

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

GIOVANI SILVEIRA DE MAGALHÃES MARTINS

CONVERSÃO DO SISTEMA DE PROPULSÃO A COMBUSTÃO PARA ELÉTRICO EM
UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO VELEIRO

Joinville

2017

GIOVANI SILVEIRA DE MAGALHÃES MARTINS

CONVERSÃO DO SISTEMA DE PROPULSÃO A COMBUSTÃO PARA ELÉTRICO EM
UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO VELEIRO

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2017

GIOVANI SILVEIRA DE MAGALHÃES MARTINS

CONVERSÃO DO SISTEMA DE PROPULSÃO A COMBUSTÃO PARA ELÉTRICO EM
UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO VELEIRO

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de Novembro de 2017.

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Peres Calil
Coordenador de Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi
Presidente/Orientador

Prof. Eng. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro

Prof. Dr. Eng. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Membro

RESUMO

A presente monografia apresenta a conversão de um sistema de propulsão a diesel de um veleiro de 33 pés para um sistema de propulsão elétrica. A temática energética, diretamente relacionada à questão ambiental, é um dos principais fatores a estimular o desenvolvimento de embarcações elétricas. Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre o procedimento e as implicações para a conversão do sistema de propulsão de uma embarcação do tipo veleiro. A embarcação analisada atualmente utiliza um sistema de propulsão à combustão, a qual será convertida para um sistema elétrico. O trabalho se inicia com a caracterização da embarcação de estudo, seguido pela modelagem no programa Rhinoceros©. Em seguida, realizou-se a estimativa de resistência ao avanço para a embarcação e, conseqüentemente, a estimativa de potência requerida, a partir de duas abordagens: analítica (com auxílio da série DELFT) e fluidodinâmica computacional (com auxílio do software Star-CCM+). Com a potência de trabalho, selecionou-se o motor elétrico de indução trifásico de 15 kW, o qual se apresentou como melhor solução para esta aplicação. Respeitando as características de trabalho do motor, selecionou-se o banco de baterias de chumbo-ácido AGM que se apresentou mais vantajoso mediante análise via matriz AHP. Analisou-se o hélice propulsor que integra a embarcação atual, de forma a compará-lo com diferentes soluções, constatando que a mudança do mesmo não implicaria em vantagens que justificassem investimento em uma nova solução. Por fim, discorreu-se sobre os demais componentes que integram o sistema elétrico, de forma a perfazer a planta elétrica. Verificou-se que a mudança do sistema de propulsão pouco interferiu no equilíbrio longitudinal e transversal da embarcação, visto que ambos os sistemas apresentaram pesos semelhantes.

Palavras-chave: Veleiro. Resistência ao Avanço. Motor elétrico de indução trifásico. Chumbo-Ácido. Planta Elétrica.

ABSTRACT

This monograph presents the conversion of a diesel propulsion system to an electrical propulsion system from a 33-foot sailboat. The energy theme, which is directly related to environmental issues, is one of the main factors to stimulate an electrical ships development. This work presents the study about the procedure and implications to convert the propulsion system of a sailboat. The analyzed ship currently uses a combustion propulsion system, which will be converted to an electrical propulsion system. This work starts with the ship characterization, followed by a modelling using the Rhinoceros© software. Then, was made a progress resistance estimation, consequently, the estimate power required, by using two different approaches: Analytical (with DELFT series aid) and computational fluid dynamics (with Star-CCM+ software aid). With the work power, it was selected the 15kW three-phase induction electric engine, which presents the best solution for this application. Respecting the engine work characteristics, it was selected an AGM lead-acid battery bank, showing itself more advantageous according to an AHP matrix analyses. It was analyzed the propeller that integrates the current ship, in order to compare with different solutions, proving that any change would not implicate a justifiable investment in a new solution. At last, discoursed about the further components in the electrical system, in order to make the electrical plant. It was found that the propulsion system change have small interfered in the ship longitudinal and transverse equilibrium, since both systems presented similar weights.

Keywords: Sailboat. Resistance Progress. Three-phase induction electric engine. Lead-Acid. Electrical plant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Espiral de Projeto de um Veleiro	12
Figura 2 – Distribuição de pressão em um escoamento ideal.....	14
Figura 3 - Sistema de ondas gerado por um ponto de pressão em movimento.....	15
Figura 4 – Métodos para avaliação da Resistência em Navios.	15
Figura 5 – Plano de linhas do modelo pai da série Delft	16
Figura 6 – Plano de linhas do modelo para deslocamentos leves da série Delft	17
Figura 7 – Etapas da Análise CFD	20
Figura 8 – Acionamento Mecânico da Embarcação.....	21
Figura 9 – Sistemas de Propulsão	24
Figura 10 – Construção da célula eletroquímica	29
Figura 11 - Comparação de densidade de energia entre várias células da bateria.	31
Figura 12 – Elementos Constituintes das pás de um Hélice.....	32
Figura 13 – Diagrama de águas livres.....	34
Figura 14 – Exemplo de diagrama em águas livres da Série B.....	35
Figura 15 – Desenvolvimento do projeto	38
Figura 16 – Veleiro Ayty	41
Figura 17 – Aba Shape para alteração dos parâmetros do casco.....	42
Figura 18 – Parâmetros de Ajuste	43
Figura 19 – Forefoot Shape	43
Figura 20 – Deadrise/Flare e Bilge Tightness	44
Figura 21 – Ayty modelado no Rhinoceros©	45
Figura 22 – Potências Resultantes para os 3 casos analisados.....	48
Figura 23 – Domínio Computacional	50
Figura 24 – Malha Gerada no Casco (meia nau-popa)	51
Figura 25 – Malha Gerada no Casco (meia nau - proa).....	51
Figura 26 – Malha Gerada na linha da água (refino maior devido as ondas).....	52
Figura 27 – Visualização da linha da água	52
Figura 28 - Condições de Contorno do problema.....	53
Figura 29 – Potências resultante da análise CFD	55
Figura 30 – Comparação Série Delft (analítico) e Star-CCM (CFD)	56
Figura 31 – Ensaio Tacômetro.....	65
Figura 32 – Comparação Hélices aprovados no teste de Cavitação	67
Figura 33 – Diagrama Tração Elétrica Ayty	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites dos parâmetros utilizados na série Delft.....	17
Tabela 2 – Classificação das Potências	22
Tabela 3 – Classificação e Campo de Aplicação dos Motores Elétricos.....	26
Tabela 4 – Comparação entre os tipos de motores elétricos.....	27
Tabela 5 – Tecnologias de armazenamento de energia elétrica, mecânica e magnética.....	28
Tabela 6 – Tensão média da célula durante a descarga em várias baterias recarregáveis.....	31
Tabela 7 - Abrangência da Série B de Wageningen.....	35
Tabela 8 – Parâmetros ajustados no casco.....	44
Tabela 9 - Dimensões e características do Ayty modelado.	45
Tabela 10 – Parâmetros de variações de análise.....	46
Tabela 11 – Limites dos parâmetros utilizados na série Delft	47
Tabela 12 – Resultados de Potência oriundos da Série Delft	48
Tabela 13 – Dimensões do Domínio Computacional	50
Tabela 14 – Resultados da Análise CFD	55
Tabela 15 – Potência Requerida pelo Motor mediante considerações de eficiência.....	58
Tabela 16 – Potência Shannon x Estimada Ayty	59
Tabela 17 – Comparação entre as diversas baterias	62
Tabela 18 – Vantagens e desvantagens das diversas baterias.....	62
Tabela 19 – Matriz de Qualidade para Seleção da Eletroquímica.....	63
Tabela 20 – Variação dos parâmetros.	65
Tabela 21 – Resultados Ensaio Tacômetro	66
Tabela 22 – Parâmetros conhecidos para o hélice da embarcação Ayty	66
Tabela 23 – Estimativa LCG Propulsão a Diesel	70
Tabela 24 – Estimativa LCG Propulsão Elétrica.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD – Computer Aided Design

CFD – Computational Fluid Dynamics

DNV – Det Norske Veritas

IMO – International Maritime Organization

HSC – High Speed Craft

IACS – International Association of Classification Societies

ITTC – International Towing Tank Conference

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de projeto	[m ²]
A _e	Área expandida	[m ²]
A _o	Área inicial	[m ²]
A _w	Área molhada	[m ²]
A _{wl}	Área de linha d'água	[m ²]
B	Boca	[m]
BHP	Potência Motor	kW
B _{wl}	Boca Moldada	[m]
C	Capacidade de retenção de carga da célula	Ah
C _B	Coefficiente de bloco	
C _F	Coefficiente de Atrito	
C _p	Coefficiente prismático	[adm]
D	Pontal	[m]
D	Diâmetro da hélice	[mm]
DHP	Potência Entregue	kW
EHP	Potência Efetiva	kW
f	Frequência da rede	[Hz]
Fr	Número de Froude	
G	Aceleração da Gravidade	[m ² /s]
H	Calado de projeto	[m]
i	Corrente	[A]
J	Coefficiente de avanço	
K	Energia cinética turbulenta	[J]
K _Q	Coefficiente de binário	
K _T	Coefficiente de força propulsiva	
L	Comprimento da Embarcação	[m]
LCB	Posição do centro de empuxo longitudinal	[m]
LCG	Centro de gravidade longitudinal	[m]
L _{PP}	Comprimento entre perpendiculares	[m]
L _{wl}	Comprimento na linha d'água	[m]

m_c	Massa da embarcação	[t]
n	Rotação	RPM
η	Eficiência da hélice	[%]
N	Número de espiras efetivas da bobina	
n_H	eficiência do casco	[%]
n_r	Velocidade do rotor	[rpm]
n_{RR}	eficiência rotativa relativa	[%]
n_s	Velocidade Síncrona do campo girante	[rpm]
n_t	eficiência eixos	[%]
p	Número de polos	
$P(\text{HP})$	Potência	HP
$P(\text{kW})$	Potência	kW
P_D	Potência fornecida ao hélice	[kW]
P_E	Potência efetiva	[kW]
Q	Torque	
R_F	Resistência de Atrito	[N]
R_n	Número de Reynolds	
R_R	Resistência Residual	[N]
R_T	Resistência Total	[N]
s	Escorregamento	
SHP	Potência no eixo	kW
T	Força Propulsiva	[N]
t	Coefficiente de redução de força propulsiva	
THP	Potência de Empuxo	kW
$T_{\text{lb.ft}}$	Torque	lb.ft
$T_{\text{N.m}}$	Torque	N.m
V	Velocidade máxima da embarcação	Nós
V_a	Velocidade de Avanço	[m/s]
VCG	Centro de gravidade transversal	[m]
Z	Número de pás da hélice	adm
β	Ângulo de <i>deadrise</i>	Graus
Δ	Deslocamento	[t]
ε	Dissipação da energia cinética turbulenta	[J/s]

ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
ν	Viscosidade cinemática do fluido	m/s
ω	Velocidade angular	[rad/s]
τ	Força Resultante na Bobina	[N]
ω_T	Fator de Esteira	
∇	Volume Deslocado	[m ³]
∇_s	Volume	[m ³]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. Objetivo geral	9
1.2. Objetivos específicos	10
1.3. Organização do Trabalho	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1. Veleiros	11
2.2. Projeto de embarcações	11
2.3. Resistência ao avanço	13
2.3.2. <i>Resistência de pressão viscosa</i>	13
2.3.3. <i>Resistência de ondas</i>	14
2.4. Estimativa da resistência ao avanço	15
2.4.1. <i>Série Delft</i>	16
2.4.2. <i>Análise Fluidodinâmica Computacional</i>	19
2.4.3. <i>Potência do Motor</i>	21
2.5. Instalação Propulsora	23
2.6. Motores Elétricos	24
2.7. Baterias	27
2.8. Propulsor	32
3. METODOLOGIA	38
4. ESTUDO DE CASO.....	40
4.1. Embarcação escolhida para análise	40
4.2. Modelagem da embarcação	41
4.3. Série Delft	46
4.4. Star-CCM	49
4.4.1. <i>Geometria</i>	49
4.4.2. <i>Malha</i>	50
4.4.3. <i>Condições de Contorno</i>	52
4.4.4. <i>Modelos Físicos</i>	53
4.4.5. <i>Resultados</i>	54
4.5. Comparação Resistência	55
4.6. Seleção Motor	57
4.7. Seleção Bateria	60
4.8. Seleção do Hélice Propulsor	64
4.9. Planta Elétrica	67

4.10. Pesos e Centros	69
5. CONCLUSÃO	72
REFERÊNCIAS	74
APENDICE A.....	78
APENDICE B.....	80
APENDICE C	81
APENDICE D	91
D.1 Chumbo-Ácido.....	91
D.2 Níquel-Cádmio.....	93
D.3 Níquel-Hidreto Metálico.....	94
D.4 Lítio-Ion	94
D.5 Lítio-Polímero	96
D.6 Sódio.....	96
APENDICE E.....	97
APENDICE F.....	99
APENDICE G	100
APENDICE H	104
APENDICE I.....	105
APENDICE J	106
ANEXO A	107

1. INTRODUÇÃO

No início do século XX, os veículos elétricos representavam uma parcela significativa, cerca de 20%, do mercado norte americano. Os menores níveis de ruídos, a ausência de vibrações e a inexistência de marchas eram as principais vantagens desses veículos. Porém, a crescente disponibilidade de derivados de petróleo a baixo custo e a legislação ambiental complacente, aliadas a um estágio primitivo referente a tecnologia e capacidade das baterias, foram fundamentais para o fracasso dos veículos elétricos. (CASTRO, FERREIRA, 2010).

Contudo, no início do século XXI, o setor petrolífero apresentou diminuição percentual de 3% ao ano para a produção do petróleo, resultando em um aumento drástico do preço do barril. Além disso, os efeitos causados pela queima deste tipo de combustível têm causado danos que podem se tornar irreversíveis ao meio ambiente. Estudos anteriores (BERMANN, 2008) indicam um aumento anual da emissão de gases causadores do efeito estufa. Tais emissões podem, potencialmente, desencadear uma crise ambiental em escala global sem precedentes. Esta perspectiva, aliada a volatilidade do mercado do petróleo e ao desenvolvimento tecnológico das baterias, permitiu que o veículo elétrico volta-se a figurar como uma alternativa cada vez mais atrativa que as representadas por veículos a combustão.

A temática energética, diretamente relacionada à questão ambiental, é um dos principais fatores a estimular o desenvolvimento de veículos elétricos. A Agencia Internacional de Energia (2009), em seu cenário de referência, projeta um crescimento médio anual da demanda mundial de energia de 1,5% entre 2007 e 2030, ao passo que, no mesmo período, a oferta de petróleo deve ter expansão média anual de 1,0%. Em termos acumulados, o aumento da demanda energética será de 40,7% contra 25,7% da oferta de petróleo. Essas projeções apontam a necessidade de desaceleração do crescimento da demanda por petróleo.

O setor de transporte, consome de cerca de 61,3% desse combustível fóssil, sendo responsável por ditar a evolução de sua demanda. A dependência dos meios de transporte é uma fonte de vulnerabilidade das economias nacionais de países importadores de petróleo.

No período de 2010 a 2013, mais de 17 mil carros elétricos foram vendidos na França, representando uma participação de quase 5,4% no mercado automotivo europeu. O segundo lugar foi para a Noruega, onde quase 14 mil veículos elétricos (carros de passageiros e veículos

de entrega) foram vendidos nesse período. Além disso, esses países têm ônibus com unidades elétricas. Nos próximos anos, esse número tende a aumentar expressivamente. Isto é devido às políticas desses países e medidas para reduzir a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Por exemplo, a Noruega pretende atingir o número de 50 mil veículos elétricos em 2017. (LAPKO, 2016).

Nesta perspectiva, os motores elétricos estão se tornando cada vez mais valorizados por construtores e usuários de pequenas embarcações de recreio. Pela própria natureza do velejador, a opção por um motor elétrico agrada mais que um motor a combustão, pelo fato da ausência de ruídos e vibrações, que oferece uma navegação livre de barulhos e tranquila.

A Europa passa por um processo chamado de “voltar para a água”, onde está se revitalizando regiões a beira-mar. Numerosos locais de jantar e centros culturais e de entretenimento que atraem turistas estão sendo construídos em áreas portuárias ou em outros lugares relacionados à indústria da náutica no passado. Este fator, aliado a políticas que restringem o tráfego de embarcações com motores de combustão de alta potência (devido ao ruído excessivo), está desencadeando um processo de investimento em yachts e veleiros elétricos por toda a União Europeia. (LAPKO, 2016).

