nos regimes mais baixos, o calado a ré aumenta ainda mais e, conseqüentemente, o efeito de arrasto da estrutura de suporte aos motores, que de certa forma também origina uma ainda maior imersão da popa. Para além deste efeito, existe o fato de a proa elevar-se demasiado, o que não permite à embarcação “planar” sobre a água, em vez disso, mesmo com fraca ondulação, existe um embater rígido da proa na água, constatando-se como um óbvio entrave a uma deslocação suave da embarcação e dificultando a sua normal progressão. Portanto, as diferenças nos tempos obtidos consoante as condições de carga impostas é significativa, e bastante vincada, apresentando-se como uma tendência geral.

Para os regimes 1 e 2 (180 W e 350 W), as soluções geométricas estão perfeitamente coerentes, inclusivamente entre as diversas condições de carga. A melhor solução apontada será um hélice de passo 15,59 polegadas e 300mm de diâmetro. Os hélices com maior passo, tipicamente são os que oferecem maior velocidade à embarcação, desde que, o motor que a equipa tenha potência suficiente para manter as rotações do hélice. Aos regimes do motor 1 e 2 o motor trabalha num domínio bastante aquém da sua capacidade máxima, portanto, teoricamente, consegue

manter as mesmas rotações que apresentaria com um hélice de passo menor com um hélice de passo maior, sendo que, inevitavelmente, o hélice de passo maior trará melhores resultados porque em cada revolução permite um avanço maior, ou seja, a cada rotação do hélice a embarcação deslocar-se-á mais do que o expectável de um hélice de passo menor. Relativamente ao diâmetro de 300mm, este resultado poderá estar associado intimamente à escolha do passo maior, uma vez que, um diâmetro superior poderia exigir um esforço adicional do motor, porque para além de deslocar mais água exige um maior binário pela sua maior dimensão, que poderá causar a diminuição das rotações que o motor consegue disponibilizar ao hélice e, conseqüentemente, o potencial que este último poderia oferecer caso as rotações fossem superiores. É tudo uma questão de equilíbrio, o diâmetro e o passo encontram-se estreitamente associados, depende bastante da capacidade do motor.

No caso dos regimes 3 e 4 (850 W e 1550 W), as soluções são bastante coincidentes em termos do passo, mas não tanto quando verificamos o diâmetro do hélice, isto acontece entre condições de carga e quando analisados lado a lado os resultados obtidos com maré a encher e a vazar. Relativamente ao passo, parece óbvia a solução de um hélice com 10 polegadas. A estes regimes o motor já se encontra a trabalhar próximo da capacidade máxima, um hélice de passo maior iria colocar o motor em grande esforço, não conseguindo este último, oferecer as rotações necessárias para o melhor desempenho do hélice. Um hélice de passo menor, por outro lado, permite ao motor atingir um regime de rotações mais elevado em comparação ao que seria expectável com um hélice de passo maior, apesar de numa revolução um hélice de passo menor avançar menos, as rotações mais elevadas que o motor atinge permitem compensar o passo menor do hélice. Também a estes regimes o calado a ré aumenta, o efeito de arrasto da estrutura de apoio dos motores intensifica-se e a proa eleva-se substancialmente mais, fatores que em conjunto trazem uma maior resistência ao deslocamento da embarcação. Se a embarcação não revelasse este comportamento, talvez um hélice de passo maior tivesse o potencial para atingir uma velocidade superior e, conseqüentemente apresentar um tempo de trajeto inferior. No entanto, um hélice de passo menor produz uma força de impulso superior, pois o ângulo de ataque das pás é menor, e o vetor força de impulso assume uma direção mais próxima à linha do eixo

do hélice que a evidenciada num hélice de passo maior, dai os hélices de passo menor serem a escolha de eleição quando a necessidade de determinada plataforma é a força propulsiva que esta entrega, e não tanto a velocidade. Naturalmente, a estes regimes o fator preponderante será adotar um hélice que se oponha de forma mais efetiva à resistência oferecida pelos constrangimentos da embarcação referidos, sendo este aquele que obtém melhor desempenho.

No que toca às soluções de diâmetro encontradas aos regimes 3 e 4, existem soluções bastante diferentes entre as condições de maré a encher e a vazar. De fato, até se opõem, porque para a carga inicial, os valores são de extremos, no caso de maré a vazar a melhor solução será o hélice de diâmetro maior e no outro o de diâmetro inferior. No caso da carga adicionada de 10kg, mantém-se uma situação semelhante, se bem que os diâmetros na condição de maré a vazar diminuem ligeiramente. A situação da carga adicionada de 20kg será a que mais se aproxima em termos de resultado, havendo uma diferença de apenas 8mm entre os diâmetros obtidos. Na condição de 30kg também existe uma diferença significativa. O impulso oferecido por um hélice é também função do diâmetro (O impulso é o integral sobre a área da pá de todas as forças infinitesimais de impulso), sendo esta maior para um hélice de maiores dimensões. No entanto, um hélice de maiores dimensões também poderá exigir um maior esforço ao motor (o binário requerido corresponde ao integral sobre a área da pá de todas as forças infinitesimais de arrasto), comprometendo o regime de rotações que este disponibiliza. Analisando os resultados obtidos para as distintas situações de maré, poderá haver de fato uma dificuldade da rede neuronal em chegar a uma solução que seja claramente ótima em termos de diâmetro para todas as situações. Isto poderá dever-se a uma relativa imprecisão da rede na obtenção de resultados, como ficou provado na análise de erros que esta obteve. Para verificar se de fato a imprecisão da rede poderá dar resultados díspares pela sua imprecisão, verificou-se para as melhores soluções geométricas obtidas na situação de maré a encher e a vazar, quais seriam os tempos obtidos na situação de maré a vazar e encher respetivamente.

No Apêndice U apresenta-se um quadro comparativo entre as melhores soluções geométricas obtidas para a situação de maré a vazar, e os testes para essa mesma situação, de maré a vazar, mas com as melhores soluções geométricas obtidas com maré

a encher. No Apêndice V apresenta-se um quadro comparativo com a situação inversa da anterior. Estão assinalados os resultados que originaram tempos bastante próximos, e que poderão indicar que a melhor solução para ambos os regimes será um hélice com 300mm diâmetro na condição de carga inicial e carga adicional de 10kg, um hélice com 312mm de diâmetro na situação de carga adicional de 20 kg, e um de 308mm para a situação de carga adicional de 30kg. Visto que as diferenças do tempo obtidas são mínimas entre os resultados, isto poderá revelar que uma certa inexatidão da rede poderá ter originado soluções diferentes. Eventualmente poderá haver inexistência de qualquer correlação entre o estado de maré e os resultados obtidos durante os testes efetuados, da qual poderá advir uma má interpretação da rede.

Aos regimes 3 e 4 e, às condições de carga inicial e adicional de 10kg, existe uma maior resistência no deslocamento da embarcação, devido aos fatores anteriormente referidos. Apesar de um hélice de maior diâmetro poder oferecer um maior impulso pelo maior volume de água deslocado, também é verdade que exigiria maior esforço do motor, havendo a possibilidade de este não oferecer rotações suficientes para o melhor desempenho do hélice, e a melhor solução ser evidentemente a que apresentar um diâmetro menor por haver um melhor balanceamento entre a capacidade do motor e o desempenho do hélice. Na situação de cargas adicionais de 20kg e 30kg, verifica-se uma solução de um hélice com diâmetro ligeiramente superior. Tal poderá estar associado ao fato de nestas condições de carga a embarcação demonstrar deslocar-se melhor sobre a água, com menos resistência por estar mais equilibrada, e portanto, já seria possível retirar melhor rendimento de um hélice com uma superfície maior.

Numa outra análise, no Apêndice W apresentam-se os resultados obtidos com a rede neuronal, relativamente à resposta que esta mesma deu perante as características dos hélices testados como dados de entrada, com maré a vazar. De uma forma geral, o hélice com comportamento mais equilibrado, é o v19/p4000, com 12 polegadas de passo e 300mm de diâmetro, revelando-se o hélice ideal para a maioria dos casos, em termos das condições de carga e potência.

Comparando os tempos obtidos com a rede neuronal para os hélices testados (Apêndice W) e as melhores soluções encontradas presentes no Apêndice T, verifica-se que a diferença é substancial para os regimes mais baixos, independentemente da

condição de carga, demonstrando uma superioridade das melhores soluções geométricas relativamente aos hélices utilizados nos testes. No entanto, para os regimes mais altos a diferença não é tão notória. É difícil quantificar o quão melhor é o desempenho das melhores soluções geométricas encontradas com a rede neuronal em comparação com os hélices testados, visto que a unidade de comparação escolhida foi o tempo.

Capítulo 8. Conclusões e trabalhos futuros

A otimização/modelação de hélices é uma tarefa complexa, tal como este trabalho demonstrou, nomeadamente pela variedade de fatores que influenciam o seu funcionamento. A interação do hélice com o meio onde atua é de difícil determinação, existindo fenómenos complexos, tal como a cavitação, que são difíceis de prever. As teorias de projeto de hélice existentes atualmente, apesar de terem sofrido grandes desenvolvimentos, não permitem ainda, obter uma resposta concreta e firme na análise dos hélices. Motivo pelo qual, tipicamente, os hélices são desenvolvidos de forma padronizada, sem haver um estudo intensivo no âmbito da otimização dos mesmos. A nível do trabalho desenvolvido, as redes neuronais aparentam possuir uma boa capacidade de aprendizagem. Os resultados obtidos, apontam que de certa forma, a rede tenha conseguido interpretar as características de funcionamento de cada hélice, especificamente para a embarcação utilizada e mediante as condições impostas de carga e regime de motor. A utilização da rede neuronal é relativamente simples, no entanto, a preparação dos dados e a procura pela melhor arquitetura são tarefas bastante demorosas, que exigem tempo e afínco para serem compreendidas. Contudo, as redes neuronais destacam-se por exigirem um investimento e tempo de processamento drasticamente menor comparativamente a outras metodologias de otimização/modelação de hélices, nomeadamente de outros tipos de *software* (e.g. *CFD's*), potencialmente oferecendo soluções tão ou mais vantajosas que as destas metodologias.

Enquadrando no projeto *ICARUS*, existem algumas recomendações que devem ser equacionadas e ponderadas referentes, nomeadamente, à embarcação adotada para este projeto. Desde logo, ficou evidente que a embarcação empregue pelo CINAV no âmbito do projeto *ICARUS*, não será a mais indicada para o mesmo. Trata-se de um veleiro de recreio, o qual não foi projetado para albergar um motor fora de borda, muito menos, dois motores fora de borda acompanhados por duas baterias, e restante equipamento necessário para atingir os objetivos pretendidos neste projeto. Todo esse equipamento poderá inclusivamente pôr em causa a estabilidade da embarcação. Como se verificou na execução dos testes e tal como se encontra evidenciado na Figura 40, tendo em vista o seu desígnio estratégico da embarcação no âmbito do projeto *ICARUS*,

existe o risco de ocorrer a avaria de um ou ambos os motores, devido aos efeitos provocados pela estrutura de suporte dos motores.

Relativamente às recomendações para trabalhos futuros, poder-se-ão dividir em três áreas:

- Redes Neurais;
- Hélices;
- Planeamento e execução dos testes.

No aspeto das redes neuronais, o essencial será dedicar algum tempo à compreensão do seu funcionamento, pois não é uma tarefa simples. Para promover uma maior efetividade de resposta da rede, será necessária uma análise intensiva de quais os aspetos geométricos dos hélices que se pretendem testar. Deverá até considerar-se, comparar hélices idênticos entre si, onde só um parâmetro vai assumindo valores diferentes entre a gama testada, e.g. uma série de hélices em que só o passo varia, ou onde só o nº de pás varia, ou ainda variar só o diâmetro. Testando dois hélices com aspetos diferentes, a rede neuronal poderá ter dificuldade na identificação de quais os aspetos geométricos que serão responsáveis pela superioridade ou inferioridade de desempenho de determinado hélice perante outro. Relativamente ao planeamento/execução dos testes é uma etapa fundamental neste trabalho, que exige tempo e entrega para ser desenvolvido. Apesar da estreita colaboração com o camarada Mártires Paulino nesta fase, houve alguns aspetos importantes que terão de ser tidos em conta no futuro, (principalmente por não haver uma base que pudéssemos assumir como referência) nomeadamente:

- Cronometragem mais rigorosa;
- Recolha abrangente dos dados meteorológicos.

Pelos aspetos enunciados o rigor dos dados fornecidos à rede neuronal poderá ter de ser melhorado em trabalhos futuros. Para que tal aconteça e mediante disponibilidade, poderia ser considerada a opção de utilizar equipamentos de navegação, como por exemplo equipamento GPS e instrumentos meteorológicos (nomeadamente anemómetro, mas não restritamente). Seriam uma mais-valia por permitirem uma recolha mais rigorosa de dados e uma melhor definição das condições dos testes.

Lista bibliográfica

- ÅDNANES, A. K. (2003). *Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion*. ABB.
- ALVES, E. A. (Novembro de 2011). *Concepção de uma pequena turbina eólica destinada ao segmento doméstico (simplificação e análise aerodinâmica das pás)*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. Obtido em 2015
- ALVES, R. N. (Outubro de 2007). *Propulsão Elétrica de Navios*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio, Rio de Janeiro.
- BARRY, C. (Fevereiro de 2005). *Propeller Selection For Boats and Small Ships*. Obtido em Abril de 2015, de Davis&Co. Ltd.:
https://www.daviscoltd.com/Engineering/documents/PDFs%20Chris%20Barry/Hydrodynamics/Propeller_course.pdf
- BBlades. (s.d). Obtido em Abril de 2015, de BBlades Professional Propellers:
<http://bblades.com/props-101/>
- BRANDNER, P. (13 de Outubro de 2010). Obtido em Fevereiro de 2015, de Australian Maritime College: <https://www.amc.edu.au/news/postgraduate-opportunities-cavitation-research>
- CARLTON, J. S. (2007). *Marine Propellers and Propulsion* (2ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.
- CARLTON, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.
- CIENTIFICA, L. N. (21 de 10 de 2015). *Modelos de Redes Neurais*. Obtido de http://www.lncc.br/~labinfo/tutorialRN/frm1_arquitetura.htm
- CORTES, B. (2005). *Sistemas de suporte à decisão* (1ª ed.). Lisboa: FCA - Editora de Infomática.
- CORTEZ, P., & NEVES, J. (2000). *Redes Neurais Artificiais*. Universidade do Minho, Departamento de Informática, Braga.

- DENTE, A. (2012). Máquina Assíncrona.
- DEVENPORT, D., & LEIFSSON, L. T. (s.d.). *Lifting Line Theory*. Obtido em 12 de Janeiro de 2015, de VirginiaTech:
http://www2.esm.vt.edu/~dtmook/AOE5104_ONLINE/Presentations/22_Online_LiftingLineTheory.pdf
- Google Maps. (19 de 04 de 2015). Obtido de Google: <https://www.google.pt/maps>
- HERRERA, R. (Abril de 2015). *Manual Procedure for Propeller Pitch Measurement*. Obtido de Propeller Pages:
http://www.propellerpages.com/?c=articles&f=2006-03-27_manual_pitch_measurement
- HydroComp. (s.d.). *Blade Area Ratio Defined: A hydrocomp technical report*. Obtido em 11 de Fevereiro de 2015, de HydroComp: <http://hydrocompinc.com/wp-content/uploads/documents/HC135-BladeAreaRatio.pdf>
- Hydrocomp, Inc. (s.d.). *Evaluating Skewed Propellers*. Obtido em Janeiro de 2015, de <http://hydrocompinc.com/knowledge/evaluating-skewed-propellers>
- ICARUS. (s.d.). Obtido em Novembro de 2014, de <http://www.fp7-icarus.eu/>
- Instituto Hidrográfico. (Maio de 2015). Obtido de Porto de Lisboa:
http://www.portodelisboa.pt/portal/page/portal/PORTAL_PORTO_LISBOA/HIDROGRAFIA/TABELA_MARES
- KOZIEL, S., Ciaurri, D. E., & Leifsson, L. (2011). *Comput. Optimization, Methods and Algorithms*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- KUIPER, G. (1992). *The Wageningen Propeller Series*. MARIN.
- LAWRENCE, S., & GILES, C. L. (2000). Overfitting and neural networks: Conjugate Gradient and Backpropagation. *International Joint Conference on neural networks*. Italia: IEEE Computer Society.
- MARTINS, A., FERREIRA, H., ALMEIDA, C., Silva, H., Almeida, J. M., & Silva, E. (s.d.). *ROAZ and ROAZ II Autonomous Surface Vehicle Design and Implementation*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Autonomous Systems Laboratory, Porto.

- MathWorks*. (s.d.). Obtido em Maio de 2015, de
<http://www.mathworks.com/help/nnet/ug/choose-a-multilayer-neural-network-training-function.html>
- MCCAFFREY, J. (15 de 01 de 2014). *How to standardize data for neural networks*.
Obtido de Visual Studio Magazine:
<https://visualstudiomagazine.com/articles/2014/01/01/how-to-standardize-data-for-neural-networks.aspx>
- MERCURY. (s.d.). *Propellers: Everything you need to know and more*. Obtido em
Dezembro de 2014, de Mercury Marine: www.mercurymarine.com.au
- MILHO, M. I. (2000). *Redes Neurais e Reconhecimento de caracteres*. Lisboa: Instituto
Politécnico de Lisboa - Instituto superior de Engenharia de Lisboa.
- MOLLAND, A. F. (Ed.). (2008). *The Maritime Engineering Reference Book: A guide to
ship design, construction and operation*. (1ª ed.). Reino Unido: Elsevier.
- MÜLLER, D. N., & CARDON, A. (1994). *Introdução Às Redes Neurais Artificiais*.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Obtido em Junho de
2015, de http://www.inf.ufrgs.br/~danielnm/docs/intro_rna.pdf
- National Park Service*. (s.d.). Obtido em Fevereiro de 2015, de
<http://www.nps.gov/safr/learn/historyculture/propsaquaticpark.htm>
- PADOVEZI, C. D. (1997). *Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de
embarcações fluviais*. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo.
- (2002). *Resistência e Propulsão (Apontamentos teóricos)*. Universidade Técnica de
Lisboa.
- SILVA, J. E. (2007). Tecnologia Marítima. *Características e Elementos do Navio*. Obtido
de
http://www.enautica.pt/publico/professores/baptista/TecMar/cap2_tecmaritima.pdf
- SIMAS, E. (s.d.). *Introdução às Redes Neurais Artificiais*. Universidade Federal da Bahia,
Departamento de Engenharia Elétrica, Bahia. Obtido em Abril de 2015
- Torqueado Stanberg.Germany. (s.d.). *Operating Instructions Cruise R/T*. Alemanha.

Torqueedo Starnberg.Germany. (s.d.). Obtido em Março de 2015, de Torqueedo Starnberg.Germany: Torqueedo Starnberg.Germany

TRINDADE, J. (2012). *Hidrodinâmica e Propulsão*.

Volvo Penta. (1998). *Propellers: Inboard Propellers and speed calculation marine engines 2.1L-16L*.

WOODWARD, J. B. (Setembro de 1976). Matching Engine And Propeller. Universidade de Michigan. Obtido de http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/91735/Publication_No_142.pdf?sequence=4

Anexo A - Especificações técnicas

Os motores fora de bordo Torqeedo são motores assíncronos, o modelo que será utilizado nos ensaios, é, como já referido, o Cruise 2.0 R, que apresenta entre muitas outras, as principais especificações técnicas.

	Cruise 2.0 R
Potência de entrada em Watts	2000
Tensão nominal em Volts	24
Potência de propulsão em Watts	1120
Potência de propulsão de fora de bordo a gasolina equivalente	5 hp
Rendimento máximo %	51
Peso em kg	17,5
Regime de rotações por minuto máximo	1300

Fonte: Torqeedo Stanberg.Germany. (s.d.). Operating Instructions Cruise R/T.
Alemanha.

Apêndice A – Caderno de Provas

Testes dos hélices

Propósito

- Recolha de dados de operação dos distintos hélices mediante as condições que lhes forem impostas, concretamente, regime de rotação e condições de carga;
- Os dados recolhidos servirão como base para o treino de uma rede neuronal, com auxílio da ferramenta do *Matlab*, a qual permitirá chegar a conclusões relativas à modelação de hélices, com determinados requisitos, utilizando esta abordagem.

Pré-Requisitos

- Preparação da embarcação, neste caso do catamarã, no que diz respeito à segurança da sua operação e modo de emprego;
- Motor elétrico com respetivo telecomando de controlo;
- Verificar o funcionamento do motor elétrico e telecomando a ser utilizado;
- Adquirir hélices necessários para os testes;
- Testar todos os hélices, no que diz respeito ao modo de montagem e sua operação;
- Elaborar folhas de registo dos dados;
- Preparação dos pesos que definem as diferentes condições de carga;
- Definir os regimes de motor que serão utilizados.