O Brasil, por sua vez, possui cerca de 8.500 km de linha de costa, 35 mil km de vias internas navegáveis, é banhado por correntes oceânicas favoráveis à navegação, além de contar com um clima propício ao esporte e ao lazer náutico, apresentando um dos maiores potenciais de desenvolvimento do turismo náutico do mundo. (Ministério do Turismo, 2010).

Visto isto, a proposta para o presente trabalho é realizar a integração casco-hélice-motor de um veleiro de 33 pés visando a troca do sistema de propulsão a combustão usual para um sistema de propulsão elétrico.

Para avaliação do novo sistema elétrico, faz-se necessário a determinação precisa da resistência ao avanço da embarcação. Desta forma, será feita uma análise rigorosa referente a esta etapa de projeto, utilizando tanto simulação numérica em Computational Fluid Dynamics (CFD) quanto análise empírica com auxílio da série Delft. Por fim, analisa-se a influência que a mudança causará no equilíbrio de pesos da embarcação.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um estudo para a conversão do sistema de propulsão a combustão de um veleiro de 33 pés para um sistema de propulsão elétrico.

1.2. Objetivos específicos

No andamento deste trabalho propõe-se como objetivos específicos:

- Entender a instalação propulsora de uma embarcação com motorização elétrica;
- Realizar a análise da resistência ao avanço da embarcação por diferentes métodos;
- Caracterizar a nova proposta de motorização elétrica para o veleiro de 33 pés, estabelecendo os principais equipamentos que o compõe;
- Selecionar e dimensionar o banco de baterias adequado ao sistema;
- Verificar a eficiência do hélice presente na embarcação e possíveis mudanças relativas a este;
- Avaliar o impacto da mudança de motorização no equilíbrio da embarcação.

1.3. Organização do Trabalho

Esta monografia descreve o desenvolvimento do trabalho realizado ao longo do período de aproximadamente 12 meses, sendo estruturada em 5 capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução: Breve introdução, apresentando a motivação e a problemática analisada;
- Capítulo 2 – Fundamentação teórica: principais conceitos são apresentados para o pleno entendimento do estudo, apresentando os principais trabalhos na área e abordando a temática dos 4 estudos que foram escolhidos para reprodução e análise;
- Capítulo 3 – Metodologia: apresenta-se os métodos e ferramentas aplicados nos 4 estudos realizados;
- Capítulo 4 – Estudo de caso: são apresentados e discutidos os resultados obtidos, apresentando-se com maior detalhamento as etapas descritas na metodologia, especificando configurações adotadas e justificativas das tomadas de decisão.
- Capítulo 5 – Conclusão: a partir dos resultados levantados, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção introduz o embasamento teórico utilizado neste trabalho. Serão apresentados os conceitos fundamentais sobre Veleiros, Projetos de Embarcações, Resistência ao Avanço e análise CFD, motores elétricos, baterias e hélices.

2.1. Veleiros

Um veleiro (ou barco a vela) é um barco propellido parcial ou totalmente por velas. De acordo com Larsson e Eliasson (2000), os veleiros podem ser divididos em duas categorias: competição e cruzeiro. A primeira, é subdividida de em classes dependentes do tamanho do veleiro, número de tripulantes, além da dimensão e disposição da vela. Os veleiros de cruzeiro, por sua vez, são definidos diretamente pela capacidade de cruzar longas distâncias, priorizando requisitos como segurança, estabilidade, desempenho e conforto.

2.2. Projeto de embarcações

Para conceituação do projeto de uma embarcação, inicialmente, deve estar clara a definição de projeto. Projeto é uma atividade em que o homem planeja, trabalhando sempre com o futuro, com o vir a ser. É o ato em que imagina, para um problema real, uma solução ainda não existente, presente inteiramente no plano das ideias. Portanto, a essência da atividade de projetar está na relação entre o problema de projeto, que expressa a necessidade material de um navio ou de qualquer outro objeto de estudo, e o fluxo de ideias desencadeado para encontrar uma solução. (AMORIM, 1997).

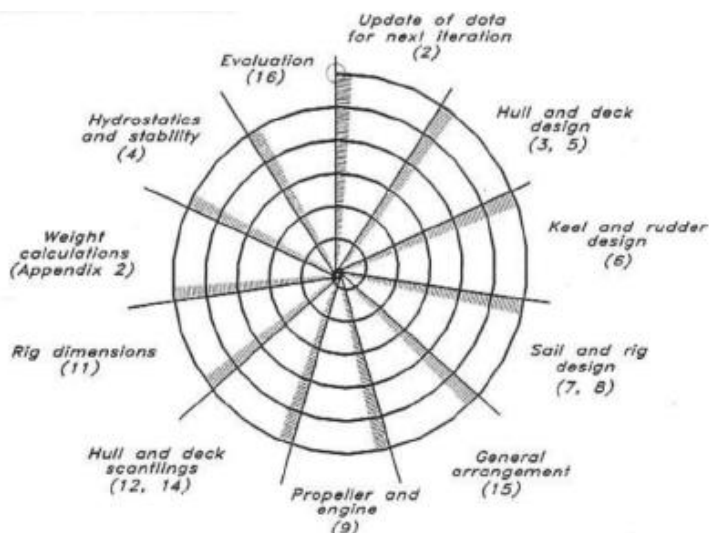
O projeto do navio é a atividade intelectual de conceber ideias para resolver problemas de projeto que admitam como solução uma embarcação. Uma teoria de projeto do navio deve buscar entender, articular e sistematizar o processo que produziu as ideias que levaram ao projeto.

Durante a década de cinquenta o mundo passava por um processo de reafirmação da ciência e da racionalidade científica, associadas ao padrão do mecanicismo clássico. No contexto da época, ser racional estava intimamente ligado a ser científico, o que para um

engenheiro significava também ser matemático e objetivo. O projeto por navios semelhantes, cuja estrutura estava atada a tradição e ao subjetivismo, não poderia parecer racional. Desta forma, iniciou-se a sistematização do processo de projeto com o objetivo de racionalizar esta abordagem, o que foi feito através de uma nova alternativa conhecida como espiral de projeto. (AMORIM, 1997).

Em 1959, J. Harvey Evans entrou para a história da arquitetura naval por sintetizar todos os conceitos fundamentais para o processo de projeto do navio em uma representação iconográfica denominada espiral de projeto (AMORIM, 1997). O princípio da espiral de Evans é a abordagem do processo de projeto de forma sequencial e iterativa. O modelo de espiral aplicado para veleiros é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Espiral de Projeto de um Veleiro



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

Desta forma, realiza-se o projeto a partir dos passos pré-definidos na espiral. Refere-se a uma abordagem minuciosa e eficiente, visto que a cada volta na espiral retifica-se cada elemento que a constitui.

A integração casco-hélice-motor, enfoque desta monografia, representa essencialmente o item (9) da espiral, motor e hélice. Para isto, inicia-se com a estimativa da resistência ao avanço, para posterior seleção dos elementos que constituem a motorização elétrica da embarcação, e por fim, analisa-se a melhor solução de hélice propulsor. Visto que a troca do sistema propulsivo pode impactar alterações na estabilidade, referente ao item (4) da espiral, este será abordado de forma sucinta para avaliar possíveis alterações no equilíbrio da embarcação.

2.3. Resistência ao avanço

Um navio deve ser construído para se mover da forma mais eficiente possível, ainda mais quando se pensa em sustentabilidade. Para isso, deve-se projetar o casco e o propulsor de forma que gere a menor resistência sem deixar de atender aos requisitos de projeto. (SMIRDELE, 2016).

A resistência ao avanço representa a força necessária para movimentação do navio a uma determinada velocidade em águas tranquilas (TRINDADE, 2012). De acordo com Bertram (2000), a resistência ao avanço pode ser dividida em componentes: Resistência de Fricção (Atrito), Resistência de Pressão Viscosa e Resistência de Ondas, as quais interagem entre si.

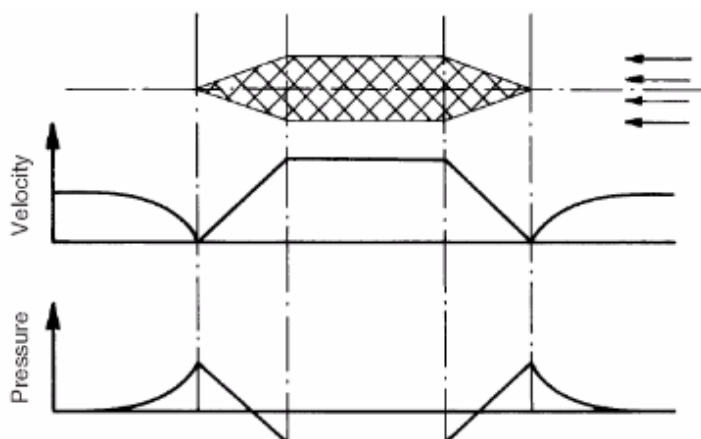
2.3.1. Resistência de fricção (atrito)

Em razão da condição de não escorregamento de fluidos viscosos sobre superfícies sólidas, as partículas do fluido próximas ao casco tendem a adquirir a sua velocidade. À medida que a distância entre o fluido e o casco aumenta, a influência do casco sobre o fluido diminui, resultando na diminuição da velocidade do fluido até praticamente zero. A zona intermediária entre o fluido estagnado e o escoamento uniforme é definida como camada limite. As alterações de velocidade nesta zona resultam em trocas de quantidade de movimento, gerando perdas de energia por atrito. (TRINDADE, 2012).

2.3.2. Resistência de pressão viscosa

Em um escoamento ideal (Figura 2), a pressão exercida na popa do navio é igual a exercida na proa, gerando uma força resultante nula. Na prática, os efeitos viscosos reduzem a pressão exercida na popa do navio, gerando um gradiente de pressão ao longo da embarcação. Este gradiente resulta na resistência de pressão viscosa. (TRINDADE, 2012).

Figura 2 – Distribuição de pressão em um escoamento ideal



Fonte: Bertram (2000).

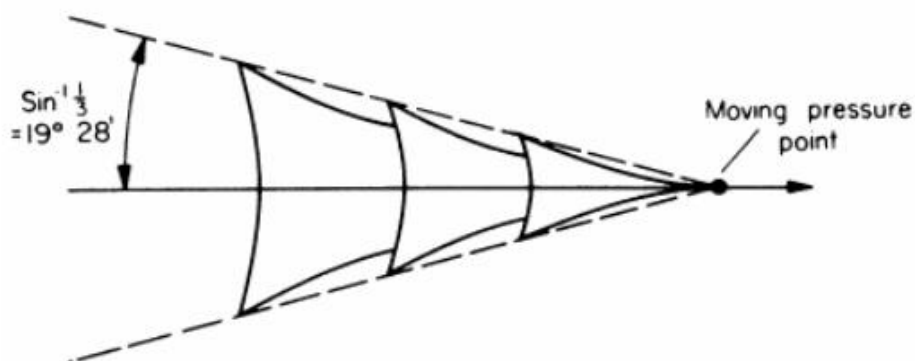
A maior parcela desta resistência é devido à geração de vórtices em regiões de descontinuidades do casco, onde partículas de água perdem sua capacidade de acompanhar o escoamento e acabam se descolando, gerando espaços entre o casco e o escoamento. Estes espaços são preenchidos por vórtices até o ponto de separação da camada limite. Outra parcela discutida por Trindade (2012) origina-se do aumento da espessura da camada limite potencializado por fenômenos de separação do escoamento.

2.3.3. Resistência de ondas

A resistência de ondas representa o somatório das forças geradas pela pressão do fluido na direção normal de todo o casco. Quando um corpo está navegando próximo a superfície, a variação de pressão causa ondas que alteram a distribuição de pressão sobre o casco, aumentando a força em alguns pontos e a diminuindo em outros. Entretanto, o efeito global da variação da pressão sobre o casco é uma resistência de magnitude semelhante a energia necessária para manter o sistema de ondas gerado (VAN MANEN; VAN OSSANEN, 1988).

Para um estudo hidrodinâmico, o navio pode ser considerado como um campo de pressão em movimento. Em 1887, Kelvin resolveu analiticamente o sistema de ondas gerado por um ponto de pressão, demonstrando que o padrão de ondas inclui sistemas divergentes e outro sistema cujas cristas de ondas se apresentam normais à direção do movimento, como representado na Figura 3 (TRINDADE, 2012).

Figura 3 - Sistema de ondas gerado por um ponto de pressão em movimento.

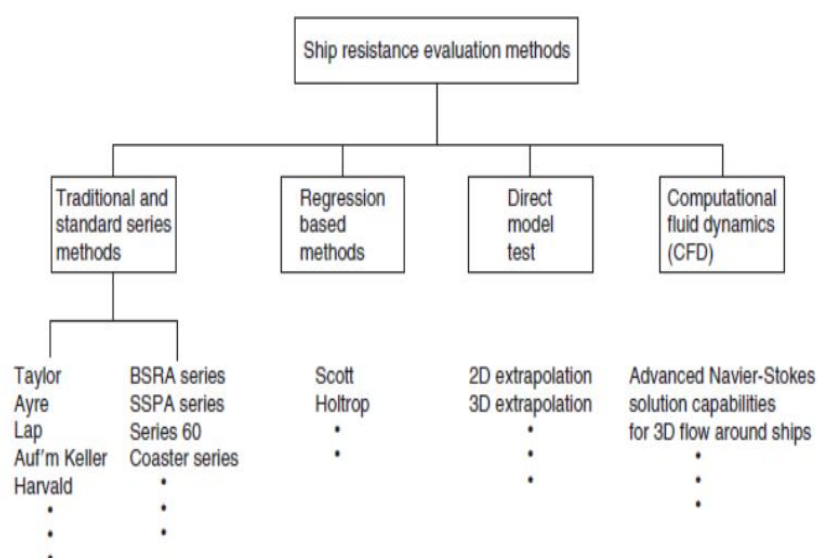


Fonte: Trindade (2012).

2.4. Estimativa da resistência ao avanço

Na literatura são descritas diversas maneiras de se estimar a resistência ao avanço de um casco. Molland (2011) listou os diversos métodos existentes para esta estimativa, entre eles: métodos tradicionais, métodos empíricos, extrapolações a partir de modelos físicos, além da fluidodinâmica computacional (CFD), como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Métodos para avaliação da Resistência em Navios.



Fonte: Molland (2011).

A escolha do método a ser utilizado depende diretamente dos recursos financeiros, do tempo e informações disponíveis ao projetista (SMIRDELE, 2016). Extrapolações a partir de modelos em escala reduzida e métodos mais avançados, como o CFD, demandam tecnologia, espaço e conhecimentos específicos para serem conduzidos de forma adequada, resultando em resultados mais precisos, porém, mais custosos (MOLLAND, 2011).

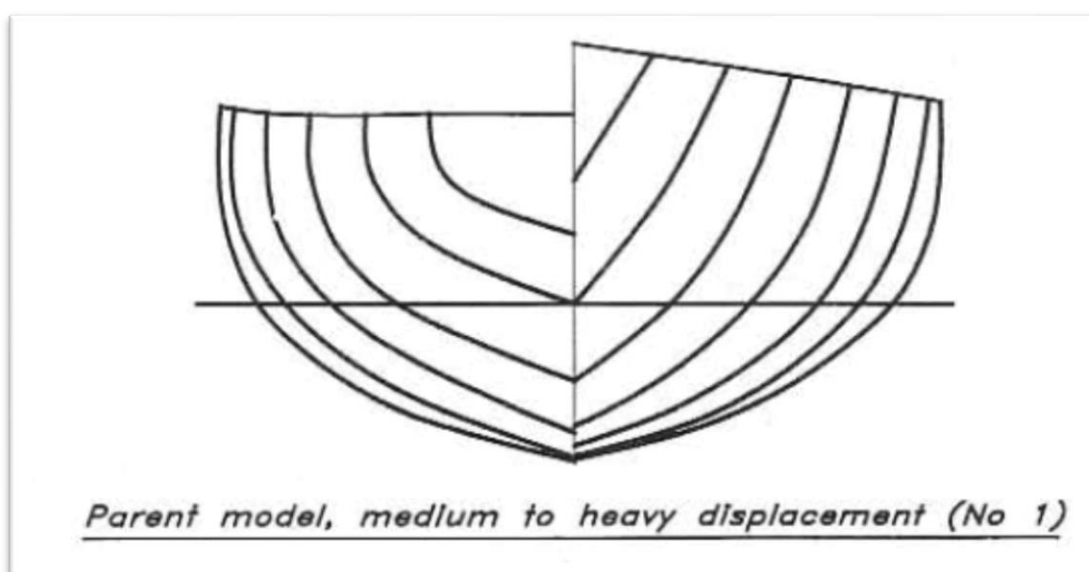
Desta forma, optou-se neste trabalho pela utilização de duas alternativas: através da série Delft e a partir da análise computacional dinâmica (Computational Fluid Dynamics – CFD), que serão descritos a seguir.

2.4.1. Série Delft

Este método empírico foi desenvolvido pelo professor J. Gerritsma e colaboradores na Delft University of Technology na Holanda, baseando-se em uma série extensa de testes com modelos de veleiros (LARSSON, 2000). A primeira série de testes foi executada durante a década de 1970 com a utilização de 22 modelos, representando uma variação sistemática de cinco diferentes parâmetros do casco: L_{wl}/B_{wl} , B_{wl}/T_c , C_p , LCB e L_{wl}/∇ .

Os cascos referentes aos 22 modelos foram feitos a partir das variações dos parâmetros do casco de um modelo pai, com deslocamento médio, projetado por Frans Maas, piloto de “Ocean Racers” (LARSSON, 2000). O plano de linhas deste modelo é mostrado na Figura 5.

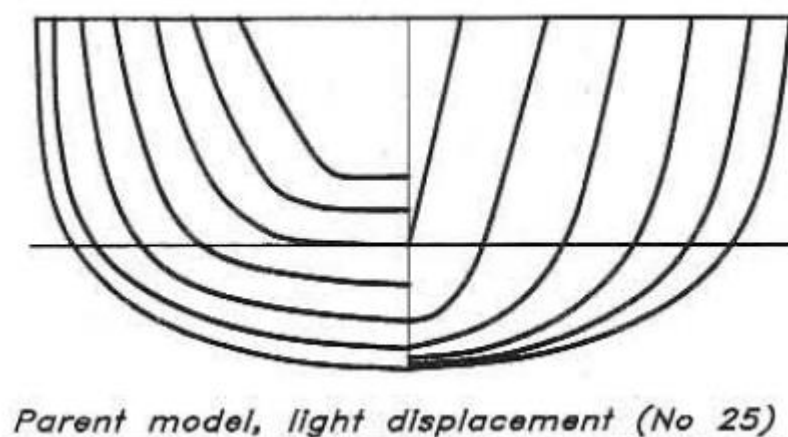
Figura 5 – Plano de linhas do modelo pai da série Delft



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

Durante os anos 80, tornou-se aparente, no entanto, que uma extensão da série para deslocamentos mais leves era necessária. Portanto, um novo modelo original foi projetado por Van de Stadt e colaboradores, conforme representado na Figura 6 (LARSSON, 2000).

Figura 6 – Plano de linhas do modelo para deslocamentos leves da série Delft



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

Desta forma, a partir destes dois cascos principais e da variação dos cinco parâmetros foram testados ao todo 39 modelos, obtendo-se um maior campo de aplicação para a série. As faixas referentes aos cinco parâmetros de abrangência da série, podem ser observadas na Tabela 1, onde o LCB representa uma porcentagem do L_{WL} medida a partir da meia nau.

Tabela 1 – Limites dos parâmetros utilizados na série Delft

Parâmetro	Limite Mínimo	Limite Máximo
L_{wl}/B_{wl}	2,76	5
B_{wl}/T_c	2,46	19,32
C_p	0,52	0,6
LCB	0	6
L_{wl}/∇	4,34	8,5

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000).

A partir dos testes nos 39 modelos, foi possível elaborar uma equação para o cálculo da resistência residual de veleiros. Nessa abordagem, os pesquisadores preferiram considerar

na resistência residual a parcela referente a resistência de ondas somada à parcela referente a resistência de pressão viscosa, visto que ambas dependem da forma tridimensional do casco.

Assim, a equação para a estimativa da resistência residual foi baseada na análise estatística dos 39 cascos. Para refinar os resultados, considerou-se modelos diferentes para diferentes faixas do número de Froude, de forma que para velocidades típicas de deslocamento originou-se um equacionamento, e outro para velocidades de semi-planeio (LARSSON, 2000).

O número de Froude (Fr) é um coeficiente adimensional constantemente utilizado para padronizar comparações relacionadas a resistência ao avanço de diferentes embarcações, uma vez que este estabelece uma razão entre a velocidade e a raiz do produto definido pelo comprimento da embarcação e a aceleração da gravidade, conforme a Equação 1.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (1)$$

Para faixa de número de Froude variando entre 0,125 e 0,450, obtém-se o equacionamento para resistência residual conforme a Equação 2. Para faixa do número de Froude variando entre 0,475 e 0,750, a resistência residual é obtida a partir da Equação 3.

$$\begin{aligned} R_R \cdot 10^3 / (g \cdot m_c) = \\ a0 + a1 \cdot C_p + a2 \cdot LCB + a3 \cdot Bwl/Tc + a4 \cdot Lwl / \nabla^{1/3} + a5 \cdot C_p^2 + a6 \cdot C_p \cdot Lwl / \nabla^{1/3} + a7 \cdot (LCB)^2 + \\ a8 \cdot (Lwl / \nabla^{1/3})^2 + a9 \cdot (Lwl / \nabla^{1/3})^3 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R_R \cdot 10^3 / (g \cdot m_c) = \\ c0 + c1 \cdot Lwl/Bwl + c2 \cdot A_{wl} / \nabla^{2/3} + c3 \cdot LCB + c4 \cdot (Lwl/Bwl)^2 + c5 \cdot (Lwl/Bwl) \cdot (A_w / \nabla^{2/3})^3 \end{aligned} \quad (3)$$

Em que:

- g : aceleração da gravidade, considerada 9,81 [m/s²];
- m_c : massa da embarcação [t];
- C_p : coeficiente prismático [adm];
- LCB: posição do centro de empuxo longitudinal, considerado 0 pela falta de dados da distribuição de peso da embarcação e/ou memorial descritivo [m];

- Bwl: boca na linha d'água [m];
- Tc: o calado [m];
- Lwl: comprimento na linha d'água [m];
- ∇ : volume deslocado [m³];
- Awl: a área de linha d'água [m²].

As constantes a_n e c_n variam de acordo com os determinados números de Froude, conforme pode ser observado no Apêndice A.

Estimada a resistência residual, a parcela faltante para compor a resistência total corresponde a resistência de atrito (R_f). A resistência de atrito representa a maior parcela da resistência total a baixas velocidades, e, em geral, pode ser estimada a partir da recomendação do International Towing Tank Conference (ITTC, 1957), conforme as Equações 4 e 5.

$$C_F = \frac{0,075}{\log_{10}(Rn - 2)^2} \quad (4)$$

$$R_F = \frac{1}{2} C_F \rho A_w V^2 \quad (5)$$

Somando a resistência de atrito com a resistência residual, obtém-se finalmente a resistência total da embarcação.

2.4.2. *Análise Fluidodinâmica Computacional*

A dinâmica dos fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics) consiste na simulação numérica de qualquer processo físico ou químico que apresente escoamento através ou em torno de um objeto. Desta forma, aborda-se um problema real e contínuo discretizando seu domínio em elementos finitos. A simulação é baseada nos princípios de conservação de energia, massa e quantidade de movimento. (IERVOLINO, 2015).

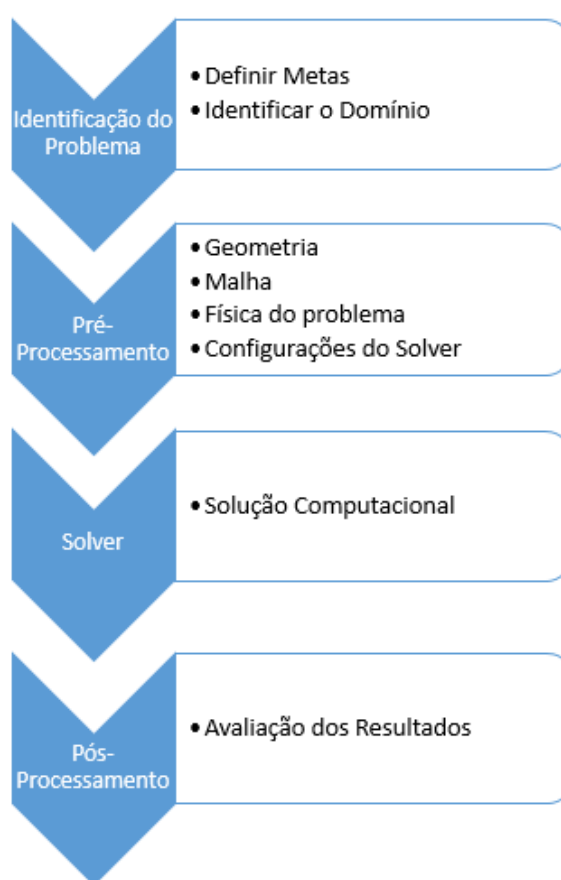
A análise fluidodinâmica computacional proporciona métodos qualitativos e quantitativos para predição do fluxo de calor e de fluidos baseando-se em modelamentos matemáticos, através de equações diferenciais parciais e métodos numéricos, onde efetua-se a discretização e técnicas de solução. Constitui-se de uma análise complexa, onde são feitos

cálculos de transferência de calor, transferência de massa, aspectos mecânicos, tensões e deslocamento de sólidos imersos ou circundantes, dentre outros. (IST SISTEMAS, 2016).

De acordo com Bhaskaran e Collins (2002), a utilização de códigos de CFD se divide em 3 grandes fases: pré-processamento, solver, pós processamento. Precedente a isto, deve-se identificar o problema para análise, conforme ilustrado na

Figura 7.

Figura 7 – Etapas da Análise CFD



Fonte: Adaptado de Aziz (2014).

Na etapa de pré-processamento define-se a geometria do problema, conhecido como o domínio da simulação, a qual é dividida em elementos formando uma malha estruturada. Após definidas as propriedades do fluido, as equações que descrevem o problema são discretizadas e posteriormente solucionadas a partir das condições de contorno. Quanto maior for o número de elementos mais precisa será a solução, porém exigindo um maior custo computacional.

Em seguida, na fase do Solver, ocorre a aproximação e discretização das incógnitas do problema para equações algébricas simples, que são sucessivamente solucionadas. A diferença entre diferentes solvers refere-se a forma como as equações são aproximadas e o processo de discretização utilizado. Pode-se utilizar: método dos elementos finitos, método das diferenças finitas, métodos espectrais, método dos elementos de contorno e método do volume finito (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Por fim, na etapa de pós-processamento, ocorre a análise, interpolação e interpretação dos resultados de forma a visualizar corretamente os dados sobre o comportamento do fluido, e sua respectiva documentação (IERVOLINO, 2015).

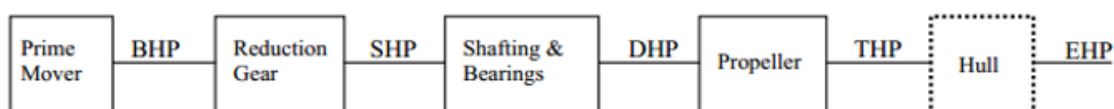
Por ser um método com capacidade de solucionar diversos tipos de problema, seu uso vem sendo cada vez mais difundido em meios acadêmicos e industriais. Entretanto, existem diversas maneiras de se definir e resolver um problema, onde cada conjunto de condições de contorno e critérios de discretização (malha) resultam em uma solução singular. Desta forma, deve-se tomar muito cuidado, uma vez que aplicado da maneira incorreta, pode gerar resultados inconsistentes com a realidade, sendo necessário fazer um trabalho de verificação e validação dos resultados.

Maiores detalhes sobre o modelo de CFD utilizado neste estudo serão apresentados ao longo desta monografia.

2.4.3. Potência do Motor

Obtida a resistência ao avanço, é possível dimensionar o sistema de propulsão do navio mediante características de operação. O acionamento mecânico de um navio com características tradicionais¹ pode ser simplificado de acordo com o diagrama abaixo a partir das definições que seguem.

Figura 8 – Acionamento Mecânico da Embarcação



Fonte: Adaptado de Lewis (1988)

¹ Características tradicionais se referem a uma embarcação com: motor, transmissão e/ou redução, hélice.

As definições referentes as potências presentes em uma embarcação, bem como suas respectivas siglas e equacionamentos, podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das Potências

Parâmetro	Sigla	Definição	Equacionamento
Potência Efetiva	EHP	Potência necessária para mover o casco da embarcação a uma dada velocidade (V_s), na ausência da ação do hélice.	$P_E = V_s * R_T$
Potência de Empuxo	THP	Potência produzida pelo empuxo do hélice e está diretamente relacionada com a eficiência do propulsor. Um hélice bem projetado possui eficiência entre 50 a 75%, sendo calculada como o produto entre o empuxo (T) e a velocidade de avanço (V_a).	$THP = \frac{R_T}{(1 - t)} V_a;$ $THP = V_s(1 - w);$ $THP = T * V_a$
Potência Entregue	DHP	Potência entregue pelo eixo ao hélice, diretamente obtida pela eficiência do hélice (n), pela eficiência rotativa relativa (n_{RR}) e a eficiência do casco (n_H).	$DHP = \frac{THP}{n_p};^2$ $n_p = n * n_{RR} * n_H;$ $n_H = \frac{1 - t}{1 - w};$
Potência no eixo	SHP	Potência no eixo obtida considerando as perdas que ocorrem ao longo do eixo causadas por atrito e pelos mancais (eficiência eixos $-n_t$).	$SHP = \frac{DHP}{n_t}$
Potência Motor	BHP	Potência produzida pelo motor principal do navio. Pode incluir as perdas de caixa de redução (n_e), caso exista.	$BHP = \frac{SHP}{n_e}$

Fonte: Autor (2017).

² Coeficientes relacionado ao hélice (t , w e n_{RR}) são discutidos na seção 2.8.

A potência BHP é aquela que é efetivamente entregue pelo motor para o sistema. Vale notar que a eficiência do próprio motor não é levada em conta, ou seja, deve ser ainda considerada.

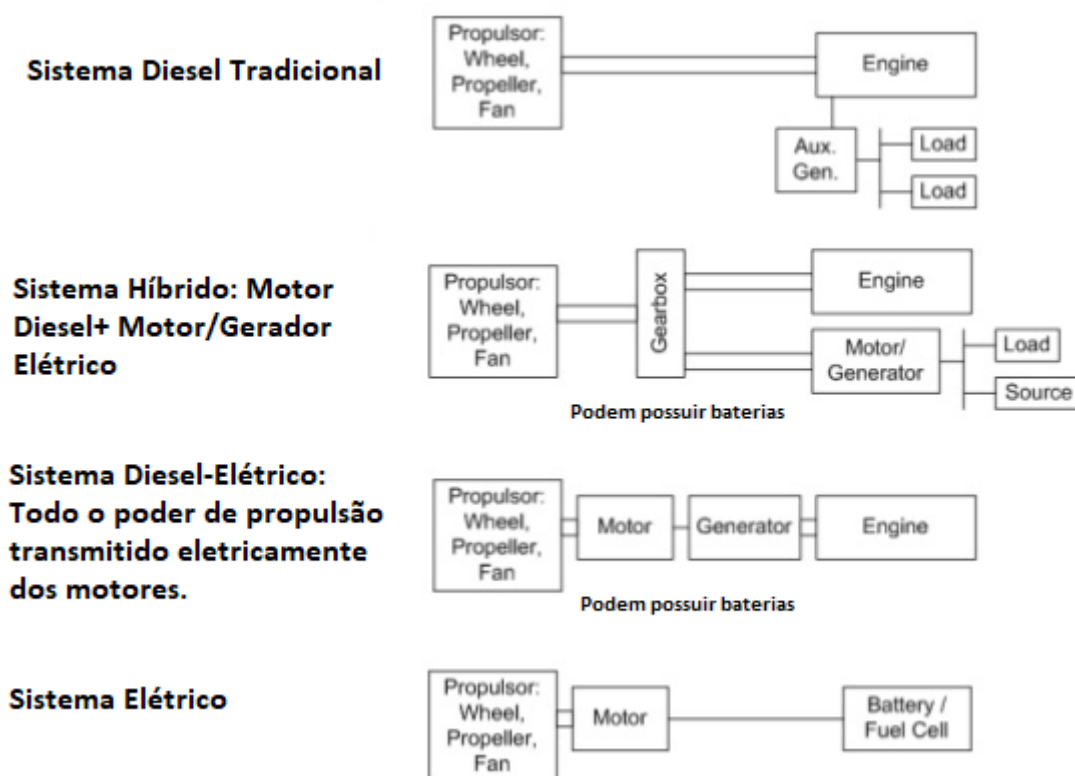
2.5. Instalação Propulsora

O sistema de propulsão propriamente dito, consiste em um conjunto de acessórios, elementos de propulsão e máquina propulsora, cuja finalidade é transformar a energia produzida pela queima do combustível (ou outra fonte energética) em energia de movimento, fazendo com que a embarcação se desloque no meio aquático (CORDEIRO, 2008).