Duração estimada/Fita de tempo

- O tempo previsto para execução dos testes será de 35 horas, a acontecer num espaço de 2 semanas entre 27 de Abril de 2015 a 08 Maio de 2015 (Apêndice 1);
- Está previsto duas janelas, de cerca de duas horas cada, para o camarada Chadli Amir realizar os seus testes, no âmbito da sua tese.

Variáveis de teste

Independentes

- Potência instantânea com os 3 hélices aos diferentes regimes e condições de carga;
- Passo do hélice;
- Diâmetro do hélice;
- Tempo obtido por trajeto;
- Condições de carga.

Dependentes

- Condições ambientais, nomeadamente corrente, vento e mar;
- Fatores intrínsecos à embarcação como o efeito do leme e resistência que o casco oferece;
- Fatores do motor, como sejam a entrega de potência propulsora do mesmo nas diferentes condições de funcionamento que lhe serão impostas.
- Influência da eficiência na operação do hélice ocasionado por diversos motivos, que poderá em caso extremo sofrer a ocorrência do fenómeno de cavitação.

Recursos Necessários

Materiais

- Catamarã;
- Berço da embarcação;
- Motor *Torqueado*, bateria e telecomando;
- Leme;
- Conta-rotações;
- Cronometro;
- Semirrígida de apoio;
- 2 Rádios de comunicações;
- Colete;
- Folha de registo;
- Caneta de acetato;

- Álcool Etílico
- Grua;
- Sacos de plástico;
- Balança;
- Pá;
- Fita isoladora;
- Carregador de baterias;
- Caneta.

Humanos

- 1 Patrão do catamarã;
- 1 Patrão da Semirrigida de apoio;
- 1 Pessoa de permanência no CNOCA.

Imateriais

- Fonte de alimentação de energia elétrica.

Ambiente de operação

- A área de exercício principal será desde a rampa do CNOCA até à doca do Arsenal do Alfeite;
- A área secundária será desde a doca do Arsenal do Alfeite até ao cais 8.

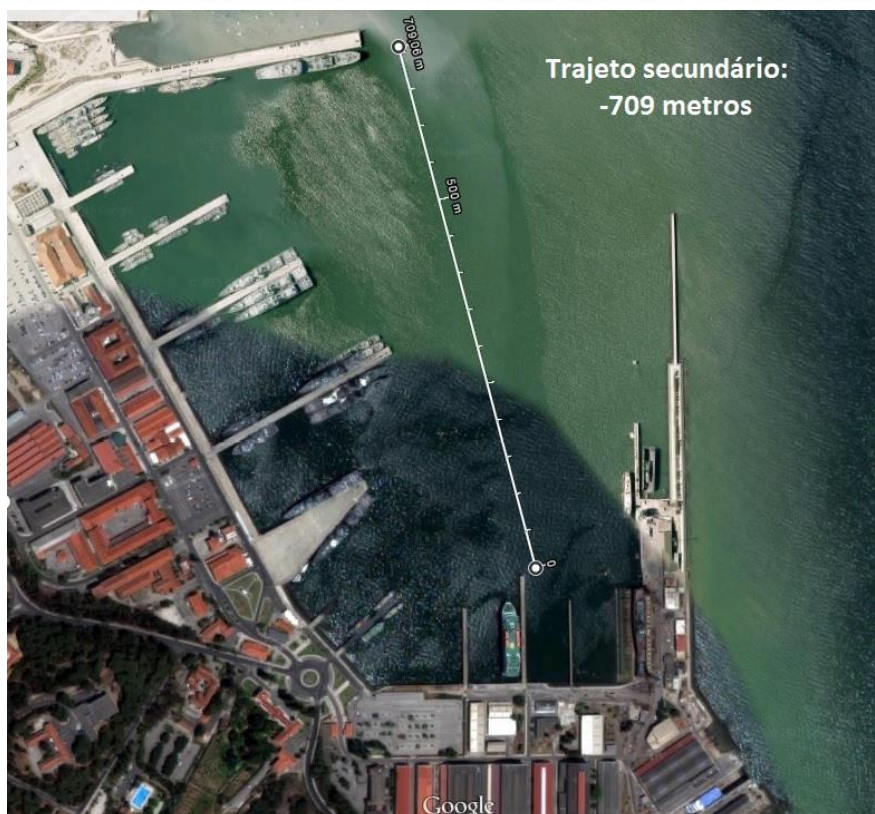


Figura 1 - Área de exercício primária e secundária, respetivamente. (Google Maps, 2015)

Condições iniciais

- A embarcação será sujeita a quatro condições de carga que serão impostas a quatro regimes de motor por cada hélice testado.
- Aproada desde a rampa do CNOCA até à doca do Arsenal do Alfeite;

- Folha de registos pronta a ser utilizada.

Segurança

- Colete sempre envergado;
- Efetuar manobras de forma suave;
- Cautela quanto à emissão de barulhos estranhos;
- Verificação da flutuabilidade da embarcação com a carga imposta.

Procedimentos

- No dia 27 de Abril, o primeiro dia de testes, será reservado ao aprontamento da embarcação para testes, que englobam pela seguinte ordem:
 - ✓ Montagem do primeiro hélice a ser testado;
 - ✓ Fixação do motor fora de bordo na estrutura de suporte da embarcação;
 - ✓ Determinação dos regimes que serão utilizados para testes;
 - ✓ Verificações de segurança para colocar embarcação na água;
 - ✓ Colocar catamarã na água e verificar se não existe algum problema com o mesmo.
- Por cada hélice iremos ter quatro condições de carga, a quatro regimes de motor diferentes. Todos os dias haverá um período de aprontamento da embarcação que requer:
 - ✓ Assegurar que o hélice montado será o hélice a ser utilizado nos testes a efetuar;
 - ✓ Colocar à disposição as cargas que serão necessárias para os testes;
 - ✓ Testar as comunicações;
 - ✓ Verificações de segurança;
 - ✓ Colocação do catamarã na água.
- Idealmente, e segundo está planeado, serão feitos 10 testes diários com duração estimada de trinta minutos;

- Entre testes, poderá ser necessário mudar as condições de carga, os pesos estarão colocadas num local específico para serem facilmente embarcados;
- Por cada teste efetuado serão feitos os devidos registos necessários, nomeadamente de informações disponibilizadas pelo telecomando do motor fora de borda, que serão:
 - ✓ Consumo instantâneo;
 - ✓ Tempo despendido por pernada;
- Haverá dias em que é necessário fazer troca de hélices, já considerados no planeamento dos testes, este procedimento terá a duração de uma hora e envolve:
 - ✓ Retirar catamarã da água;
 - ✓ Retirar hélice utilizado anteriormente;
 - ✓ Colocar o hélice a ser utilizado nos testes vindouros, seguindo manual de instruções;
 - ✓ Efetuar testes e verificar se o hélice está bem fixo e pronto a ser utilizado;
 - ✓ Colocar embarcação de novo na água.
- No fim de cada dia de testes, a embarcação terá que ser colocada no edifício do CNOCA.

Referências

A tabela de registos do Apêndice 2 terá de estar disponível para efetuar registos durante os testes.

Apêndice 1 – Fita de tempo

Horas	1SEMANA							2SEMANA						
	27-abr	28-abr	29-abr	30-abr	01-mai	02-mai	03-mai	04-mai	05-mai	06-mai	07-mai	08-mai	09-mai	10-mai
0900-0930	Aprentamento do Catamarã	A	A	A/Hélice 2	FERIADO	FIM DE SEMANA	A	A	A				FIM DE SEMANA	
0930-1000		T1/a/I	Testes Amir	T2/a/I			T2/c/III	T3/a/IV	T3/d/II					
1000-1030		T1/a/II		T2/a/II			T2/c/IV	T3/b/I	T3/d/III					
1030-1100		T1/a/III		T2/a/III			T2/d/I	T3/b/II	T3/d/IV					
1100-1130		T1/a/IV		T2/a/IV			T2/d/II	T3/b/III						
1130-1200	Arrumar catamarã e material						Arrumar catamarã e material							
1200-1330	Almoço						Almoço							
1330-1400	Testes Amir	T1/b/I	T1/c/III	T2/b/I			T2/d/III	T3/b/IV	G					
1400-1430		T1/b/II	T1/c/IV	T2/b/II			T2/d/IV	T3/c/I						
1430-1500		T1/b/III	T1/d/I	T2/b/III			Hélice 3	T3/c/II						
1500-1530		T1/b/IV	T1/d/II	T2/b/IV			T3/a/I	T3/c/III						
1530-1600		T1/c/I	T1/d/III	T2/c/I			T3/a/II	T3/c/IV						
1600-1630	Hélice 1	T1/c/II	T1/d/IV	T2/c/II			T3/a/III	T3/d/I						
1630-1700	G	G	G	G	G	G								

A	Aprentamento do catamarã para testes: 1) Verificação do nível de carga das baterias; 2) Estabelecimento dos rádios de comunicação; 3) Verificações de segurança da embarcação; 4) Testar funcionamento do motor; 5) Envergar colete salva-vidas; 6) Colocar embarcação na água.
G	Arrumação do catamarã: 1) Retirar catamarã da água 2) Limpeza do catamarã; 3) Inspeção ao catamarã e motor 4) Arrumação do material de comunicações

Hélice 1	Colocação do hélice v8/p350 no motor
Hélice 2	Colocação do hélice v19/p4000 no motor
Hélice 3	Colocação do hélice v30/p4000 no motor

T1; T2; T3; / a; b; c; d/ I; II; III; IV			
T1	Hélice v8/p350	a	Condição de carga normal
T2	Hélice v19/p4000	b	Condição de carga normal + 10 kg
T3	Hélice v30/p4000	c	Condição de carga normal + 20 kg
		d	Condição de carga normal + 30 kg
		I	Regime 1
		II	Regime 2
		III	Regime 3
		IV	Regime 4

Apêndice 2 – Modelo de folha de registo de dados

CARGA A							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)	
Tempo:		Tempo:		Tempo:		Tempo:	
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)	
Tempo:		Tempo:		Tempo:		Tempo:	
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)		Consumo instantâneo (W)	
Tempo:		Tempo:		Tempo:		Tempo:	
Médias							
Consumo instantâneo médio (W)		Consumo instantâneo médio (W)		Consumo instantâneo médio (W)		Consumo instantâneo médio (W)	
Tempo:		Tempo:		Tempo:		Tempo:	

Apêndice B - Resultados obtidos para o hélice v8/p350

CARGA INICIAL							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (04 1108MAY15)		1º Ensaio (04 1320MAY15)		1º Ensaio (04 1300MAY15)		1º Ensaio (04 1048MAY15)	
Potência (W) (Ida)	150	Potência (W) (Ida)	348	Potência (W) (Ida)	845	Potência (W) (Ida)	2470
Potência (W) (Volta)	160	Potência (W) (Volta)	380	Potência (W) (Volta)	860	Potência (W) (Volta)	2460
Tempo (s) (ida):	205	Tempo (s) (ida):	153	Tempo (s) (ida):	126	Tempo (s) (ida):	111
Tempo (s) (Volta):	223	Tempo (s) (Volta):	164	Tempo (s) (Volta):	129	Tempo (s) (Volta):	102
2º Ensaio (04 1120MAY15)		2º Ensaio (04 1324MAY15)		2º Ensaio (04 1304MAY15)		2º Ensaio (04 1052MAY15)	
Potência (W) (Ida)	155	Potência (W) (Ida)	355	Potência (W) (Ida)	835	Potência (W) (Ida)	2450
Potência (W) (Volta)	160	Potência (W) (Volta)	375	Potência (W) (Volta)	860	Potência (W) (Volta)	2440
Tempo (s) (ida):	213	Tempo (s) (ida):	152	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	102
Tempo (s) (Volta):	221	Tempo (s) (Volta):	164	Tempo (s) (Volta):	128	Tempo (s) (Volta):	102
3º Ensaio (04 1130MAY15)		3º Ensaio (04 1334MAY15)		3º Ensaio (04 1308MAY15)		3º Ensaio (04 1058MAY15)	
Potência (W) (Ida)	155	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	845	Potência (W) (Ida)	2430
Potência (W) (Volta)	160	Potência (W) (Volta)	380	Potência (W) (Volta)	875	Potência (W) (Volta)	2420
Tempo (s) (ida):	215	Tempo (s) (ida):	152	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	103
Tempo (s) (Volta):	220	Tempo (s) (Volta):	165	Tempo (s) (Volta):	129	Tempo (s) (Volta):	103
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	156,667	Consumo instantâneo (W) (Médio)	364,667	Consumo instantâneo (W) (Médio)	853,33	Consumo instantâneo (W) (Médio)	2445
Tempo total médio (s)	216,167	Tempo total médio (s)	158,333	Tempo total médio (s)	127,67	Tempo total médio (s)	103,8

CARGA 10 kg							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (03 1022MAY15)		1º Ensaio (03 1617MAY15)		1º Ensaio (03 1600MAY15)		1º Ensaio (03 1543MAY15)	
Potência (W) (Ida)	152	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	840	Potência (W) (Ida)	2400
Potência (W) (Volta)	155	Potência (W) (Volta)	360	Potência (W) (Volta)	840	Potência (W) (Volta)	2370
Tempo (s) (ida):	199	Tempo (s) (ida):	154	Tempo (s) (ida):	128	Tempo (s) (ida):	100
Tempo (s) (Volta):	206	Tempo (s) (Volta):	159	Tempo (s) (Volta):	129	Tempo (s) (Volta):	103
2º Ensaio (03 1027MAY15)		2º Ensaio (03 1624MAY15)		2º Ensaio (03 1605MAY15)		2º Ensaio (03 1550MAY15)	
Potência (W) (Ida)	150	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	840	Potência (W) (Ida)	2330
Potência (W) (Volta)	155	Potência (W) (Volta)	355	Potência (W) (Volta)	850	Potência (W) (Volta)	2100
Tempo (s) (ida):	203	Tempo (s) (ida):	159	Tempo (s) (ida):	134	Tempo (s) (ida):	99
Tempo (s) (Volta):	205	Tempo (s) (Volta):	158	Tempo (s) (Volta):	128	Tempo (s) (Volta):	105
3º Ensaio (03 1033MAY15)		3º Ensaio (03 1630MAY15)		3º Ensaio (03 1610MAY15)		3º Ensaio (03 1553MAY15)	
Potência (W) (Ida)	150	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	835	Potência (W) (Ida)	1910
Potência (W) (Volta)	152	Potência (W) (Volta)	353	Potência (W) (Volta)	835	Potência (W) (Volta)	1750
Tempo (s) (ida):	202	Tempo (s) (ida):	155	Tempo (s) (ida):	132	Tempo (s) (ida):	105
Tempo (s) (Volta):	205	Tempo (s) (Volta):	158	Tempo (s) (Volta):	131	Tempo (s) (Volta):	111
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	152,333	Consumo instantâneo (W) (Médio)	353	Consumo instantâneo (W) (Médio)	840	Consumo instantâneo (W) (Médio)	2143
Tempo total médio (s)	203,333	Tempo total médio (s)	157,167	Tempo total médio (s)	130,33	Tempo total médio (s)	103,8

CARGA 20 kg							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (04 1345MAY15)		1º Ensaio (04 1410MAY15)		1º Ensaio (12 1037MAY15)		1º Ensaio (12 1048MAY15)	
Potência (W) (Ida)	145	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	830	Potência (W) (Ida)	2380
Potência (W) (Volta)	160	Potência (W) (Volta)	355	Potência (W) (Volta)	835	Potência (W) (Volta)	2360
Tempo (s) (ida):	198	Tempo (s) (ida):	150	Tempo (s) (ida):	137	Tempo (s) (ida):	102
Tempo (s) (Volta):	234	Tempo (s) (Volta):	162	Tempo (s) (Volta):	124	Tempo (s) (Volta):	99
2º Ensaio (04 1352MAY15)		2º Ensaio (04 1420MAY15)		2º Ensaio (12 1042MAY15)		2º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)	145	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	840	Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)	154	Potência (W) (Volta)	370	Potência (W) (Volta)	830	Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):	196	Tempo (s) (ida):	156	Tempo (s) (ida):	135	Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):	233	Tempo (s) (Volta):	160	Tempo (s) (Volta):	123	Tempo (s) (Volta):	
3º Ensaio (04 1400MAY15)		3º Ensaio (04 1438MAY15)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)	145	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)	155	Potência (W) (Volta)	380	Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):	201	Tempo (s) (ida):	153	Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):	233	Tempo (s) (Volta):	164	Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):	
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	150,667	Consumo instantâneo (W) (Médio)	359,167	Consumo instantâneo (W) (Médio)	833,75	Consumo instantâneo (W) (Médio)	2370
Tempo total médio (s)	215,833	Tempo total médio (s)	157,5	Tempo total médio (s)	129,75	Tempo total médio (s)	100,5

CARGA 30 kg							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (04 1440MAY15)		1º Ensaio (04 1510MAY15)		1º Ensaio (12 1020MAY15)		1º Ensaio (12 1030MAY15)	
Potência (W) (Ida)	148	Potência (W) (Ida)	348	Potência (W) (Ida)	865	Potência (W) (Ida)	2420
Potência (W) (Volta)	165	Potência (W) (Volta)	358	Potência (W) (Volta)	860	Potência (W) (Volta)	2410
Tempo (s) (ida):	188	Tempo (s) (ida):	153	Tempo (s) (ida):	125	Tempo (s) (ida):	101
Tempo (s) (Volta):	225	Tempo (s) (Volta):	169	Tempo (s) (Volta):	117	Tempo (s) (Volta):	107
2º Ensaio (04 1452MAY15)		2º Ensaio (04 1518MAY15)		2º Ensaio (12 1024MAY15)		2º Ensaio	
Potência (W) (Ida)	153	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	865	Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)	160	Potência (W) (Volta)	365	Potência (W) (Volta)	860	Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):	191	Tempo (s) (ida):	152	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):	229	Tempo (s) (Volta):	168	Tempo (s) (Volta):	118	Tempo (s) (Volta):	
3º Ensaio (04 1509MAY15)		3º Ensaio (04 1525MAY15)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio	
Potência (W) (Ida)	150	Potência (W) (Ida)	345	Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)	160	Potência (W) (Volta)	370	Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):	196	Tempo (s) (ida):	152	Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):	229	Tempo (s) (Volta):	171	Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):	
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	156	Consumo instantâneo (W) (Médio)	356	Consumo instantâneo (W) (Médio)	862,5	Consumo instantâneo (W) (Médio)	2415
Tempo total médio (s)	209,667	Tempo total médio (s)	160,833	Tempo total médio (s)	121,75	Tempo total médio (s)	104

Apêndice C - Resultados obtidos para o hélice v19/p4000

CARGA INICIAL							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (11 1728MAY15)		1º Ensaio (11 1746MAY15)		1º Ensaio (11 1800MAY15)		1º Ensaio (12 1110MAY15)	
Potência (W) (Ida)	156	Potência (W) (Ida)	352	Potência (W) (Ida)	860	Potência (W) (Ida)	2338
Potência (W) (Volta)	162	Potência (W) (Volta)	356	Potência (W) (Volta)	865	Potência (W) (Volta)	2300
Tempo (s) (ida):	193	Tempo (s) (ida):	158	Tempo (s) (ida):	133	Tempo (s) (ida):	102
Tempo (s) (Volta):	209	Tempo (s) (Volta):	159	Tempo (s) (Volta):	135	Tempo (s) (Volta):	101
2º Ensaio (11 1737MAY15)		2º Ensaio (11 1752MAY15)		2º Ensaio (11 1830MAY15)		2º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)	154	Potência (W) (Ida)	355	Potência (W) (Ida)	855	Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)	163	Potência (W) (Volta)	358	Potência (W) (Volta)	865	Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):	192	Tempo (s) (ida):	162	Tempo (s) (ida):	129	Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):	206	Tempo (s) (Volta):	158	Tempo (s) (Volta):	132	Tempo (s) (Volta):	
3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):	
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	158,75	Consumo instantâneo (W) (Médio)	355,25	Consumo instantâneo (W) (Médio)	861,25	Consumo instantâneo (W) (Médio)	2319
Tempo total médio (s)	200	Tempo total médio (s)	159,25	Tempo total médio (s)	132,25	Tempo total médio (s)	101,5

CARGA 10 kg							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (11 1610MAY15)		1º Ensaio (11 1626MAY15)		1º Ensaio (11 1640MAY15)		1º Ensaio (11 1652MAY15)	
Potência (W) (Ida)	152	Potência (W) (Ida)	338	Potência (W) (Ida)	855	Potência (W) (Ida)	1975
Potência (W) (Volta)	162	Potência (W) (Volta)	345	Potência (W) (Volta)	860	Potência (W) (Volta)	1880
Tempo (s) (ida):	195	Tempo (s) (ida):	158	Tempo (s) (ida):	129	Tempo (s) (ida):	104
Tempo (s) (Volta):	207	Tempo (s) (Volta):	162	Tempo (s) (Volta):	130	Tempo (s) (Volta):	108
2º Ensaio (11 1618MAY15)		2º Ensaio (11 1632MAY15)		2º Ensaio (11 1644MAY15)		2º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)	154	Potência (W) (Ida)	338	Potência (W) (Ida)	843	Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)	163	Potência (W) (Volta)	343	Potência (W) (Volta)	860	Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):	191	Tempo (s) (ida):	156	Tempo (s) (ida):	128	Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):	205	Tempo (s) (Volta):	162	Tempo (s) (Volta):	131	Tempo (s) (Volta):	
3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):	
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	157,75	Consumo instantâneo (W) (Médio)	341	Consumo instantâneo (W) (Médio)	854,5	Consumo instantâneo (W) (Médio)	1928
Tempo total médio (s)	199,5	Tempo total médio (s)	159,5	Tempo total médio (s)	129,5	Tempo total médio (s)	106