O sistema mais utilizado no mundo marítimo atualmente é o sistema de propulsão a diesel. Os principais componentes de um sistema de propulsão à combustão para navios de pequeno porte são: o motor diesel, um dispositivo de reversão de marcha próprio ou independente do motor, o eixo propulsor e o hélice. Dependendo do tipo e do porte da embarcação, o sistema de propulsão pode apresentar-se de diversas formas. (CORDEIRO, 2008; US NAVY, 1976).

Contudo, com o avanço das tecnologias elétricas, cada vez mais vem se utilizando sistemas híbridos, diesel-elétricos e elétricos. A principal diferença entre estas, está na máquina principal de produção de energia. Enquanto os sistemas a diesel utilizam o motor a diesel como máquina primária, os híbridos e diesel-elétricos integram em seu sistema um motor elétrico. Os sistemas híbridos e diesel-elétricos podem ou não conter baterias em sua configuração, entretanto, se diferem pelo fato que no sistema diesel-elétrico toda a potência gerada é transmitida eletricamente, enquanto no híbrido ela pode ser transmitida mecanicamente. O sistema elétrico, por sua vez, é livre de equipamentos a combustão, tendo seu acionamento totalmente elétrico. Na Figura 9 estão ilustrados os diferentes sistemas de propulsão, bem como seus principais equipamentos (CORDEIRO, 2008; FILHO, 2011; GARRIGAN, 2015).

Figura 9 – Sistemas de Propulsão



Fonte: Adaptado de Garrigan (2015).

O enfoque deste trabalho está no sistema elétrico, desta forma, serão devidamente dimensionados e selecionados os principais elementos que o constituem: motor elétrico, baterias e propulsor. Estes, serão melhor discutidos nas próximas seções.

2.6. Motores Elétricos

Um motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. É o mais usado entre todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica – baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando – com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos; além de oferecerem melhores rendimentos. (PATEL, 2012).

Simplificadamente, os motores elétricos são compostos por duas partes: uma parte móvel (girante), sendo ela o rotor (enrolamento de armadura), e uma parte fixa, denominada estator ou carcaça (enrolamento de campo ou imã permanente). (HECKLER, 2011).

Os principais tipos de motor elétricos são: motores de corrente alternada (CA), que se subdividem em motores síncronos e motores de indução (também conhecidos como motores assíncronos), motores de corrente contínua (DC) e motores universais. No anexo A, apresenta-se a família completa dos diferentes tipos de motores elétricos.

O funcionamento dos motores elétricos é simples: o motor entrega o que é necessário para impulsionar a carga e extrai energia da fonte, igual ao que entrega à carga, mais as perdas internas. Assim, a potência extraída da fonte pode ser inferior ou superior à carga nominal, dependendo da carga acoplada mecanicamente no eixo. No entanto, se continuamente sobrecarregado sem resfriamento adicional, o motor aquecerá e queimará. (PATEL, 2012). A potência do eixo, o torque, a velocidade e a potência fornecida pelo motor estão relacionados da seguinte forma:

$$P(HP) = \frac{T_{lb.ft} \cdot n_{rpm}}{5252} \quad (6)$$

$$P(kW) = \frac{T_{N.m} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{rpm}}{60000} \quad (7)$$

A Tabela 3 apresenta o percentual dos tipos de motores e seu uso de energia em várias classificações de potência. Deve-se ressaltar que cerca de 98% de todos os motores elétricos são motores de indução, sendo que estes usam cerca de 93% da energia elétrica utilizada por todos os motores com classificação de cinco ou mais cavalos de potência (HP). Os motores com menos potência não usam muita energia porque seu uso é intermitente, sendo que muitas vezes esse uso não excede uma hora por dia. (PATEL, 2012).

Tabela 3 – Classificação e Campo de Aplicação dos Motores Elétricos

Categoria do Motor	Porcentagem de utilização em relação a todos os motores	Porcentagem de energia usada em relação a todos os motores	Aplicação Típica
<5HP Motores de Indução	88%	5%	Uso intermitente em pequenas aplicações
5-125HP Motores de Indução	7%	50%	Principais motores elétricos
>125HP Motores de Indução	3%	43%	Largamente utilizado na indústria
Motores Síncronos	1%	1%	Grandes aplicações (>5000HP)
Motores DC	1%	1%	Quando é necessário amplo controle sobre a velocidade

Fonte: Adaptado de Patel (2012).

No que diz respeito a algumas características particulares de funcionamento de cada motor, o Apêndice B as aborda de forma mais enfática. Entre os diversos tipos de motores elétricos, o de indução trifásico se destaca por ser uma máquina com princípio de funcionamento simples, com uma construção robusta resultando em pouca necessidade manutenção, e que devido à automação do seu processo de fabricação, possui preço reduzido quando comparado aos demais (GUEDES, 1994).

Além disso, quando se compara um motor DC com um motor de CA de indução trifásico (também mencionado com a sigla MIT), ambos com a mesma potência, o MIT terá tamanho menor, com 20 a 40% a menos de massa que o motor DC. Isto justifica o fato desta máquina ser a mais utilizada e ter um custo de aquisição e manutenção menor do que o motor DC. (HECKLER, 2011).

Devido a suas excelentes características, o MIT tem sido utilizado como máquina principal nos mais diversos acionamentos, desde acionamentos de simples ventiladores (1,5kW), acionamento de máquinas ferramentas (4 a 30kW), veículos de tração elétrica (1250kW), até mesmo em compressores na indústria química (200 a 1800kW) (GUEDES, 1994).

Nesta perspectiva, Kar (2006) afirma que os MIT são os que apresentam maior confiabilidade diante dos demais, incluindo para manutenções preventivas e possíveis quebras, só perdendo no quesito de densidade de potência para os motores síncronos (ímã permanente). Aliado a isto, Oliveira (2013) sintetiza as características dos motores elétricos, apresentados na Tabela 4. As características são avaliadas por numeração crescente, de forma que o “1” representa melhores características e o “3” piores. Ao final, realiza-se o somatório das pontuações, de forma que a menor soma represente o motor com um conjunto de características mais atraentes para escolha.

Tabela 4 – Comparação entre os tipos de motores elétricos

Característica	Motor CC	Motor Síncrono	Motor de Indução Trifásico
Eficiência	3	1	2
Confiabilidade	3	2	1
Densidade de Potência	3	1	2
Maturidade da Tecnologia	1	2	1
Custos	2	3	1
TOTAL	12	9	7

Fonte: Adaptado de Oliveira (2013).

O motor elétrico que se apresentou mais vantajoso mediante análise foi o de indução trifásico, visto que ele se apresenta como melhor solução para três das cinco características analisadas. Nas demais, ainda é classificado como segunda opção, configurando uma ótima solução. No Apêndice C os aspectos construtivos, princípios físicos de funcionamento e outras características relevantes do MIT são discutidas de forma esmiuçada.

2.7. Baterias

A energia elétrica, embora seja uma forma de energia muito conveniente para distribuir e usar, não pode ser facilmente armazenada em grande escala. Quase toda a energia elétrica gerada pelas usinas de energia elétrica é consumida simultaneamente em tempo real. (PATEL, 2012).

No entanto, várias tecnologias estão atualmente disponíveis para armazenar energia em uma escala relativamente pequena em forma elétrica, mecânica, química e magnética

(PATEL, 2012). As densidades de armazenamento de energia nessas alternativas e suas durações típicas de uso são comparadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Tecnologias de armazenamento de energia elétrica, mecânica e magnética

Tecnologia de Armazenamento	Forma de armazenamento de energia	Típica duração do armazenamento	Densidade Energética (kWh/kg)
Capacitor	Campo Elétrico	< segundos	Baixa
Indutor	Campo Magnético	< segundos	Moderada
Baterias	Eletroquímica	Dias, Meses	Moderada
Flywheel (volante)	Energia Cinética	Dias, Meses	Alta
Bobinas (imãs supercondutores)	Campo Magnético	Dias, Meses	Muito alta

Fonte: Adaptado de Patel (2012).

A bateria armazena energia na forma eletroquímica para uma ampla variedade de aplicações em produtos de consumo e plantas industriais. Sua eficiência de conversão de energia elétrica para química ou vice-versa é de cerca de 85%. Existem dois tipos básicos de bateria eletroquímica:

- Bateria primária: converte energia química em energia elétrica, na qual a reação eletroquímica não é reversível e a bateria após uma descarga completa é descartada. Tem alta densidade de energia, gravimétrica (Wh/kg) e volumétrica (Wh/litro). Por esse motivo, esta tecnologia encontra aplicações onde é necessária alta densidade de energia durante um único uso. (PATEL, 2012).
- Bateria secundária: também é conhecida como bateria recarregável. Sua reação eletroquímica é reversível. Após uma descarga, ela pode ser recarregada injetando uma corrente direta de uma fonte externa. No modo de carga, converte a energia elétrica em energia química. No modo de descarga, é invertido, convertendo a energia química em energia elétrica. Nos modos de carga e descarga, cerca de 15% da energia é convertida em calor em cada sentido, a qual se dissipa no meio circundante. Portanto, a eficiência

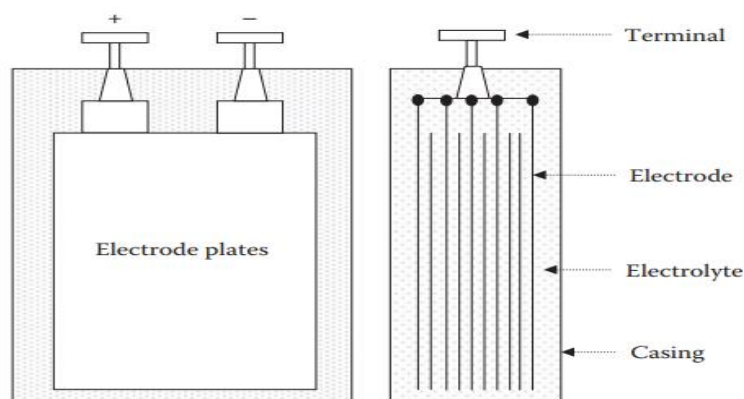
da conversão de energia de ida e volta é de aproximadamente $0,85 \times 0,85$, ou seja, 70% a 75%, dependendo da eletroquímica. (PATEL, 2012).

A bateria recarregável é usada em instalações industriais e navios como fonte de energia de emergência para cargas essenciais, circuitos de controle e energia de partida para o motor primário do gerador. No nível da rede de energia elétrica, Patel (2012) enumera aplicações das grandes baterias:

- Armazenamento de energia em parques eólicos e parques solares;
- Rede inteligente com linhas de comunicação e segurança cibernética;
- Melhorar a confiabilidade do sistema de transmissão para evitar o colapso da tensão e o apagão;
- Melhorar a qualidade do poder nos sistemas elétricos de utilidade pública;
- Em programas para reduzir emissões, promover o uso mais eficiente de energia e melhorar a qualidade do meio ambiente.

A construção interna de uma célula eletroquímica típica (primária ou recarregável) é mostrada na Figura 10. Neste arranjo a célula possui placas de eletrodo positivo e negativo com separadores isolantes e um eletrólito químico entre eles. Os dois grupos de placas de eletrodo estão conectados a dois terminais externos montados na caixa. A célula armazena energia eletroquímica com baixo potencial elétrico, tipicamente 1,2 a 3,6 V, dependendo da eletroquímica. A capacidade de retenção de carga da célula é indicada por C, que é a medida em amperes-horas (Ah) que célula pode fornecer.

Figura 10 – Construção da célula eletroquímica



Fonte: PATEL (2012).

Várias tecnologias de baterias recarregáveis foram totalmente desenvolvidas e estão em uso tanto no setor industrial quanto para o consumidor final. Novas eletroquímicas estão sendo continuamente desenvolvidas para uma variedade de aplicações, como veículos elétricos, naves espaciais, nivelamento de carga de utilidade e, claro, para sistemas de energia solar e eólica com geração de energia inerentemente intermitente.

As principais eletroquímicas utilizadas atualmente, são:

- Chumbo-Ácido (Pb-acid);
- Níquel-Cádmio (Ni-Cd);
- Níquel-Hidreto Metálico (Ni-Mh);
- Lítio-ion (Li-ion);
- Lítio-Polímero (Li-Poli);
- Bateria de Sódio.

A tensão média durante a descarga depende da característica da eletroquímica, conforme listado na Tabela 6. As densidades de energia de várias baterias, medido pela capacidade Wh por quilograma de massa e Wh por litro de volume, são comparadas na Figura 11.

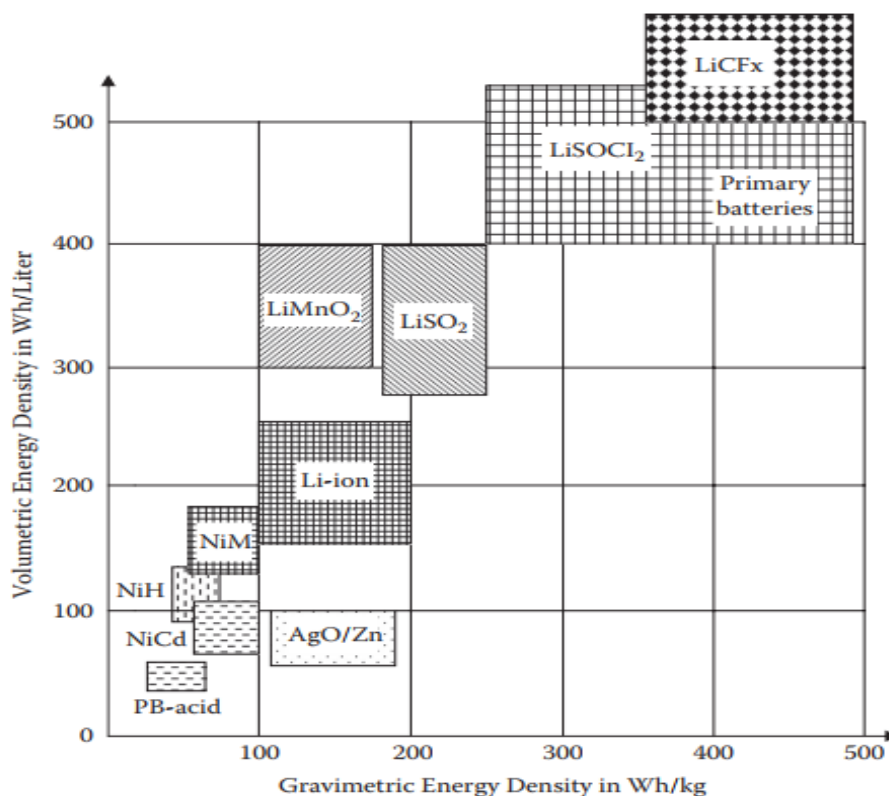
A seleção da eletroquímica para um determinado aplicativo é uma questão de desempenho, tamanho e otimização de custos. Algumas características de construção e operação das eletroquímicas individuais de cada bateria, serão melhor discutidas nos tópicos a seguir.

Tabela 6 – Tensão média da célula durante a descarga em várias baterias recarregáveis

Eletroquímica	Aplicação Típica	Voltagem da Célula	Observações
Chumbo-Ácido	Indústria, Carros, Embarcações	2	Tecnologia de menor custo
Níquel-Cádmio	Equipamentos Portáteis	1,2	Apresenta Efeito de Memória Severo
Níquel-Hidreto Metálico	Automóveis	1,2	Sensível a Temperatura
Lítio-Ion	Computadores, Celulares, Naves Espaciais	3,6	Segura, não contém lítio metálico ³
Lítio-Polímero	Celulares, Naves Espaciais	3	Contém Lítio Metálico

Fonte: Adaptado de Patel (2012).