CARGA 20 kg							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (11 1515MAY15)		1º Ensaio (11 1534MAY15)		1º Ensaio (11 1545MAY15)		1º Ensaio (11 1600MAY15)	
Potência (W) (Ida)	152	Potência (W) (Ida)	315	Potência (W) (Ida)	830	Potência (W) (Ida)	2360
Potência (W) (Volta)	155	Potência (W) (Volta)	320	Potência (W) (Volta)	840	Potência (W) (Volta)	2335
Tempo (s) (ida):	198	Tempo (s) (ida):	157	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	97
Tempo (s) (Volta):	208	Tempo (s) (Volta):	156	Tempo (s) (Volta):	125	Tempo (s) (Volta):	101
2º Ensaio (11 1525MAY15)		2º Ensaio (11 1540MAY15)		2º Ensaio (11 1550MAY15)		2º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)	150	Potência (W) (Ida)	314	Potência (W) (Ida)	830	Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)	165	Potência (W) (Volta)	318	Potência (W) (Volta)	840	Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):	192	Tempo (s) (ida):	154	Tempo (s) (ida):	125	Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):	212	Tempo (s) (Volta):	157	Tempo (s) (Volta):	127	Tempo (s) (Volta):	
3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):	
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	155,5	Consumo instantâneo (W) (Médio)	316,75	Consumo instantâneo (W) (Médio)	835	Consumo instantâneo (W) (Médio)	2348
Tempo total médio (s)	202,5	Tempo total médio (s)	156	Tempo total médio (s)	126	Tempo total médio (s)	99

CARGA 30 kg											
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4	Regime	2	Regime	3
1º Ensaio (05 1900MAY15)		1º Ensaio (05 1930MAY15)		1º Ensaio (05 1850MAY15)		1º Ensaio (05 1845MAY15)		1º Ensaio (11 1438MAY15)		1º Ensaio (11 1500MAY15)	
Potência (W) (Ida)	155	Potência (W) (Ida)	340	Potência (W) (Ida)	845	Potência (W) (Ida)	2435	Potência (W) (Ida)	340	Potência (W) (Ida)	815
Potência (W) (Volta)	160	Potência (W) (Volta)	335	Potência (W) (Volta)	845	Potência (W) (Volta)	2430	Potência (W) (Volta)	365	Potência (W) (Volta)	823
Tempo (s) (ida):	193	Tempo (s) (ida):	154	Tempo (s) (ida):	125	Tempo (s) (ida):	97	Tempo (s) (ida):	146	Tempo (s) (ida):	126
Tempo (s) (Volta):	191	Tempo (s) (Volta):	148	Tempo (s) (Volta):	131	Tempo (s) (Volta):	97	Tempo (s) (Volta):	150	Tempo (s) (Volta):	127
2º Ensaio (05 1910MAY15)		2º Ensaio (Não ensaiado)		2º Ensaio (Não ensaiado)		2º Ensaio (Não ensaiado)		2º Ensaio (11 1444MAY15)		2º Ensaio (11 1508MAY15)	
Potência (W) (Ida)	153	Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)	352	Potência (W) (Ida)	810
Potência (W) (Volta)	155	Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)	360	Potência (W) (Volta)	818
Tempo (s) (ida):	194	Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):	149	Tempo (s) (ida):	124
Tempo (s) (Volta):	197	Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):	146	Tempo (s) (Volta):	125
3º Ensaio (05 1921MAY15)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)		3º Ensaio (Não ensaiado)	
Potência (W) (Ida)	155	Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)		Potência (W) (Ida)	
Potência (W) (Volta)	158	Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)		Potência (W) (Volta)	
Tempo (s) (ida):	197	Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):		Tempo (s) (ida):	
Tempo (s) (Volta):	199	Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):		Tempo (s) (Volta):	
Médias						Médias					
Consumo instantâneo (W) (Médio)	156	Consumo instantâneo (W) (Médio)	337,5	Consumo instantâneo (W) (Médio)	845	Consumo instantâneo (W) (Médio)	2433	Consumo instantâneo (W) (Médio)	354,25	Consumo Total (J) (Médio)	816,5
Tempo total médio (s)	195,2	Tempo total médio (s)	151	Tempo total médio (s)	128	Tempo total médio (s)	97	Tempo total médio (s)	147,75	Tempo total médio (s)	125,5

Apêndice D - Resultados obtidos para o hélice v30/p4000

CARGA INICIAL									
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4	Regime	3
1º Ensaio (30 1115ABR15)		1º Ensaio (30 1052ABR15)		1º Ensaio (30 1030ABR15)		1º Ensaio (30 1000ABR15)		1º Ensaio (02 1450MAY15)	
Potência (W) (Ida)	140	Potência (W) (Ida)	330	Potência (W) (Ida)	1360	Potência (W) (Ida)	1560	Potência (W) (Ida)	840
Potência (W) (Volta)	135	Potência (W) (Volta)	385	Potência (W) (Volta)	1400	Potência (W) (Volta)	1560	Potência (W) (Volta)	845
Tempo (s) (ida):	224	Tempo (s) (ida):	169	Tempo (s) (ida):	120	Tempo (s) (ida):	115	Tempo (s) (ida):	127
Tempo (s) (Volta):	206	Tempo (s) (Volta):	155	Tempo (s) (Volta):	116	Tempo (s) (Volta):	112	Tempo (s) (Volta):	128
2º Ensaio (30 1125ABR15)		2º Ensaio (30 1102ABR15)		2º Ensaio (30 1040ABR15)		2º Ensaio (30 1020ABR15)		2º Ensaio (02 1457MAY15)	
Potência (W) (Ida)	142	Potência (W) (Ida)	345	Potência (W) (Ida)	1465	Potência (W) (Ida)	1562	Potência (W) (Ida)	835
Potência (W) (Volta)	140	Potência (W) (Volta)	365	Potência (W) (Volta)	1385	Potência (W) (Volta)	1555	Potência (W) (Volta)	840
Tempo (s) (ida):	223	Tempo (s) (ida):	175	Tempo (s) (ida):	119	Tempo (s) (ida):	118	Tempo (s) (ida):	126
Tempo (s) (Volta):	203	Tempo (s) (Volta):	160	Tempo (s) (Volta):	116	Tempo (s) (Volta):	113	Tempo (s) (Volta):	126
3º Ensaio (30 1134ABR15)		3º Ensaio (30 1106ABR15)		3º Ensaio (30 1045ABR15)		3º Ensaio (30 1025ABR15)		3º Ensaio (02 1502MAY15)	
Potência (W) (Ida)	145	Potência (W) (Ida)	355	Potência (W) (Ida)	1410	Potência (W) (Ida)	1550	Potência (W) (Ida)	835
Potência (W) (Volta)	140	Potência (W) (Volta)	370	Potência (W) (Volta)	1355	Potência (W) (Volta)	1560	Potência (W) (Volta)	855
Tempo (s) (ida):	220	Tempo (s) (ida):	172	Tempo (s) (ida):	123	Tempo (s) (ida):	118	Tempo (s) (ida):	128
Tempo (s) (Volta):	209	Tempo (s) (Volta):	157	Tempo (s) (Volta):	120	Tempo (s) (Volta):	112	Tempo (s) (Volta):	129
Médias									
Consumo instantâneo (W) (Médio)	140,333	Consumo instantâneo (W) (Médio)	358,333	Consumo instantâneo (W) (Médio)	1395,833	Consumo instantâneo (W) (Médio)	1557,833	Consumo instantâneo (W) (Médio)	841,667
Tempo total médio (s)	214,167	Tempo total médio (s)	164,667	Tempo total médio (s)	119	Tempo total médio (s)	114,667	Tempo total médio (s)	127,333

CARGA 10 kg							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (30 1149ABR15)		1º Ensaio (30 1530ABR15)		1º Ensaio (02 1545MAY15)		1º Ensaio (03 1510MAY15)	
Potência (W) (Ida)	145	Potência (W) (Ida)	320	Potência (W) (Ida)	840	Potência (W) (Ida)	1575
Potência (W) (Volta)	140	Potência (W) (Volta)	335	Potência (W) (Volta)	865	Potência (W) (Volta)	1580
Tempo (s) (ida):	213	Tempo (s) (ida):	170	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	111
Tempo (s) (Volta):	209	Tempo (s) (Volta):	184	Tempo (s) (Volta):	129	Tempo (s) (Volta):	111
2º Ensaio (30 1155ABR15)		2º Ensaio (30 1538ABR15)		2º Ensaio (02 1553MAY15)		2º Ensaio (03 1515MAY15)	
Potência (W) (Ida)	143	Potência (W) (Ida)	330	Potência (W) (Ida)	850	Potência (W) (Ida)	1580
Potência (W) (Volta)	140	Potência (W) (Volta)	335	Potência (W) (Volta)	860	Potência (W) (Volta)	1570
Tempo (s) (ida):	216	Tempo (s) (ida):	162	Tempo (s) (ida):	131	Tempo (s) (ida):	107
Tempo (s) (Volta):	209	Tempo (s) (Volta):	181	Tempo (s) (Volta):	130	Tempo (s) (Volta):	123
3º Ensaio (30 1200ABR15)		3º Ensaio (30 1548ABR15)		3º Ensaio (02 1555MAY15)		3º Ensaio (03 1520MAY15)	
Potência (W) (Ida)	142	Potência (W) (Ida)	335	Potência (W) (Ida)	848	Potência (W) (Ida)	1575
Potência (W) (Volta)	140	Potência (W) (Volta)	338	Potência (W) (Volta)	860	Potência (W) (Volta)	1570
Tempo (s) (ida):	213	Tempo (s) (ida):	171	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	108
Tempo (s) (Volta):	210	Tempo (s) (Volta):	182	Tempo (s) (Volta):	129	Tempo (s) (Volta):	112
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	141,667	Consumo instantâneo (W) (Médio)	332,167	Consumo instantâneo (W) (Médio)	853,833	Consumo instantâneo (W) (Médio)	1575
Tempo total médio (s)	211,667	Tempo total médio (s)	175	Tempo total médio (s)	128,833	Tempo total médio (s)	112