Figura 11 - Comparação de densidade de energia entre várias células da bateria.



Fonte: PATEL (2012).

³ Por causa da instabilidade inerente do metal de lítio, especialmente durante o carregamento, pesquisas conduziram para uma bateria de lítio não metálica que usa íons de lítio.

Salvo as baterias primárias, observa-se que dentre as baterias recarregáveis, as que apresentam maior densidade de energia são as de Lítio, de forma bem superior as demais, seguida pelas de Níquel e chumbo-ácido. No Apêndice D aprofunda-se sobre as peculiaridades de cada eletroquímica.

2.8. Propulsor

Toda embarcação necessita de um propulsor, cuja finalidade é a geração de uma força propulsiva. Dentre as diversas soluções propulsivas, o hélice de passo fixo é o mais utilizado para esta finalidade.

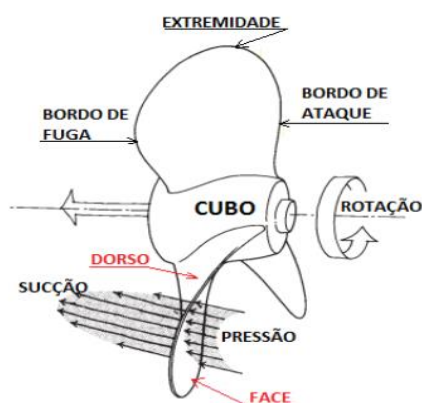
O dimensionamento do hélice deve atender alguns requisitos principais, tais como desempenho e eficiência, além de critério de cavitação (MENDES, 2015).

O hélice é um elemento composto por uma peça central denominada por cubo, onde se ligam um determinado número de pás dispostas em torno deste, cuja sua rotação permite o avanço da embarcação.

As pás de um hélice têm uma zona de sucção e outra de pressão, respectivamente referentes ao dorso e face da pá. O perfil de uma pá, como ilustrado na .

Figura 12, é composto por alguns elementos: bordo de ataque (linha frontal das pás), bordo de fuga (linha traseira das pás), extremidade (ponto do hélice de maior raio) (SILVA, 2015).

Figura 12 – Elementos Constituintes de um Hélice.



Fonte: Silva (2015).

Geralmente, o desempenho de um propulsor do⁴ tipo hélice é avaliado através de ensaios em águas livres, denominado “open water test”. Neste ensaio, o modelo do hélice é deslocado com uma velocidade de avanço V_a num fluido em repouso, em um escoamento de aproximação tão uniforme quanto possível.

As características propulsivas analisadas durante o ensaio, força propulsiva (T) e Torque (Q), são medidas em vários regimes estacionários de funcionamento, constituindo o diagrama de águas livres, ilustrado na Figura 13. (TRINDADE, 2012).

A força propulsiva (T) e o Torque (Q) determinados por um hélice propulsor depende das seguintes variáveis:

- Velocidade de avanço (V_a);
- Velocidade de rotação (η);
- Massa específica do fluido (ρ);
- Viscosidade cinemática do fluido (ν).

Aplicando análise dimensional e expressando a dependência dos coeficientes de força propulsiva e de torque dos seguintes grupos adimensionais.

- Coeficiente de avanço: $J = \frac{V_a}{\eta D}$;
- Número de Reynolds: $Re = \frac{\eta D^2}{\nu}$.

Obtêm-se as seguintes expressões para os referidos coeficientes adimensionais:

- Coeficiente de força propulsiva: $K_T = \frac{T}{\rho \eta^2 D^4}$;
- Coeficiente de Torque: $K_Q = \frac{Q}{\rho \eta^2 D^5}$.

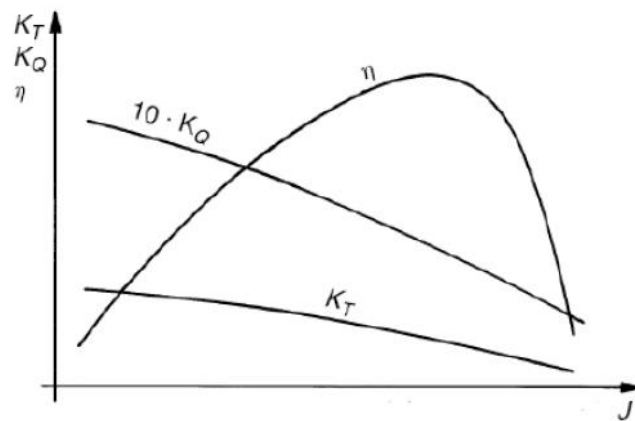
A eficiência do propulsor é definida como a razão entre a potência efetiva e a potência fornecida ao hélice. Entretanto, esse valor ainda pode ser expresso como uma função dos coeficientes adimensionais, conforme a equação a seguir.

⁴ Em Engenharia Naval, tradicionalmente o termo hélice é usado no masculino, por se referir “ao propulsor do tipo hélice”.

$$\eta_0 = \frac{P_E}{P_D} = \frac{V_a \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot Q} = \frac{J \cdot K_T}{2\pi K_Q} \quad (8)$$

As curvas traçadas no diagrama são utilizadas principalmente para otimização do hélice, bem como determinação do ponto de funcionamento ideal. Na prática, já não se utilizam representações gráficas no projeto de hélices, somente os polinômios deduzidos a partir da análise dessas, visando a automatização computacional de tal procedimento (TRINDADE, 2012).

Figura 13 – Diagrama de águas livres



Fonte: Trindade (2012).

Para efetiva seleção do hélice, as séries sistemáticas se apresentam como uma excelente solução, uma vez que são formuladas por meio da variação sistemática de parâmetros geométricos do próprio hélice (TRINDADE, 2012).

A série de Wageningen, ou série B, será a série adotada neste trabalho, visto que é uma das séries mais populares, sendo amplamente utilizada no ramo naval, pois cobre uma ampla faixa de aplicações e possui um grande número de estudos publicados (BRINATI, 2010). Além disso, Larsson e Eliasson (2000) utilizam esta série para o projeto de hélice de veleiros no livro “Principles of Yatch Design”, um dos mais conceituados da área.

Nesta série foram ensaiados cerca de 120 propulsores de passo fixo separados pela variação do número de pás, da razão de área expandida e da razão de passo diâmetro, os quais resultaram na faixa de abrangência da série, apresentada na Tabela 7.

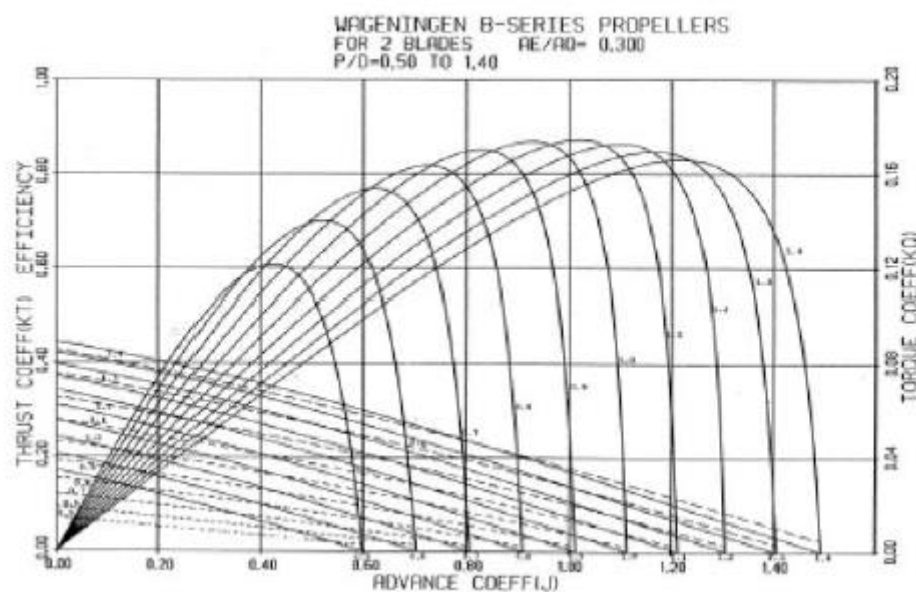
Tabela 7 - Abrangência da Série B de Wageningen.

Parâmetro	Varição
Número de pás (Z)	2 – 7
Razão de Área expandida (A_e/A_o)	0,3 – 1,05
Razão passo-diâmetro (P/D)	0,5 – 1,4

Fonte: Autor (2017).

Os diagramas, exemplificado na Figura 14, são formulados com curvas características dos diagramas de águas livres, cada curva corresponde a uma razão de passo diâmetro. (MENDES, 2015).

Figura 14 – Exemplo de diagrama em águas livres da Série B



Fonte: Trindade (2012).

A seguir, serão detalhados os passos para a seleção do propulsor conforme a Série B, bem como a definição do ponto de operação e do rendimento do hélice.

Observa-se que as curvas de desempenho da propulsão, são obtidos sem a presença da embarcação, assim como a resistência ao avanço da embarcação é estimada sem a presença do hélice. Desta forma, é necessário aplicar 3 fatores de correção para garantir a interação casco-hélice, e como resultado estimar o valor do empuxo (MOLLAND, 2011).

O primeiro destes fatores é chamado de coeficiente de esteira nominal e pode ser obtido através da equação empírica desenvolvida por Taylor apud Molland, a qual se refere a

embarcações genéricas de hélice único, que ilustra a dependência existente entre o fator de esteira (w_T) e o coeficiente de bloco (C_B) da embarcação.

$$w_T = 0,5 \cdot C_B - 0,05 \quad (9)$$

O segundo fator de correção é o coeficiente de redução de empuxo ou coeficiente de redução de força propulsiva. Esse fator considera os efeitos do propulsor no escoamento ao redor do casco, pois a presença do hélice, aumenta a velocidade do fluido a ré da embarcação, reduzindo a pressão e, portanto, aumentando a resistência ao avanço do casco (MOLLAND, 2011). Para embarcações de hélice único é estimado conforme a equação a seguir.

$$t = 0,5 \cdot w_T \quad (10)$$

Quando t e R_T são conhecidos, é possível calcular o empuxo, conforme a equação abaixo.

$$T_X = \frac{R_T}{(1 - t)} \quad (11)$$

Por fim, o último fator de correção para garantir a integração casco-hélice é conhecido como rendimento rotativo relativo (η_{RR}), pois a eficiência do propulsor em águas abertas não é a mesma do propulsor operando na esteira do navio, de modo que o torque da embarcação é diferente do torque em águas abertas. Uma maneira de estimar η_{RR} é por meio da Equação 12, visto que esta depende da razão de passo-diâmetro, variando para cada hélice testado (MOLLAND, 2011).

$$\eta_{RR} = 0,9737 + 0,111 \cdot (C_P - 0,0225 \cdot LCB) - 0,06325 \cdot \frac{P}{D} \quad (12)$$

Sabe-se que o rendimento é o principal parâmetro de escolha quando se procura um propulsor eficiente, entretanto o mesmo deve ser capaz de passar pelos critérios de cavitação. A cavitação que ocorre nas pás durante o seu funcionamento gera erosão, ruído, vibrações e

perda de força propulsiva. Tais efeitos são prejudiciais à boa operação da embarcação (MOLLAND, 2011).

Para evitar problemas relacionados a cavitação é necessário avaliar a porcentagem de cavitação do propulsor utilizando o diagrama de Burril, o qual foi criado a partir de ensaios em túneis de cavitação e em escala real de hélices de geometrias variadas, relacionando o coeficiente de Burril (τ_c) e o número de cavitação ($\sigma_{0,7}$), conforme as equações a seguir (MOLLAND, 2011).

$$\sigma_{0,7} = \frac{\rho gh + P_{atm} - P_v}{0,5\rho V_R^2} \quad (13)$$

$$\tau_C = \frac{T_x}{0,5\rho A_P V_R^2} \quad (14)$$

A pressão atmosférica (P_{atm}) apresenta-se no valor de 101000 N/m². A pressão de vapor da água salgada (P_v), para um projeto preliminar, considera-se 3000 N/m². A profundidade do propulsor (h) é definida pela Loyd's Register para hélice único de acordo com a equação a seguir:

$$h = 0,2 * D + \frac{D}{2} \quad (15)$$

A velocidade local (V_R) que compõe a velocidade do fluido com a velocidade radial causada pela rotação do propulsor pode ser estimada por meio da equação a seguir:

$$V_R^2 = V_a^2 + (0,7 * n * \pi * D)^2 \quad (16)$$

Por fim, a área projetada (A_P) de um propulsor pode ser definida pela equação abaixo:

$$A_P = A_e * \left(1,067 - 0,229 * \left(\frac{P}{D} \right) \right) \quad (17)$$

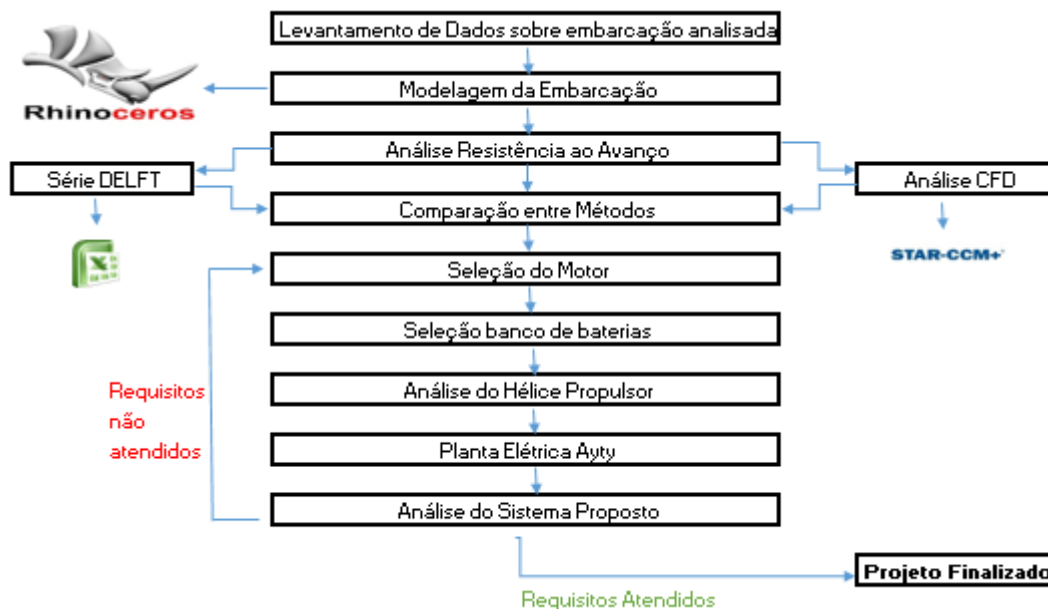
3. METODOLOGIA

Como mencionado anteriormente, o presente trabalho propõe a conversão do sistema de propulsão a combustão de um veleiro de 33 pés para um sistema de propulsão elétrico.

A fundamentação teórica para os processos e métodos utilizados no desenvolvimento proposto foi apresentada no capítulo anterior. Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, que corresponde ao processo de projeto, as técnicas utilizadas em cada uma das tarefas, bem como as ferramentas utilizadas.

A representação gráfica do processo de projeto utilizado consiste em nove etapas as quais são representadas no fluxograma da Figura 15.

Figura 15 – Desenvolvimento do projeto



Fonte: Autor (2017).

O desenvolvimento tem início com a caracterização da embarcação de estudo, a qual foi feita por meio da transformação paramétrica para ajustar um casco padrão de veleiro para melhor representar a embarcação em estudo.

A seguir o casco da embarcação foi modelado no programa Rhinoceros© a partir da extensão Orca 3D por meio da inserção dos parâmetros conhecidos da embarcação.

De posse do modelo do casco, realizou-se a estimativa de resistência ao avanço para a embarcação e, conseqüentemente, a estimativa de potência requerida, a partir de duas abordagens: analítica (com auxílio da série DELFT) e fluidodinâmica computacional (com auxílio do software Star-CCM+).

Uma vez determinada a potência requerida para navegar na velocidade de serviço, foi possível selecionar o motor elétrico que melhor se adequa a esta aplicação, bem como o banco de baterias para supri-lo. Em seguida, será analisou-se o hélice propulsor que integra a embarcação atual, de forma a compará-lo com diferentes soluções, analisando se este era passível de alteração diante do sistema elétrico proposto.

Por fim, discutiu-se os demais componentes que integram o sistema elétrico, de forma a perfazer a planta elétrica proposta para o novo projeto do veleiro Ayty. Todo o desenvolvimento utilizou modelos empíricos e técnicas racionais de projeto, sendo realizado com auxílio do programa Excel.

Finalizada a planta elétrica, verificou-se o impacto da implementação deste sistema na embarcação. A análise abrangeu aspectos físicos, avaliando impactos na estabilidade (simulações realizadas no software Maxsurf Stability Advanced), peso, arranjo geral, além de aspectos econômicos, efetuando comparações entre os gastos envolvendo o novo sistema proposto em relação ao sistema tradicionalmente utilizado.

O processo poderá sofrer nova iteração, com a escolha de um novo conjunto propulsor, caso o desenvolvimento não alcance aos requisitos propostos para o projeto.

4. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, as etapas descritas na metodologia serão apresentadas sequencialmente, de forma a perfazer o estudo de caso proposto.

Ao fim das etapas, faz-se necessário atender os seguintes requisitos do armador:

- Baixo Custo (orçamento limitado);
- Sistema atender a velocidade de 6 nós;
- Velocidade Máxima de 8 nós (não essencial);
- Mínima modificação nas acomodações de tripulantes;
- Mesma Estabilidade transversal e longitudinal.

4.1. Embarcação escolhida para análise

A embarcação de análise consiste em um veleiro de 33 pés (adeira.

Figura 16), cujas características principais foram retiradas diretamente do memorial descritivo elaborado em 2016 da embarcação. O veleiro AITY, destinado a esporte e recreio, apresenta as seguintes características:

- Comprimento Total: 10,10m;
- Comprimento entre Perpendiculares: 8,5m;
- Boca Moldada: 3,66m;
- Pontal Moldado: 1,6m;
- Deslocamento leve: 6t;
- Deslocamento carregado: 7t;
- Borda livre leve a meia-nau: 800mm;
- Altura do Mastro: 16,80m;
- Propulsão Principal: Vela de área de 34m² (estai de proa fixo, com ajuste de tensão feito pela popa);
- Propulsão Auxiliar: Motor Diesel MWM 60HP, rotação de 2500 rpm;
- Propulsor: Hélice único de 3 pás, com diâmetro de 0,45m;

- Leme: 1 unidade de 0,8m²;
- Velocidade de Serviço: 6 nós;
- Lastro fixo de 1500kg posicionado sob o paineiro da cabine;
- Ano de Construção: 2008;
- Material: madeira.

Figura 16 – Veleiro Ayty



Fonte: Memorial Ayty (2016).

4.2. Modelagem da embarcação

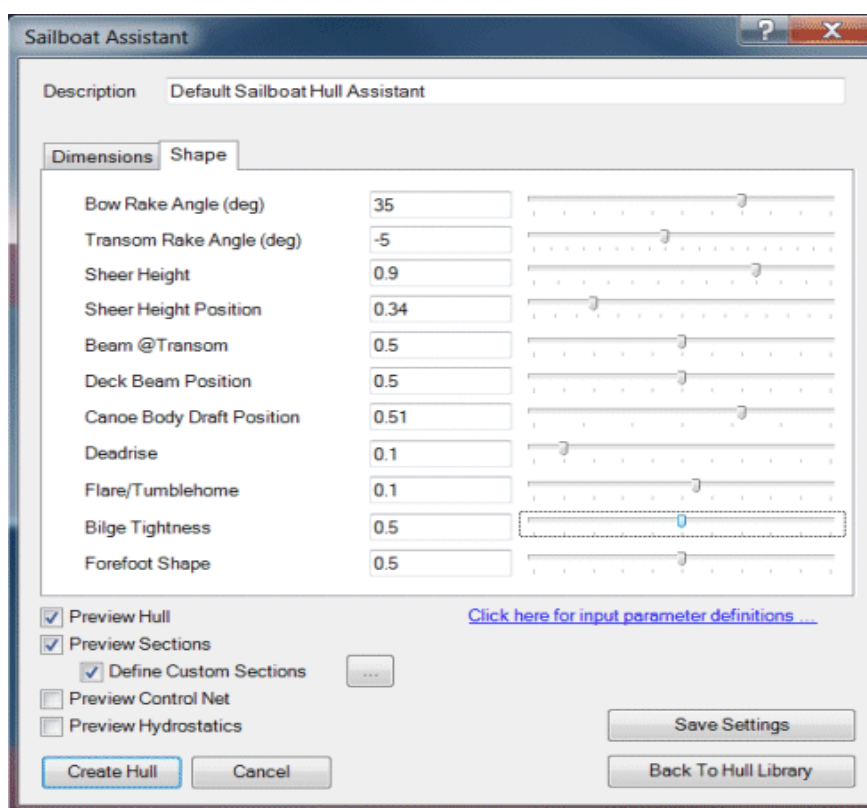
A modelagem do casco é a fase inicial do processo de simulação e reproduz a geometria do casco real com ajuda de um programa computacional, no caso, a extensão Orca3D do Rhinoceros®.

Com o intuito de reproduzir de forma fiel a embarcação, trabalhou-se em alguns parâmetros do casco de forma que o casco produzido apresentasse as mesmas características do Ayty.

A modelagem se iniciou a partir da geração de um casco padrão de veleiro disponibilizado pelo programa, com a inserção dos parâmetros relacionados as dimensões principais citadas no tópico acima. Gerado o casco, utilizou-se a ferramenta “OrcaPointsOn” para visualizar os pontos de controle da superfície. A partir dos pontos de controle, realizou-se uma primeira aproximação do casco modelado para o casco real.

Com a forma do casco bem próxima da embarcação de estudo, foram realizados ajustes mais refinados em alguns parâmetros do casco, de forma que a fidelidade fosse garantida. Os ajustes foram realizados no *Sailboat Assistant*, na aba *Shape*, apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Aba Shape para alteração dos parâmetros do casco

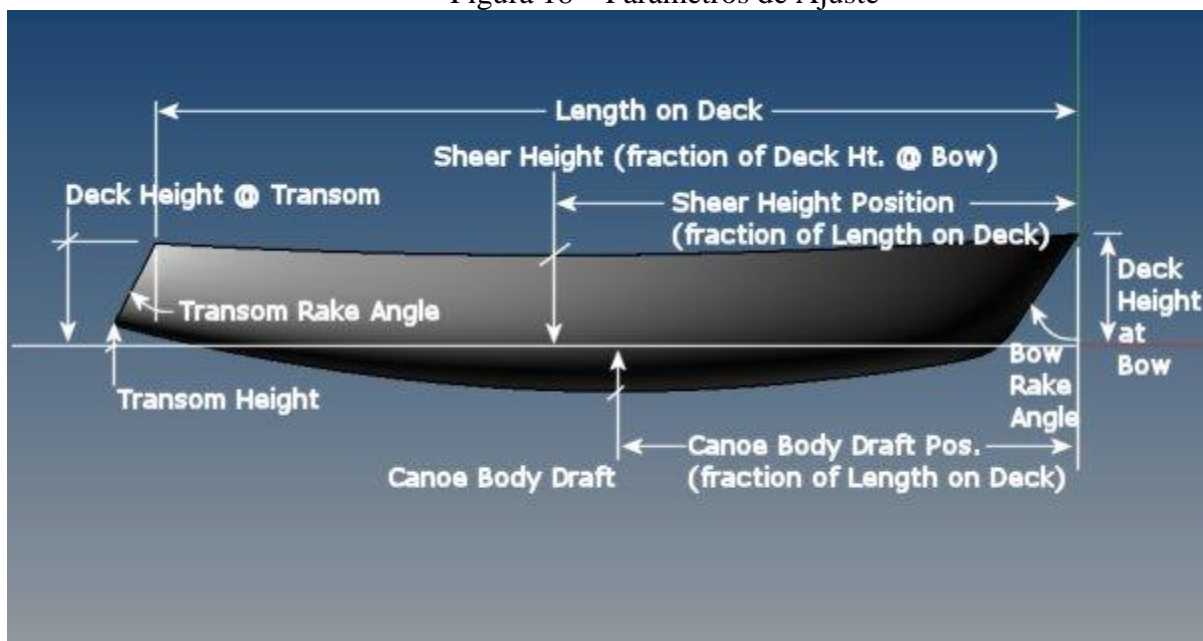


Fonte: HelpOrca3D (2015).

Alguns dos parâmetros são valores dimensionais reais (em unidades de comprimento ou graus), e alguns são expressos como razões. O “*Sheer Height Position*” é uma fração do comprimento do convés. O “*Sheer Height*” é a altura da curvatura do arco do casco. Desta forma, o perfil do *sheerline* é construído como um arco a partir destes dois pontos, além da extremidade da popa. O “*Bow Rake Angle*” e “*Transom Rake Angle*” são medidos em graus, e representam os ângulos de inclinação da proa e popa, como pode ser observado na Figura 18.

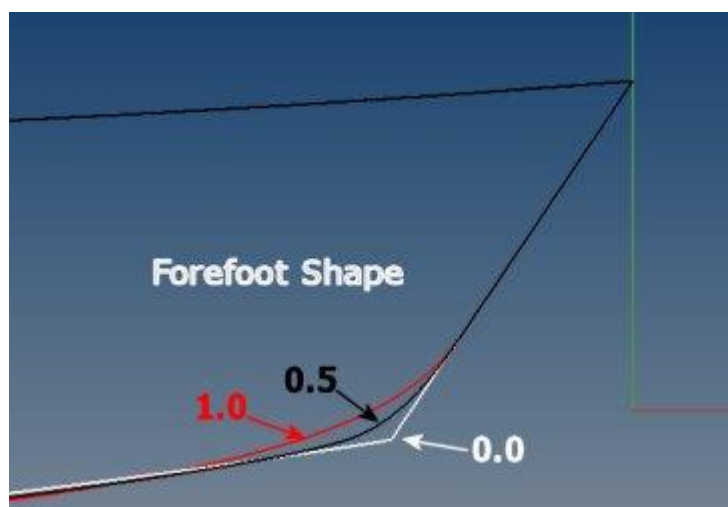
Da mesma forma que a *sheerline*, o perfil do arco inferior do casco, é constituído por três pontos: “*Transom Height*”, “*Forefoot Shape*” (Figura 19) e “*Canoe Body Draft Position*”. O valor do “*Deadrise*” controla a inclinação da superfície à medida que ela caminha em direção ao eixo de simetria do casco, enquanto o valor “*Flare*” controla a superfície à medida que ela se move em direção a *sheerline*. A forma do casco também é controlada pelo “*Bilge Tightness*”, onde valores próximos de “0” geram superfícies mais retangulares, enquanto valores maiores geram cascos mais finos. Visto que o “*Flare*” e o “*Deadrise*” interferem diretamente um no outro (Figura 20), faz-se necessário realizar algumas iterações até atingir a forma desejada.

Figura 18 – Parâmetros de Ajuste



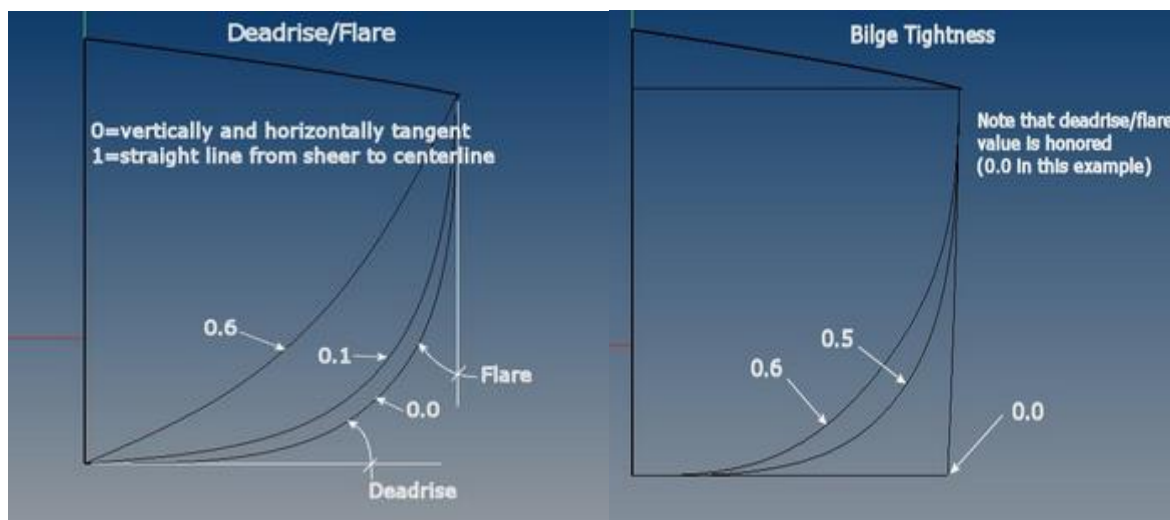
Fonte: HelpOrca3D (2015).

Figura 19 – Forefoot Shape



Fonte: HelpOrca3D (2015).

Figura 20 – Deadrise/Flare e Bilge Tightness



Fonte: HelpOrca3D (2015).

Os valores referentes aos parâmetros utilizados na modelagem do casco são mostrados na Tabela 8.

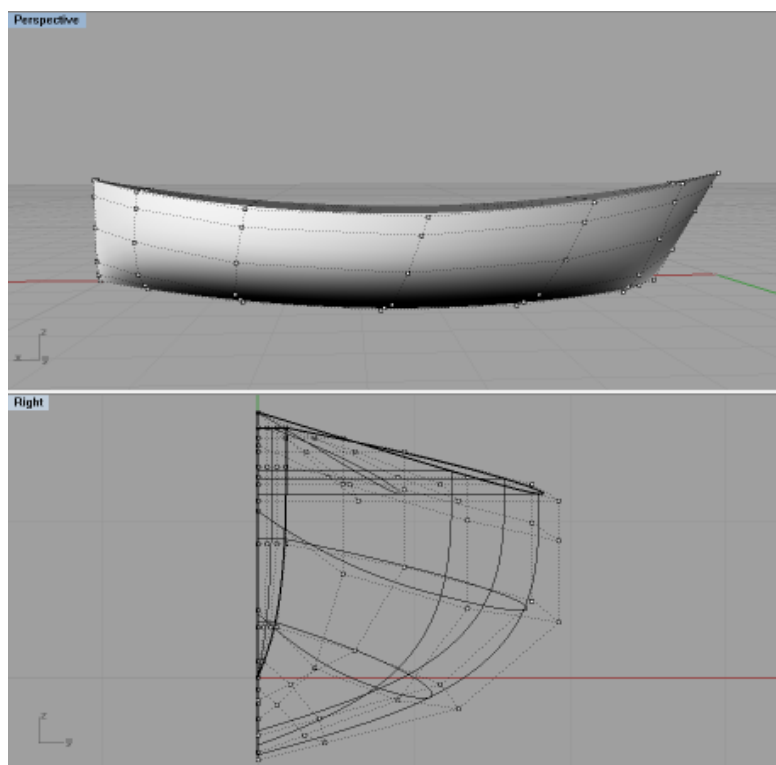
Tabela 8 – Parâmetros ajustados no casco

Parâmetro	Valor Utilizado
Bow Rake Angle (graus)	34°
Transom Rake Angle (graus)	0°
Sheer Height Position (m)	0,36
Sheer Height (m)	0,7
Deck Height at Bow (m)	1,7
Beam Transom (m)	0,1
Deck Beam Position (m)	0,6
Canoe Body Draft Position (m)	0,5
Deadrise (m)	0,6
Flare (m)	-0,2
Bilge Tightness (m)	0,6
Forefoot Shape (m)	0,6

Fonte: Autor (2017).

O casco final utilizado para futuras análises computacionais pode ser observado na Figura 21. Suas dimensões principais, coeficientes adimensionais e demais características podem ser observados na Tabela 9.

Figura 21 – Ayty modelado no Rhinoceros©



Fonte: Autor (2017).

Tabela 9 - Dimensões e características do Ayty modelado.

Características da embarcação	Símbolo	Valor
Comprimento Total [m]	LOA	10,10
Comprimento entre Perpendiculares [m]	L _{PP}	8,50
Comprimento na linha d'água [m]	L _{WL}	9,19
Boca Moldada[m]	B _M	3,66
Boca na linha d'água[m]	B _{WL}	3,12
Calado de projeto [m]	T _C	0,70
Deslocamento [t]	Δ	7,00
Coeficiente de bloco	C _B	0,34
Coeficiente Prismático	C _P	0,56
Área molhada [m ²]	A _w	18,81

Fonte: Autor (2017).