CARGA 20 kg							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (02 1600MAY15)		1º Ensaio (02 1512MAY15)		1º Ensaio (02 1220MAY15)		1º Ensaio (02 1200MAY15)	
Potência (W) (Ida)	145	Potência (W) (Ida)	355	Potência (W) (Ida)	872	Potência (W) (Ida)	1575
Potência (W) (Volta)	150	Potência (W) (Volta)	352	Potência (W) (Volta)	868	Potência (W) (Volta)	1578
Tempo (s) (ida):	223	Tempo (s) (ida):	150	Tempo (s) (ida):	131	Tempo (s) (ida):	110
Tempo (s) (Volta):	221	Tempo (s) (Volta):	161	Tempo (s) (Volta):	132	Tempo (s) (Volta):	112
2º Ensaio (02 1615MAY15)		2º Ensaio (02 1518MAY15)		2º Ensaio (02 1224MAY15)		2º Ensaio (02 1205MAY15)	
Potência (W) (Ida)	140	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	860	Potência (W) (Ida)	1580
Potência (W) (Volta)	150	Potência (W) (Volta)	355	Potência (W) (Volta)	862	Potência (W) (Volta)	1572
Tempo (s) (ida):	218	Tempo (s) (ida):	150	Tempo (s) (ida):	130	Tempo (s) (ida):	109
Tempo (s) (Volta):	230	Tempo (s) (Volta):	159	Tempo (s) (Volta):	131	Tempo (s) (Volta):	112
3º Ensaio (30 1620MAY15)		3º Ensaio (02 1525MAY15)		3º Ensaio (02 1230MAY15)		3º Ensaio (02 1210MAY15)	
Potência (W) (Ida)	132	Potência (W) (Ida)	350	Potência (W) (Ida)	870	Potência (W) (Ida)	1585
Potência (W) (Volta)	125	Potência (W) (Volta)	365	Potência (W) (Volta)	875	Potência (W) (Volta)	1590
Tempo (s) (ida):	213	Tempo (s) (ida):	146	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	114
Tempo (s) (Volta):	233	Tempo (s) (Volta):	159	Tempo (s) (Volta):	128	Tempo (s) (Volta):	112
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	140,333	Consumo instantâneo (W) (Médio)	354,5	Consumo instantâneo (W) (Médio)	867,833	Consumo instantâneo (W) (Médio)	1580
Tempo total médio (s)	223	Tempo total médio (s)	154,167	Tempo total médio (s)	129,833	Tempo total médio (s)	111,5

CARGA 30 kg							
Regime	1	Regime	2	Regime	3	Regime	4
1º Ensaio (02 1035MAY15)		1º Ensaio (02 1109MAY15)		1º Ensaio (02 1130MAY15)		1º Ensaio (02 1018MAY15)	
Potência (W) (Ida)	141	Potência (W) (Ida)	355	Potência (W) (Ida)	840	Potência (W) (Ida)	1570
Potência (W) (Volta)	138	Potência (W) (Volta)	365	Potência (W) (Volta)	855	Potência (W) (Volta)	1568
Tempo (s) (ida):	180	Tempo (s) (ida):	149	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	108
Tempo (s) (Volta):	181	Tempo (s) (Volta):	147	Tempo (s) (Volta):	132	Tempo (s) (Volta):	110
2º Ensaio (02 1055MAY15)		2º Ensaio (02 1115MAY15)		2º Ensaio (02 1140MAY15)		2º Ensaio (02 1022MAY15)	
Potência (W) (Ida)	142	Potência (W) (Ida)	358	Potência (W) (Ida)	845	Potência (W) (Ida)	1571
Potência (W) (Volta)	146	Potência (W) (Volta)	360	Potência (W) (Volta)	855	Potência (W) (Volta)	1569
Tempo (s) (ida):	185	Tempo (s) (ida):	140	Tempo (s) (ida):	130	Tempo (s) (ida):	111
Tempo (s) (Volta):	184	Tempo (s) (Volta):	149	Tempo (s) (Volta):	128	Tempo (s) (Volta):	113
3º Ensaio (02 1103MAY15)		3º Ensaio (02 1122MAY15)		3º Ensaio (02 1145MAY15)		3º Ensaio (02 1035MAY15)	
Potência (W) (Ida)	148	Potência (W) (Ida)	355	Potência (W) (Ida)	840	Potência (W) (Ida)	1573
Potência (W) (Volta)	151	Potência (W) (Volta)	368	Potência (W) (Volta)	848	Potência (W) (Volta)	1570
Tempo (s) (ida):	183	Tempo (s) (ida):	146	Tempo (s) (ida):	127	Tempo (s) (ida):	107
Tempo (s) (Volta):	184	Tempo (s) (Volta):	151	Tempo (s) (Volta):	127	Tempo (s) (Volta):	111
Médias							
Consumo instantâneo (W) (Médio)	144,333	Consumo instantâneo (W) (Médio)	360,167	Consumo instantâneo (W) (Médio)	847,167	Consumo instantâneo (W) (Médio)	1570,167
Tempo total médio (s)	182,833	Tempo total médio (s)	147	Tempo total médio (s)	128,5	Tempo total médio (s)	110

Apêndice E - Quadro resumo dos resultados obtidos

Hélice v8/p350				Hélice v19/p4000				Hélice v30/p4000			
Carga (Kg)	Regime	Tempo (s)	Potência (W)	Carga (Kg)	Regime	Tempo (s)	Potência (W)	Carga (Kg)	Regime	Tempo (s)	Potência (W)
Inicial	1	216,167	156,667	Inicial	1	200	158,75	Inicial	1	214,167	140,333
	2	158,333	364,667		2	159,25	355,25		2	164,667	358,333
	3	127,667	853,333		3	132,25	861,25		3	119	1395,833
	4	103,833	2445		4	101,5	2319		4	114,667	1557,833
10	1	203,333	152,333	10	1	199,5	157,75	10	3'	127,333	841,667
	2	157,167	353		2	159,5	341		1	211,667	141,667
	3	130,333	840		3	129,5	854,5		2	175	332,167
	4	103,833	2143,333		4	106	1927,5		3	128,833	853,833
20	1	215,833	150,667	20	1	202,5	155,5	20	4	112	1575
	2	157,5	359,167		2	156	316,75		1	223	140,333
	3	129,75	833,75		3	126	835		2	154,167	354,5
	4	100,5	2370		4	99	2347,5		3	129,833	867,833
30	1	209,667	156	30	1	195,167	156	30	4	111,5	1580
	2	160,833	356		2	151	337,5		1	182,833	144,333
	3	121,75	862,5		3	128	845		2	147	360,167
	4	104	2415		4	97	2432,5		3	128,5	847,167
					2'	147,75	354,25	4	110	1570,167	
					3'	125,5	816,5				

Apêndice F - Condições Meteorológicas (V8/p350)

Condições atmosféricas				
Dia	Teste	Hora do teste	Altura de maré (m) (calculada)	Maré a encher (1) ou vaziar (0)
04-05-2015	a/I	1108-1130	1,15	1
04-05-2015	a/II	1320-1334	2,5	1
04-05-2015	a/III	1300-1308	2,32	1
04-05-2015	a/IV	1048-1058	1	1
03-05-2015	b/I	1022-1033	1,1	1
03-05-2015	b/II	1617-1630	3,72	0
03-05-2015	b/III	1600-1610	3,8	0
03-05-2015	b/IV	1543-1553	3,8	1
04-05-2015	c/I	1345-1400	2,77	1
04-05-2015	c/II	1410-1438	3,05	1
12-05-2015	c/III	1037-1042	3,2	1
12-05-2015	c/IV	1048	3,17	1
04-05-2015	d/I	1440-1509	3,4	1
04-05-2015	d/II	1510-1525	3,57	1
12-05-2015	d/III	1020-1024	3,15	1
12-05-2015	d/IV	1030	3,17	1

Legenda:

I II III IV	Regime de motor
----------------------	------------------------

a	Condição de carga normal
b	Condição de carga normal + 10 kg
c	Condição de carga normal + 20 kg
d	Condição de carga normal + 30 kg

Apêndice G - Condições Meteorológicas (V19/p400)

Condições atmosféricas				
Dia	Teste	Hora do teste	Altura de maré (m) (calculada)	Maré a encher (1) ou vaziar (0)
11-05-2015	a/I	1728-1737	1,9	1
11-05-2015	a/II	1746-1752	2,35	1
11-05-2015	a/III	1800-1830	2,25	1
12-05-2015	a/IV	1110	3,17	0
11-05-2015	b/I	1610-1618	1,5	1
11-05-2015	b/II	1626-1632	1,55	1
11-05-2015	b/III	1640-1644	1,6	1
11-05-2015	b/IV	1652	1,65	1
11-05-2015	c/I	1515-1525	1,4	1
11-05-2015	c/II	1534-1540	1,42	1
11-05-2015	c/III	1545-1550	1,45	1
11-05-2015	c/IV	1600	1,47	1
05-05-2015	d/I	1900-1921	2,95	0
05-05-2015	d/II	1930	2,65	0
05-05-2015	d/III	1850	3,2	0
05-05-2015	d/IV	1845	3,22	0
11-05-2015	d/II'	1438-1444	1,45	0
11-05-2015	d/III'	1500-1508	1,42	0

Legenda:

I II III IV	Regime de motor
----------------------	------------------------

a	Condição de carga normal
b	Condição de carga normal + 10 kg
c	Condição de carga normal + 20 kg
d	Condição de carga normal + 30 kg

Apêndice H - Condições Meteorológicas (V30/p4000)

Condições atmosféricas				
Dia	Teste	Hora do teste	Altura de maré (m) (calculada)	Maré a encher (1) ou vaziar (0)
30-04-2015	a/I	1115-1134	2,65	1
30-04-2015	a/II	1052-1106	2,45	1
30-04-2015	a/III'	1039-1045	2,3	1
02-05-2015	a/III	1450-1502	3,65	1
30-04-2015	a/IV	1000-1025	2,025	1
30-04-2015	b/I	1149-1200	3,1	1
30-04-2015	b/II	1530-1548	2,875	0
02-05-2015	b/III	1545-1555	3,65	0
03-05-2015	b/IV	1510-1520	3,7	1
02-05-2015	c/I	1600-1620	3,6	0
02-05-2015	c/II	1512-1525	3,7	1
02-05-2015	c/III	1220-1230	2,65	1
02-05-2015	c/IV	1200-1210	2,4	1
02-05-2015	d/I	1035-1103	1,52	1
02-05-2015	d/II	1109-1122	1,85	1
02-05-2015	d/III	1130-1145	2,1	1
02-05-2015	d/IV	1018-1035	1,4	1