4.3. Série Delft

Visto que o memorial apresenta valores para deslocamento leve e deslocamento carregado, optou-se por analisar a resistência ao avanço pela série Delft em 3 casos distintos:

- Caso 1: Deslocamento inferior ao deslocamento leve (5t). Caso futuras alterações ocasionem diminuição no deslocamento da embarcação;
- Caso 2: Deslocamento igual ao deslocamento leve (6t);
- Caso 3: Deslocamento igual ao deslocamento carregado (7t). Caso futuras alterações ocasionem aumento no deslocamento da embarcação;

Para esta análise, se modificou o deslocamento da embarcação no programa Rhinoceros© (extensão Orca3D) de tal forma que para cada caso, gerou-se uma configuração particular de parâmetros a ser em analisados na série Delft, com valores de entrada mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros de variações de análise

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
L_{WL} [m]	9,12	9,16	9,19
B_{WL}[m]	2,90	3,02	3,12
T_C [m]	0,60	0,65	0,70
[t]	5,00	6,07	7,00
C_p	0,60	0,55	0,56
LCG (% da meia nau)	0,00	0,00	0,00
A_w [m²]	16,95	17,93	18,81
g [m/s²]	9,81	9,81	9,81

Fonte: Autor (2017).

Visto isto, verificou-se se os casos gerados estavam dentro dos limites dos parâmetros utilizados na série Delft, apresentados na Tabela 1 na seção 2.4.1. Na Tabela 11, pode-se

observar que todos os casos estão dentro das faixas requeridas para utilização adequada da série Delft.

Tabela 11 – Limites dos parâmetros utilizados na série Delft

Limite Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
L_{wl}/B_{wl} (2,76 – 5)	3,14	2,94	3,30
B_{wl}/T_c (2,46 – 19,32)	4,83	4,46	4,65
C_p (0,52 – 0,6)	0,60	0,56	0,55
LCB (0 – 6)	0,00	0,00	0,00
L_{wl}/∇ (4,34 – 8,5)	5,31	4,84	5,06

Fonte: Autor (2017).

Com auxílio da ferramenta Microsoft Excel, desenvolveu-se uma planilha para realizar a predição de resistência ao avanço em diferentes velocidades, de acordo com o equacionamento discutido na fundamentação teórica. Os resultados de resistência encontrados, e conseqüentemente, de potência, podem ser graficamente visualizados no apêndice E.

Na Figura 22, bem como na Tabela 12, estão dispostos os valores de potência respectivos ao intervalo de 2,3 nós até 8,3 nós. Isto, deve-se ao fato que para valores inferiores a estes, a potência nesta ordem de grandeza apresenta valores muito próximos de 0. Por outro lado, valores maiores apresentam-se fora do contexto de análise, visto que a embarcação operará com velocidade de cruzeiro de 6 nós, podendo atingir velocidade máxima de 8 nós conforme definido pelo armador na elaboração dos requisitos de projeto.

Figura 22 – Potências Resultantes para os 3 casos analisados

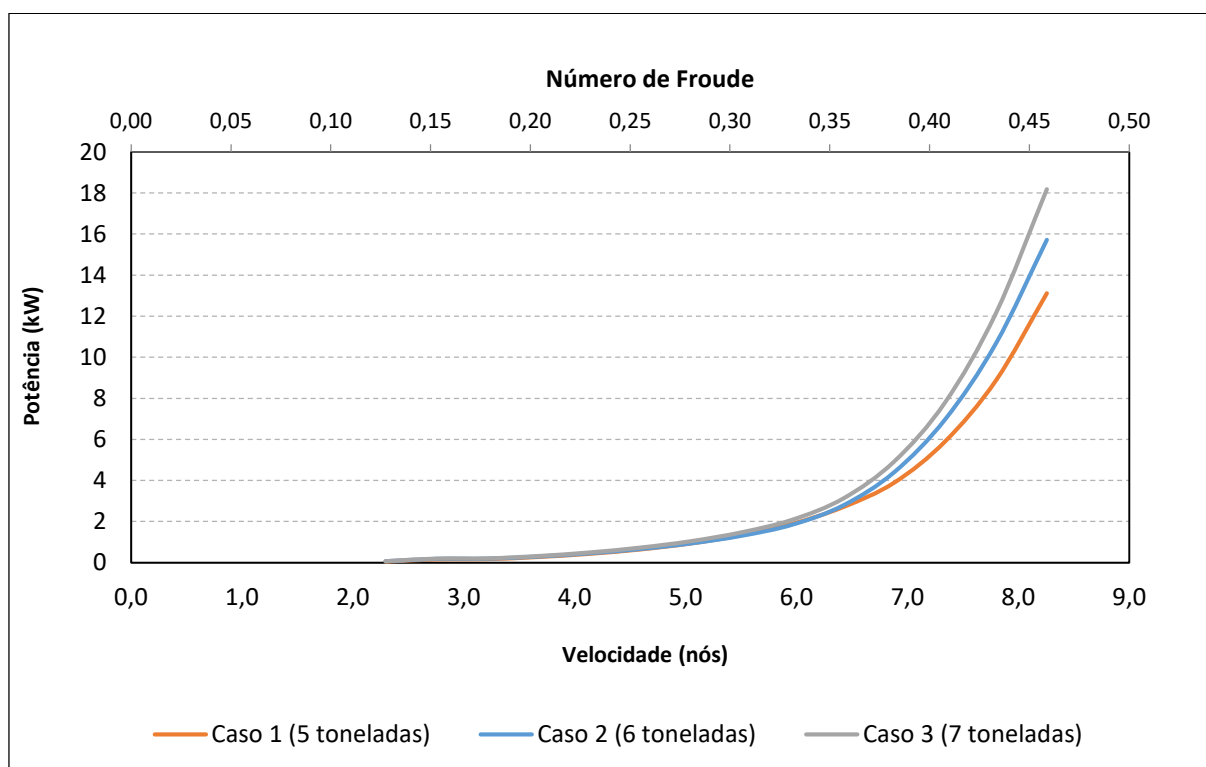


Tabela 12 – Resultados de Potência oriundos da Série Delft

Velocidade		Potência Caso 1	Potência Caso 2	Potência Caso 3
m/s	nós	(kw)	(kw)	(kw)
1,2	2,3	0,05	0,06	0,07
1,4	2,8	0,16	0,18	0,20
1,7	3,2	0,17	0,19	0,21
1,9	3,7	0,28	0,29	0,32
2,1	4,1	0,43	0,45	0,49
2,4	4,6	0,64	0,66	0,73
2,6	5,0	0,94	0,96	1,04
2,8	5,5	1,34	1,41	1,48
3,1	6,0	1,89	1,92	2,09
3,3	6,4	2,71	2,79	3,13
3,5	6,9	3,90	4,40	4,93
3,8	7,3	5,90	6,97	7,80
4,0	7,8	8,87	10,68	12,15
4,3	8,3	13,12	15,72	18,18

Fonte: Autor (2017).

4.4. Star-CCM

A abordagem computacional foi realizada com a ferramenta StarCCM+, que, através da interação fluido/estrutura definida pelas condições de contorno, utiliza equações de Navier-Stokes e da continuidade para definir tensões em escoamento turbulento.

O estudo apresenta dois corpos principais distintos: a geometria (embarcação de análise, ou seja, o veleiro AYTU) e o volume de controle contendo o escoamento multifásico de fluido. Partindo destes dois corpos, define-se previamente as condições de contorno e aplicam-se diferentes malhas e características a cada região de análise. A série dos passos para a construção das simulações e a forma como os resultados são abordados estão descritos nesta seção.

4.4.1. Geometria

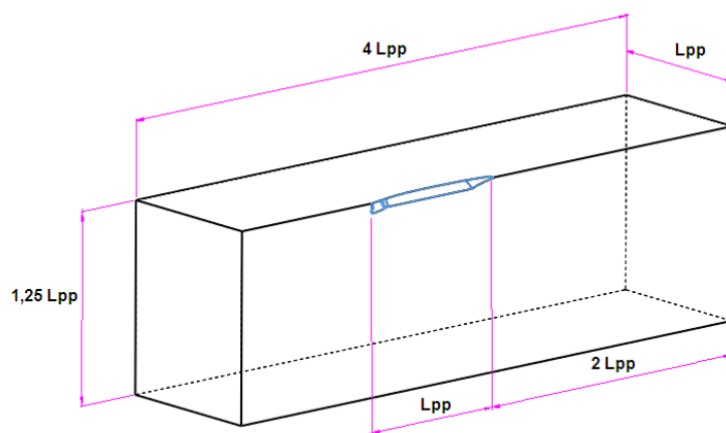
A qualidade da geometria influencia diretamente na precisão da construção da malha e no resultado da simulação, conferindo a esta etapa atenção minuciosa a detalhes. Falhas de construção, desconexão de curvas e pontos devem ser observados e devidamente reparados utilizando as ferramentas presentes no pacote STAR CCM+ ou então em outro modelador CAD.

A elaboração do modelo e a construção do ambiente de simulação são os elementos básicos constituintes da geometria. Inicialmente importou-se o casco no formato IGES para o Star-CCM+. Nota-se que para a análise CFD, utilizou-se o casco com maior deslocamento possível de 7 toneladas (Caso 3), buscando uma abordagem conservadora para o projeto.

No módulo geométrico do STAR-CCM+, a geometria importada foi levemente modificada em relação à suavização dos contornos da embarcação (arredondamentos das quinas e suaves aumentos nas espessuras na extrema popa e proa), permitindo que tolerâncias de contato de malha pudessem ser aplicadas à estas. Tais mudanças, são necessárias para garantir que a malha seja contínua ao longo do corpo inteiro de forma que a camada limite seja bem representada.

Em relação ao ambiente de simulação (domínio computacional), Bucan et al (2011) sugere atribuir valores para as dimensões como uma função do comprimento entre perpendiculares do modelo, como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Domínio Computacional



Fonte: Araujo, Marcos appud Bucan (2011)

Desta forma, a partir do comprimento entre perpendiculares do Ayty (8,5m), obteve-se as dimensões a serem utilizadas no domínio computacional, como podem ser observadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Dimensões do Domínio Computacional

	LPP	Dimensão do domínio (m)
Vante	1	8,5
Ré	2	17
Lateral	1	8,5
Fundo	1	8,5
Topo	0.5	4,25

Fonte: Autor (2017)

O ambiente de simulação gerado apresenta, ao todo, 34m de comprimento, 4,5m de largura e 12,75m de altura, e possui um plano de simetria longitudinal de maneira a reduzir o custo computacional do modelo.

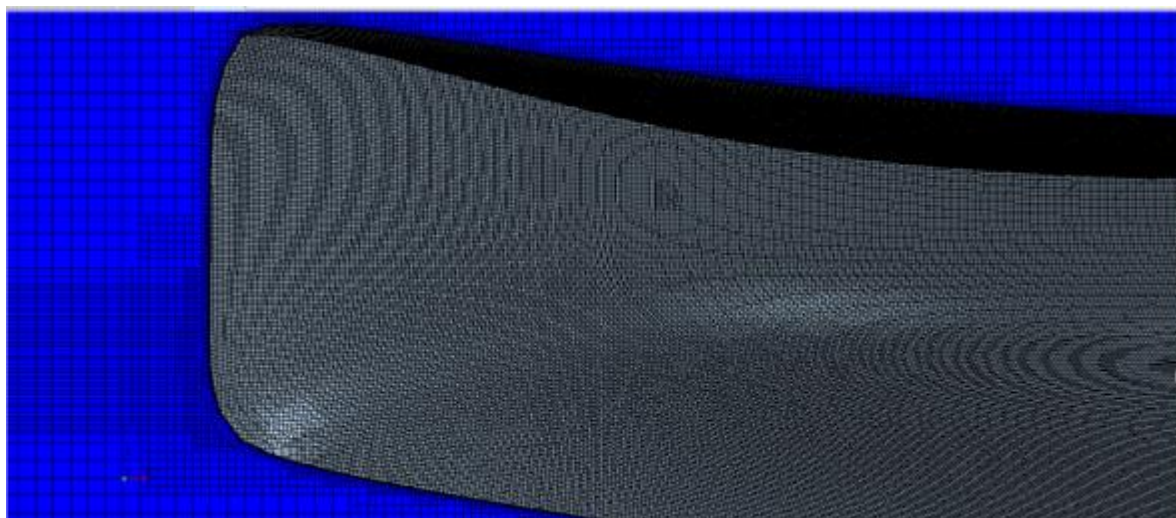
4.4.2. Malha

Visto que a geometria é constituída por dois elementos principais, o modelo e o ambiente de simulação, faz-se necessário gerar a malha para ambos. Para o casco, utiliza-se a malha de superfície, enquanto para o domínio computacional utiliza-se a malha volumétrica.

Deve-se atentar que a região de maior interesse no estudo é o casco, desta forma, a região que demanda mais refinamento é a superfície do casco, seguido pela linha da água.

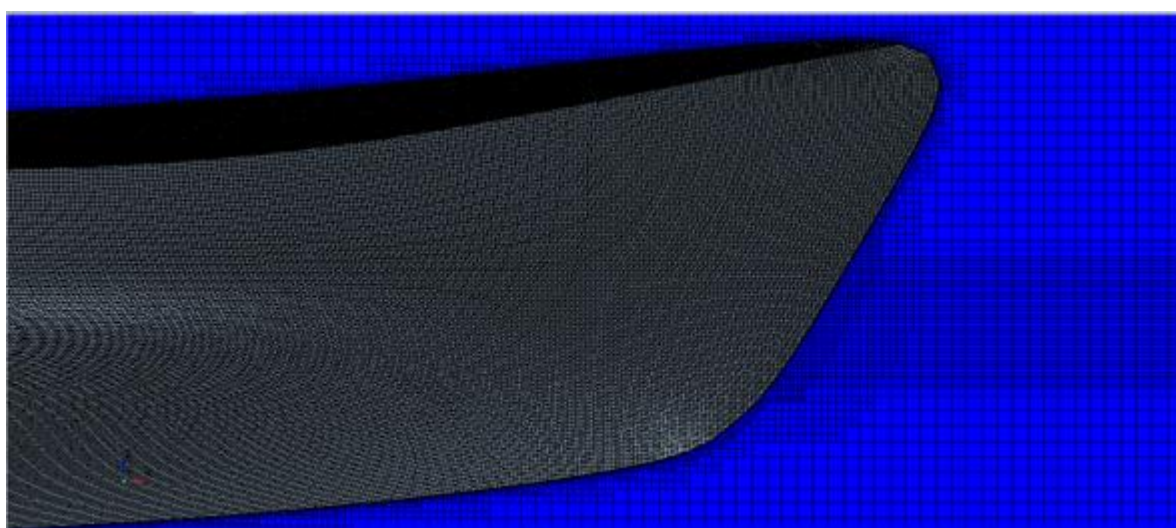
Desta forma, criaram-se três blocos distintos para o refino da malha, conforme pode ser visto nas figuras abaixo. Uma vez que esta etapa afeta diretamente o tempo de simulação, é necessário realizar uma análise de convergência da malha, mudando o número de elementos que a constituem.

Figura 24 – Malha Gerada no Casco (meia nau-popa)



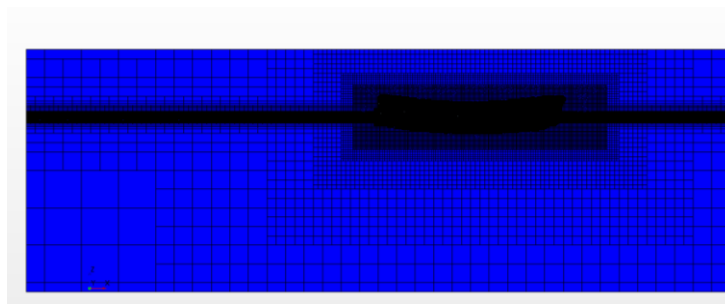
Fonte: Autor (2017).