Legenda:

I	Regime de motor
II	
III	
IV	

a	Condição de carga normal
b	Condição de carga normal + 10 kg
c	Condição de carga normal + 20 kg
d	Condição de carga normal + 30 kg

Apêndice I - Dados Normalizados

	Carga inicial (v8/p350)				Carga 10kg (v8/p350)				Carga 20kg (v8/p350)				Carga 30kg (v8/p350)			
Potência	-0,985825861	-0,80532	-0,38126	1	-0,98959	-0,81545	-0,39283	0,738212	-0,99103	-0,8101	-0,39825	0,934915	-0,9864	-0,81284	-0,3733	0,973966
Passo	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Diâmetro	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Carga	-1	-1	-1	-1	-0,33333	-0,33333	-0,33333	-0,33333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	1	1	1	1
Estado da Maré	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Maré calculada	-0,911364462	0,151894	0,010126	-1,0295	-0,95074	1,112765	1,175773	1,175773	0,364546	0,585073	0,703213	0,679585	0,860733	0,994625	0,663833	0,679585
Tempo	1,802364904	0,263444	-0,55258	-1,18678	1,460875	0,232399	-0,48162	-1,18678	1,793495	0,241269	-0,49715	-1,27548	1,629403	0,329968	-0,71002	-1,18234

	Carga Inicial (v19/p4000)				Carga 10kg (v19/p4000)				Carga 20kg (v19/p4000)				Carga 30kg (v19/p4000)					
Potência	-0,984017935	-0,81349	-0,37439	0,890657	-0,98489	-0,82586	-0,38024	0,550911	-0,98684	-0,8469	-0,39717	0,915389	-0,9864	-0,8289	-0,38849	0,989152	-0,81436	-0,41322
Passo	-0,284436494	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444	-0,28444
Diâmetro	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Carga	-1	-1	-1	-1	-0,33333	-0,33333	-0,33333	-0,33333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	1	1	1	1	1	1
Estado da Maré	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Maré calculada	-0,320665274	0,033754	-0,04501	0,679585	-0,6357	-0,59632	-0,55694	-0,51757	-0,71446	-0,69871	-0,67508	-0,65933	0,506314	0,270034	0,703213	0,718965	-0,67508	-0,69871
Tempo	1,372176537	0,287836	-0,43062	-1,24887	1,358872	0,294488	-0,5038	-1,12912	1,438701	0,201355	-0,59693	-1,31539	1,243564	0,068307	-0,54371	-1,36861	-0,01817	-0,61024

~

	Carga Inicial (v30/p4000)					Carga 10kg (v30/p4000)				Carga 20kg (v30/p4000)				Carga 30kg (v30/p4000)			
Potência	-1	-0,81082	0,089528	0,230113	-0,39138	-0,99884	-0,83353	-0,38082	0,24501	-1	-0,81415	-0,36867	0,249349	-0,99653	-0,80923	-0,38661	0,240816
Passo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Diâmetro	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Carga	-1	-1	-1	-1	-1	-0,33333	-0,33333	-0,33333	-0,33333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	1	1	1	1
Estado da Maré	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1
Maré calculada	0,270033915	0,112514	-0,00563	-0,22222	1,057633	0,624453	0,447244	1,057633	1,097013	1,018253	1,097013	0,270034	0,073134	-0,61995	-0,36005	-0,16315	-0,71446
Tempo	1,749145724	0,431971	-0,7832	-0,89851	-0,56145	1,682622	0,706937	-0,52154	-0,96947	1,984197	0,15257	-0,49493	-0,98277	0,915379	-0,03813	-0,53041	-1,02269

Apêndice J - Código do programa utilizado para testes de configurações da rede

```
inputs=xlsread('Título do ficheiro da folha excel','Folha do ficheiro
excel onde se encontram os inputs');
targets=xlsread('Título do ficheiro da folha excel','Folha do ficheiro
excel onde se encontram os targets');
tranf={'tansig', 'logsig', 'purelin'};
tranfs={'logsig', 'purelin'};
treino={'trainlm', 'trainbfg', 'trainrp'};
n=1;
tc=1;
at=1;
for n=1:20
    for tc=1:3
        for ts=1:2
            for at=1:3

net=newff(inputs,targets,n,[tranf(tc),tranfs(ts)],treino{at});
    net.divideFcn = 'dividerand';
    net.divideMode = 'sample';
    net.divideParam.trainRatio = 70/100;
    net.divideParam.valRatio = 15/100;
    net.divideParam.testRatio = 15/100;
    net=init(net);
    [~,tr]=train(net,inputs,targets);
    erro(n,tc,ts,at,1)=tr.best_perf;
    erro(n,tc,ts,at,2)=tr.best_vperf;
    erro(n,tc,ts,at,3)=tr.best_tperf;
            end
        end
    end
end
end
```


Apêndice K - Código do programa para achar configurações de rede com menor erro

```
load('erro.mat');
minimo=10;
contador=0; errofinal=zeros(1,5);
    for tc=1:3
        for ts=1:2
            for at=1:3
                contador=contador+1;
                [a,b]=min(squeeze(erro(:,tc,ts,at,:)));
                errofinal(contador,:)=[a(3) b(3) tc ts at];
            end
        end
    end
end
```


Apêndice L - Quadro erros para treino da rede com configurações até 150 neurónios

Erro de teste	Nº de neurónios	Função transferência da camada intermédia	Função transferência da camada de saída	Algoritmo de treino
0,108334752	2	1	1	1
0,398552315	78	1	1	2
0,437435515	123	1	1	3
0,024507279	8	1	2	1
0,034481535	1	1	2	2
0,07799886	24	1	2	3
0,205981192	98	2	1	1
0,41246076	147	2	1	2
0,235835601	97	2	1	3
0,02266601	1	2	2	1
0,021647692	4	2	2	2
0,132478938	4	2	2	3
0,109405574	41	3	1	1
0,236141217	40	3	1	2
0,433797977	8	3	1	3
0,120371289	115	3	2	1
0,086976176	61	3	2	2
0,092127502	150	3	2	3

Apêndice M - Três melhores configurações de redes até 10 neurónios, por experiência realizada

Exp. 1	Erro de teste	Erro de validação	Nº de neurónios	Função transferência de camada	Função transferência da camada de saída	Algoritmo de treino	Exp. 2	Erro de teste	Erro de validação	Nº de neurónios	Função transferência de camada	Função transferência da camada de saída	Algoritmo de treino
	0,021678731	0,019153354	2	2	2	1		0,014921618	0,041280781	5	2	2	2
	0,026874285	0,040124267	5	1	2	1		0,031931023	0,010391309	4	2	2	1
	0,043420491	0,049618887	2	2	2	2		0,036812585	0,031394937	2	1	2	2

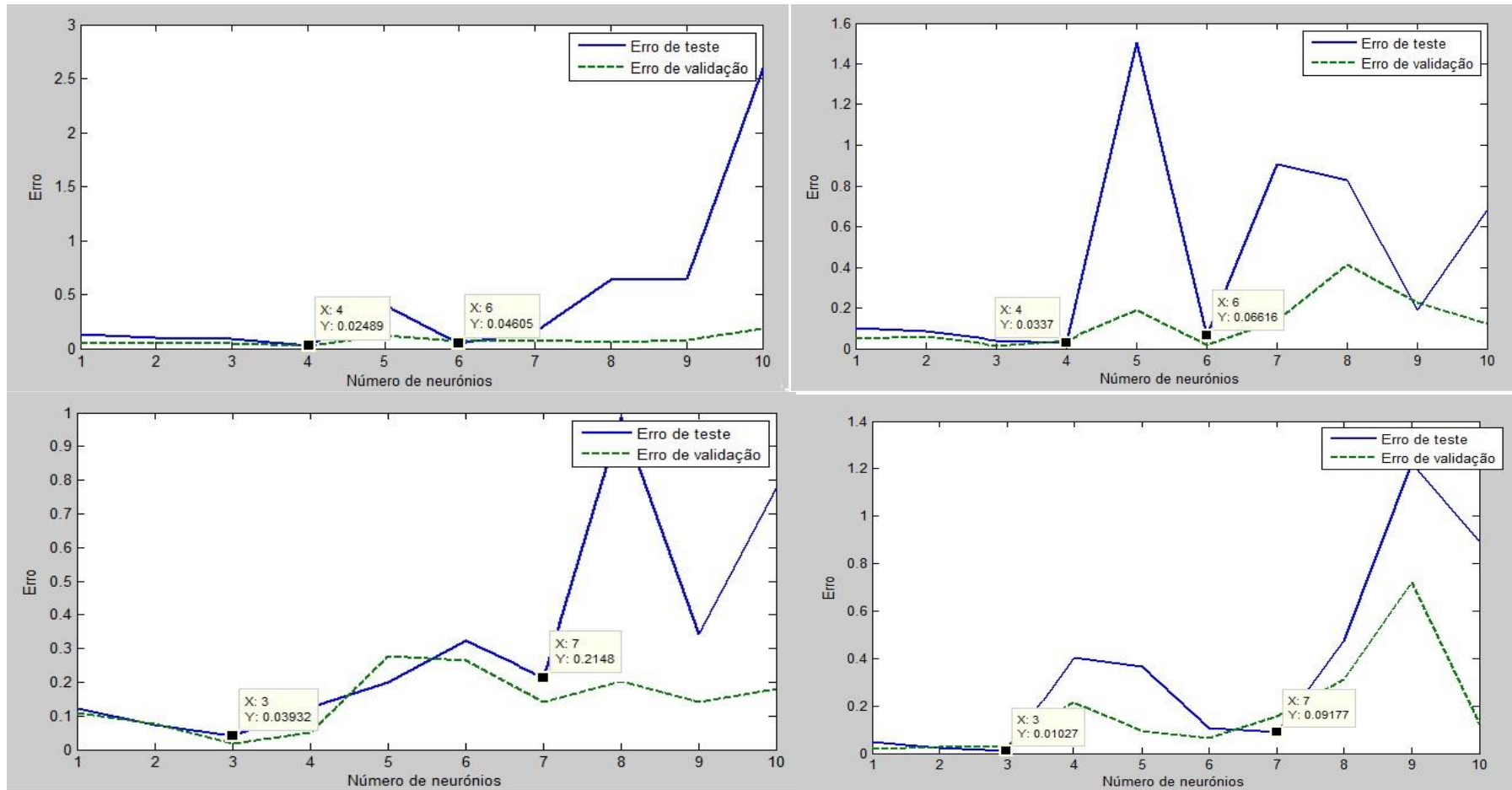
Exp. 3	Erro de teste	Erro de validação	Nº de neurónios	Função transferência de camada	Função transferência da camada de saída	Algoritmo de treino	Exp. 4	Erro de teste	Erro de validação	Nº de neurónios	Função transferência de camada	Função transferência da camada de saída	Algoritmo de treino
	0,009607466	0,022573685	3	2	2	1		0,021245883	0,024349492	6	1	2	1
	0,042485538	0,037555258	5	1	2	2		0,074681068	0,021796718	7	2	2	1
	0,044406824	0,032023512	9	1	2	1		0,091537066	0,195103914	3	2	2	3

Exp. 5	Erro de teste	Erro de validação	Nº de neurónios	Função transferência de camada	Função transferência da camada de saída	Algoritmo de treino	Exp. 6	Erro de teste	Erro de validação	Nº de neurónios	Função transferência de camada	Função transferência da camada de saída	Algoritmo de treino
	0,014172479	0,047125102	3	2	2	1		0,013290352	0,019548804	3	2	2	1
	0,039403297	0,047574283	3	1	2	2		0,030536357	0,023159846	2	2	2	2
	0,049279049	0,113703315	3	2	2	3		0,0359022	0,038237285	3	1	2	1

Apêndice N - Resultados das experiências com configurações vencedoras

		Configuração 1 (3221)	Configuração 2 (6121)	Configuração 3 (2221)	Configuração 4 (5222)
Experiência 1	Erro de teste	0,0016	0,0081	0,0023	0,0092
	Erro de validação	0,0925	0,0266	0,0121	0,0313
Experiência 2	Erro de teste	0,0025	0,02	0,0027	
	Erro de validação	0,0059	0,0202	0,0361	
Experiência 3	Erro de teste	0,0063		0,0044	
	Erro de validação	0,0117		0,0062	

Apêndice O - Gráfico da evolução do erro em função do número de neurónios



Apêndice P - Comparação entre erros obtidos entre configuração vencedora com 3 e 4 neurónios

		Configuração 1 (3221)	Configuração 2 (4221)
Experiência 1	Erro de teste	0,0016	0,0014
	Erro de validação	0,0925	0,0479
Experiência 2	Erro de teste	0,002	0,022
	Erro de validação	0,0265	0,0533
Experiência 3	Erro de teste	0,0025	0,0023
	Erro de validação	0,0059	0,0145
Experiência 4	Erro de teste	0,0026	0,0024
	Erro de validação	0,0324	0,0345
Experiência 5	Erro de teste	0,0027	0,0025
	Erro de validação	0,0481	0,0595

Apêndice Q - Escolha da melhor arquitetura de rede

	Valores obtido									
	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Dados 6	Dados 7	Dados 8	Dados 9	Erro
Arquitetura 1	1,6993013445	-0,534893460	-1,279199032	-0,533129970	0,108121062	1,25450208	-0,944523124	0,248863709	0,940910098	0,00859
Arquitetura 2	1,6849364922	-0,548453503	-1,206819590	-0,487831241	0,259547157	1,28351244	-1,007317523	0,216215281	1,083736434	0,00633
Arquitetura 3	1,6965110458	-0,673680301	-1,206244423	-0,564088388	0,246328089	1,24615795	-0,970043441	0,204925173	1,020837192	0,00855
Arquitetura 4	1,469526434	-0,517727384	-1,349250485	-0,536783231	0,310214311	1,23790088	-0,974141391	0,16472668	0,913621537	0,01675
Arquitetura 5	1,7243285001	-0,584833598	-1,294056929	-0,529763014	0,267133471	1,1186906	-0,970371424	0,258327491	1,033103683	0,00861
Arquitetura 6	1,7003774643	-0,570227433	-1,170555493	-0,483781506	0,281222384	1,31672109	-0,905569192	0,23477498	1,02814967	0,00531
Arquitetura 7	1,5039688280	-0,599364159	-1,262770999	-0,567785518	0,198150000	1,24029013	-1,003669595	0,148529816	0,980969573	0,01551
Arquitetura 8	1,7736859867	-0,570766260	-1,210657471	-0,476981416	0,298770740	1,23486829	-0,960753796	0,183042868	1,245198078	0,01323
Arquitetura 9	1,5646310228	-0,569092716	-1,350631830	-0,395222330	0,230541837	1,15358074	-0,869761238	0,255554366	1,241344694	0,02558
Valor expectável	1,802364904	-0,497147138	-1,182344072	-0,430623164	0,294488155	1,24356352	-0,969467355	0,152570343	0,915378581	

	Arquitetura 1	Arquitetura 2	Arquitetura 3	Arquitetura 4	Arquitetura 5	Arquitetura 6	Arquitetura 7	Arquitetura 8	Arquitetura 9
Erro de teste obtido na fase de treino	0,0016	0,0025	0,0063	0,0134	0,0019	0,002	0,0026	0,0027	0,0027

Apêndice R - Pesos das variáveis de entrada

	Potência	Passo	Diâmetro	Carga	Estado da Maré	Maré calculada
Neurónio 1	10,11655	0,472	-0,278475	0,174	0,084422055	-0,26645308
Neurónio 2	-2,27597	0,074	-0,116065	-0,27	-0,17515441	0,066106006
Neurónio 3	-1,46036	1,701	5,485369	3,38	6,135024548	-3,900144393

Apêndice S - Melhores soluções geométricas com maré a encher

	Carga inicial			
	180 W	350 W	850 W	1550 W
Passo	15,59	15,59	10	10
Diâmetro	300	300	300	300
Tempo	185,9368	158,0352	127,0131	108,6139

	Carga 10kg			
	180 W	350 W	850 W	1550 W
Passo	15,59	15,59	10	10
Diâmetro	300	300	300	300
Tempo	181,9126	155,7687	127,9134	109,4367

	Carga 20kg			
	180 W	350 W	850 W	1550 W
Passo	15,59	15,59	10	10
Diâmetro	300	300	320	320
Tempo	177,2338	152,6372	125,9273	112,0963

	Carga 30kg			
	180 W	350 W	850 W	1550 W
Passo	15,59	15,59	10	10
Diâmetro	300	300	320	320
Tempo	172,4822	149,347	123,499	111,0742

Apêndice T - Melhores soluções geométricas com maré a vazar

	Carga inicial			
	180 W	350 W	850 W	1550 W
Passo	15,59	15,59	10	10
Diâmetro	300	300	320	320
Tempo	185,9614	155,9088	128,4447	109,431

	Carga 10kg			
	180 W	350 W	850 W	1550 W
Passo	15,59	15,59	10	10
Diâmetro	300	300	316	317
Tempo	181,2935	152,9678	126,2684	108,1329

	Carga 20kg			
	180 W	350 W	850 W	1550 W
Passo	15,59	15,59	10	10
Diâmetro	300	300	312	312
Tempo	176,6503	149,9579	124,1346	106,9697

	Carga 30kg			
	180 W	350 W	850 W	1550 W
Passo	15,59	15,59	10	10
Diâmetro	300	300	308	308
Tempo	172,2397	147,0499	122,0568	105,8975

Apêndice U - Testes das soluções geométricas obtidas com maré a encher

Carga inicial				
	Teste das soluções geométricas c/maré a encher		Melhor solução obtida c/maré a vazar	
	850 W	1550 W	850 W	1550 W
Passo	10	10	10	10
Diâmetro	300	300	320	320
Tempo	131,3740135	111,7481478	128,4447466	109,4309603

Carga 10kg				
	Teste das soluções geométricas c/maré a encher		Melhor solução obtida c/maré a vazar	
	850 W	1550 W	850 W	1550 W
Passo	10	10	10	10
Diâmetro	300	300	316	317
Tempo	128,5868873	109,7966941	126,2684257	108,1328606

Carga 20kg				
	Teste das soluções geométricas c/maré a encher		Melhor solução obtida c/maré a vazar	
	850 W	1550 W	850 W	1550 W
Passo	10	10	10	10
Diâmetro	320	320	312	312
Tempo	128,9448531	110,8692268	124,1346038	106,9696854

Carga 30kg				
	Teste das soluções geométricas c/maré a encher		Melhor solução obtida c/maré a vazar	
	850 W	1550 W	850 W	1550 W
Passo	10	10	10	10
Diâmetro	320	320	308	308
Tempo	127,9841518	112,5423823	122,0568029	105,8974814

Apêndice V – Testes das soluções geométricas obtidas com maré a vaziar

Carga inicial				
	Teste das soluções geométricas c/maré a vaziar		Melhor solução obtida c/maré a encher	
	850 W	1550 W	850 W	1550 W
Passo	10	10	10	10
Diâmetro	320	320	300	300
Tempo	131,2175046	114,6208508	127,0131265	108,613918

Carga 10kg				
	Teste das soluções geométricas c/maré a vaziar		Melhor solução obtida c/maré a encher	
	850 W	1550 W	850 W	1550 W
Passo	10	10	10	10
Diâmetro	316	317	300	300
Tempo	129,1212168	113,5158548	127,9134288	109,4367076

Carga 20kg				
	Teste das soluções geométricas c/maré a vaziar		Melhor solução obtida c/maré a encher	
	850 W	1550 W	850 W	1550 W
Passo	10	10	10	10
Diâmetro	312	312	320	320
Tempo	127,1075577	112,670148	125,9273207	112,096334

Carga 30kg				
	Teste das soluções geométricas c/maré a vaziar		Melhor solução obtida c/maré a encher	
	850 W	1550 W	850 W	1550 W
Passo	10	10	10	10
Diâmetro	308	308	320	320
Tempo	125,1865041	111,8345655	123,4989769	111,074219

Apêndice W – Resultados obtidos para os hélices testados

Carga inicial			
	v8/p350	v19/p4000	v30/p4000
180 W	216,2468	204,5072	207,59986
350 W	168,2607	162,67906	164,62917
850 W	131,374	132,05839	134,33697
1550 W	111,7481	112,35069	113,38907

Carga 10kg			
	v8/p350	v19/p4000	v30/p4000
180 W	210,3382	198,89843	203,97587
350 W	163,9708	158,93944	164,62917
850 W	128,5869	129,29657	134,87212
1550 W	109,7967	110,34315	115,74737

Carga 20kg			
	v8/p350	v19/p4000	v30/p4000
180 W	204,2956	193,22827	198,52274
350 W	159,6708	155,16462	161,15356
850 W	125,7859	126,50725	132,76076
1550 W	108,0402	108,53051	115,50295

Carga 30kg			
	v8/p350	v19/p4000	v30/p4000
180 W	198,153	187,53872	192,76134
350 W	155,3738	151,37741	157,321
850 W	123,0199	123,7468	130,10572
1550 W	106,4772	106,91624	114,20857