Figura 25 – Malha Gerada no Casco (meia nau - proa)



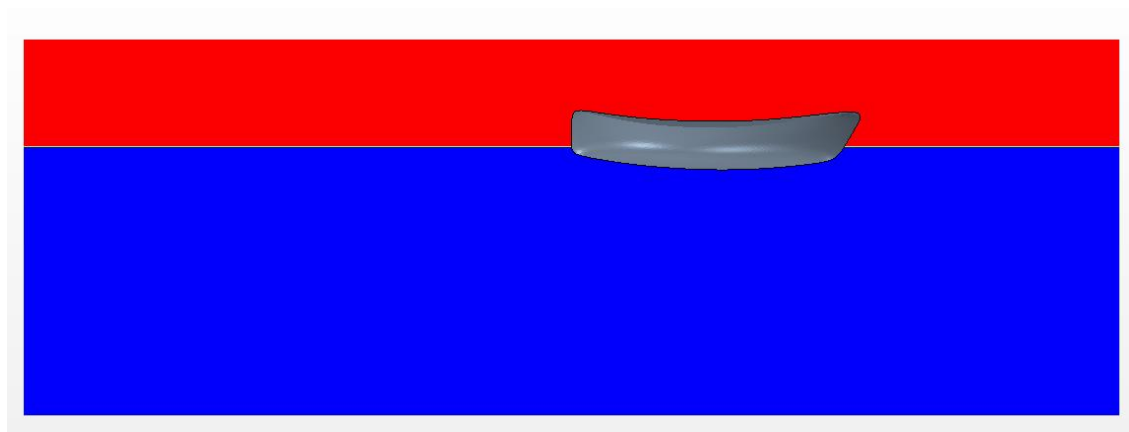
Fonte: Autor (2017).

Figura 26 – Malha Gerada na linha da água (refino maior devido as ondas)



Fonte: Autor (2017).

Figura 27 – Visualização da linha da água



Fonte: Autor (2017).

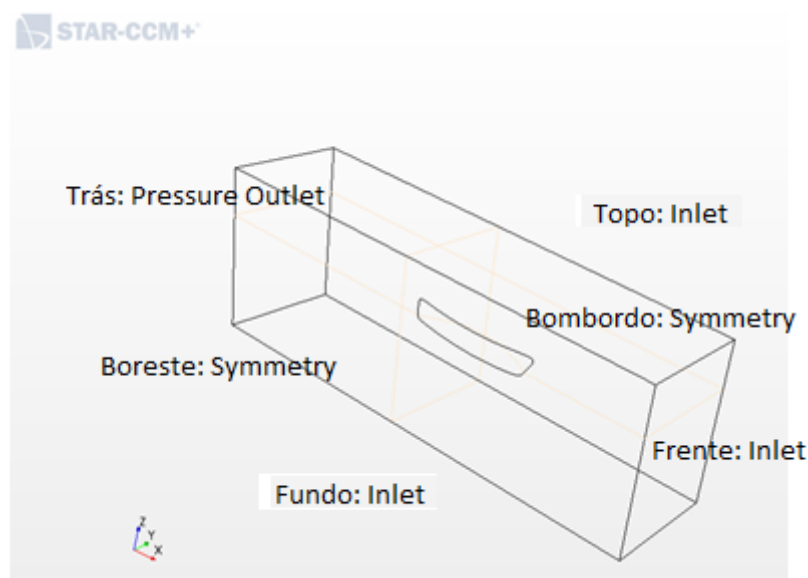
Fazendo um processo iterativo, de simulação e análise de resultados, ao fim, obteve-se uma malha com dois milhões e cem mil elementos. De tal forma, que para o bloco do casco foram utilizados prismas isotrópicos com um refino de 50%, para a linha da água 1 (bloco relativo ao curso da água na altura do modelo), foram utilizados prismas anisotrópicos, com um refino de 80% na direção z e 250% em x e y, uma vez que a direção z é a que mais importa nessa região. E ainda, para o bloco da linha da água 2 (pertinente ao contato da superfície da água com o ar) com um tamanho relativo de 12,5% em z e 100 % em x e y.

4.4.3. Condições de Contorno

Para definir um problema que resulte em uma única solução é necessário especificar informações sobre as variáveis dependentes do escoamento nas fronteiras do problema. Desta forma, definiu-se as condições de contorno essenciais para a solução dos modelos matemáticos

adotados. As condições de contorno aplicadas às suas regiões podem ser observadas na Figura 28.

Figura 28 - Condições de Contorno do problema



Fonte: Autor (2017).

Nos locais onde se faz necessário caracterizar a entrada do fluido no sistema (Fundo, Frente e Topo), se especifica os parâmetros iniciais do escoamento, nomeando-os de Inlet, de forma que as fronteiras terão escoamentos paralelos com a embarcação. Nos lados do volume de controle, são definidos planos de simetria, garantindo que somente metade do casco seja necessário para que a simulação interprete o corpo como um todo. Por fim, na parte de trás do ambiente de simulação, é estabelecida a condição Pressure Outlet, sendo uma função da pressão hidrostática da VOF Wave (modelo de ondulação) definida.

É imprescindível ressaltar que neste tipo de simulação, o corpo é considerado fixo e o fluido que tem velocidade. Além disso, todas as superfícies do casco são definidas como Wall, usualmente conhecida como condição de não-escorregamento, onde a velocidade do escoamento normal à superfície é zero e a tangencial é igual à velocidade da superfície.

4.4.4. Modelos Físicos

A escolha dos modelos físicos é de fundamental importância na simulação, visto que estes devem ser selecionados para melhor representar a natureza do escoamento no modelo.

Em relação aos modelos temporais, faz-se necessário a escolha entre o regime permanente, quando todas as propriedades do fluido não variam com o tempo, e transiente, quando as propriedades dependem o tempo. Visto que as propriedades do fluido, em um determinado ponto do escoamento variam, adota-se a condição de regime transiente. Salienta-se que quando uma simulação em regime transiente é realizada, os resultados de regime permanente também serão obtidos ao fim da simulação, desde que exista a convergência da simulação (PIMENTA, 2011).

Em relação ao modelo de turbulência, optou-se pela utilização do modelo K-epsilon, que já é o mais utilizado para análises CFD que representa o escoamento multifásico no entorno de corpos. Esse modelo foi desenvolvido visando melhorar a descrição algébrica dos fluxos de média e alta complexidade, descrevendo a turbulência como meio de duas equações de transporte (K e épsilon (ϵ)). O “K”, é denominado energia cinética turbulenta, caracterizando a equação responsável pela energia na turbulência. Enquanto o “ ϵ ” refere-se à dissipação da energia cinética turbulenta. As equações referentes a estes, estão presentes no Apêndice F.

4.4.5. Resultados

A solução da simulação é definida pelo time step, máximo número de iterações e o máximo tempo físico. Quanto menor o time step, e maior o número de iterações e tempo físico, mais tempo a simulação irá durar. Então, para economizar tempo computacional, foi escolhido um time step de 0,02 s.

Na Tabela 14 estão dispostos os valores de potência encontrados a partir da análise da resistência ao avanço pelo método CFD⁵, respectivos ao intervalo de 1 a 8 nós. Salienta-se que para cada velocidade, foi realizada uma simulação com duração média de 3 a 4 dias (Apêndice G). O gráfico respectivo a esta análise, pode ser visualizado na Figura 29.

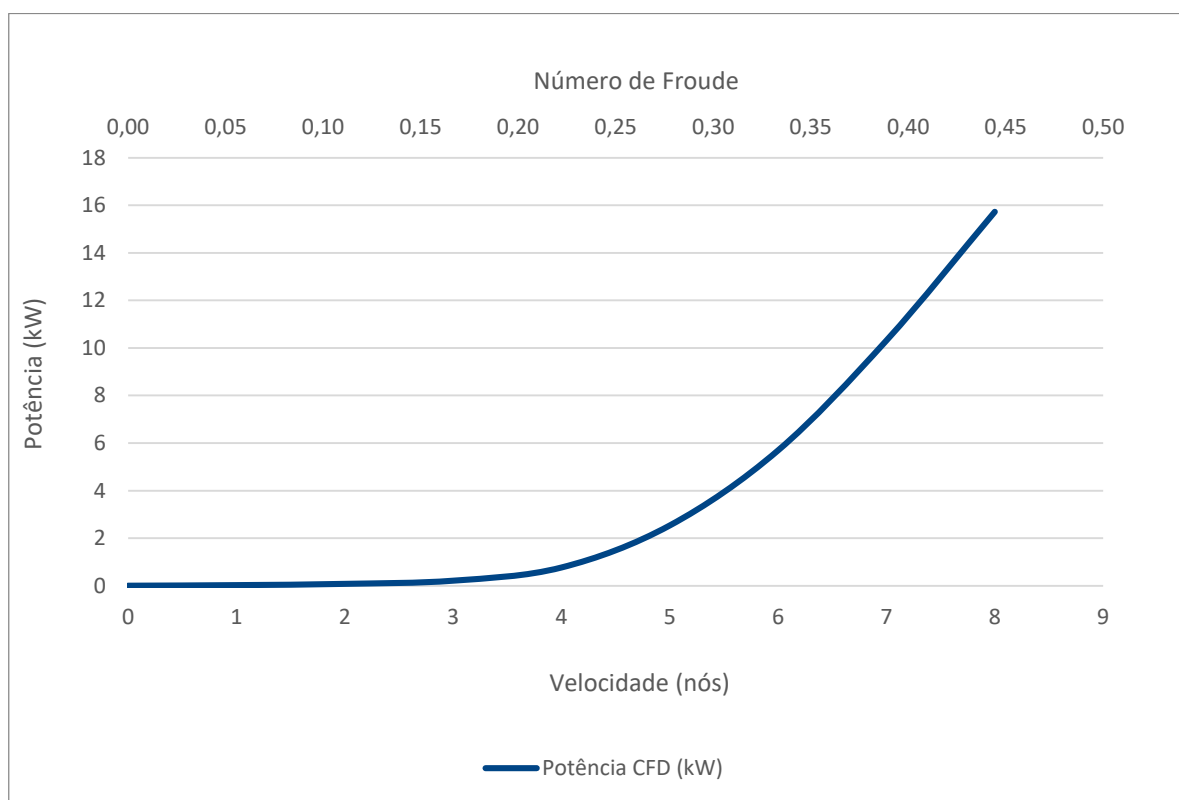
⁵ Os resultados da análise CFD são dispostos em função da resistência. Para conversão para Potência, utilizou-se o equacionamento referente a potência efetiva descrito no índice 2.4.3

Tabela 14 – Resultados da Análise CFD

V (m/s)	V (nós)	Potência CFD(kW)
0,51	1	0,02
1,03	2	0,08
1,54	3	0,21
2,06	4	0,77
2,57	5	2,53
3,09	6	5,69
3,60	7	10,31
4,12	8	15,72

Fonte: Autor (2017).

Figura 29 – Potências resultante da análise CFD



Fonte: Autor (2017).

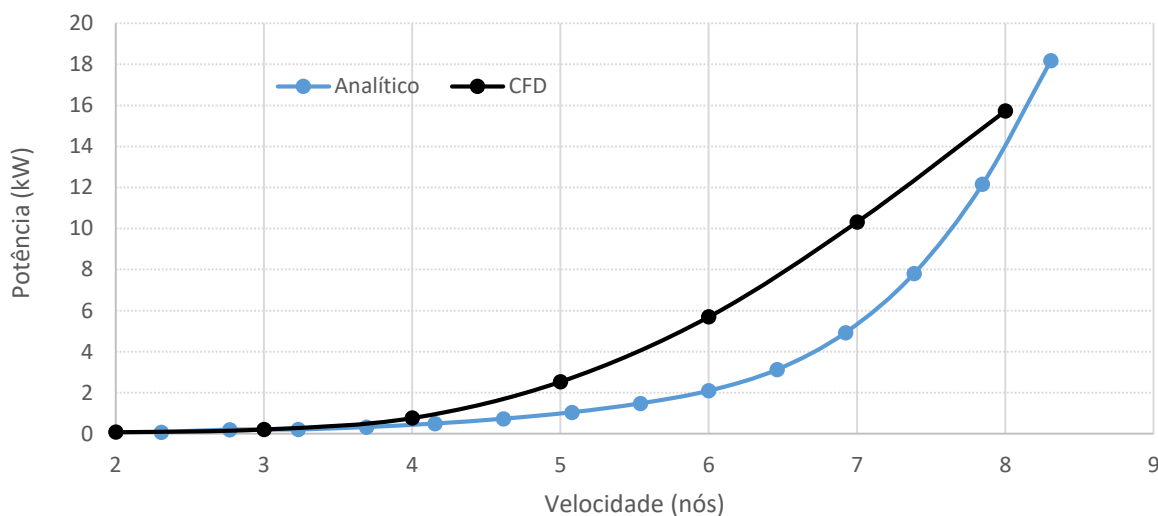
4.5. Comparação Resistência

O método analítico tem como vantagem a rápida implementação e a facilidade de utilização das ferramentas, sendo, por isso, menos custoso e mais tradicional. Por outro lado, pode acarretar em erros provenientes de geometrias diferentes quando comparadas com às da série.

Já o método computacional exige tempo de processamento, licença de software, e seu ajuste é mais delicado, mas em contrapartida a análise leva em conta o real formato da geometria.

Os resultados de potência obtidos analítica e computacionalmente, mostrados na Figura 30, apresentam valores condizentes para baixas velocidade, mas diferentes na faixa de interesse de 5 a 8 nós.

Figura 30 – Comparação Série Delft (analítico) e Star-CCM (CFD)



Fonte: Autor (2017).

Possíveis motivos para diferença observada entre os métodos podem ser resultado de:

- Modelagem geométrica não correspondente com os cascos da série DELFT. Embora os parâmetros limitantes da série sejam atendidos, a forma geométrica e a curvatura dos cascos testados podem ter variação considerável em relação ao casco gerado no Rhinoceros© para representar a geometria a ser analisada.
- A localização do LCG da embarcação foi considerada como localizado exatamente a meia nau para ambos os métodos. No método empírico, isso acaba causando a anulação de termos nas formulações de resistência que poderia resultar em aumento da mesma. Já na análise computacional, isso pode ocasionar variações significativas na resistência, principalmente quando se refere a variação de trim durante o avanço, causando assim resultados maiores que o esperado.

- Baixo refinamento da malha devido ao tempo de processamento e a modificação de geometria como exclusão de cantos vivos e arredondamentos de proa e popa.
- Estimativa de área molhada realizada computacionalmente (Orca3D) para o processo analítico pode não condizer com a realidade. Entretanto, utilizou-se a mesma para o a análise CFD.
- Em ambas as abordagens não foram consideradas a resistência de ar, apêndices e iteração casco-hélice.
- Em ambas as abordagens não foram consideradas resistências adicionais causados por baixa profundidade, caso comum em saída e entrada de porto. Também não foram consideradas resistências adicionais por presença de maré e onda.
- A distribuição de peso que possa causar ângulo de trim ou banda pode influenciar negativamente na resistência ao avanço.

Apesar de todas as correções feitas no casco, o casco modelado não é o real, é um modelo gerado pelo próprio orca. Desta forma, a análise computacional carrega o erro de modelagem envolvido no formato do casco. Contudo, o casco também não é Delft, fazendo com que ambos os modelos utilizados para avaliar a resistência ao avanço apresentem problemas intrínsecos.

A escolha do método a ser adotado é uma decisão estratégica de observar a maior fonte de erro nas análises. Entretanto, optou-se pelo conservadorismo no sentido de satisfazer de todo modo a potência mínima necessária para embarcação atingir a velocidade de serviço.

4.6. Seleção Motor

A seleção do motor depende diretamente dos valores de potência efetiva obtidos através da estimativa da resistência ao avanço. Como descrito na seção 2.4.3, ainda deve-se atentar a utilização de algumas eficiências principais: eficiência propulsiva, eficiência de transmissão e do motor.

Para esta análise, considerou-se o casco com maiores valores resultantes de potência apresentados anteriormente, objetivando atender a potência requerida na condição crítica de trabalho da embarcação.

Visto que na primeira etapa da espiral, alguns valores de eficiência ainda não estão bem definidos, como é o caso da eficiência do motor; que depende diretamente do fabricante, optou-se por utilizar valores médios encontrados na literatura.

A eficiência do motor de indução depende da potência, porque os motores grandes que consomem alta potência são projetados para eficiências maiores do que os pequenos. Assim, motores com mais de 500 HP possuem eficiência em torno de 93% no projeto padrão e cerca de 96% no projeto de alta eficiência. (PATEL, 2012).

A eficiência e o fator de potência de um determinado motor de indução dependem do nível de carga, desta forma, para motores com potência inferior a 100 HP, a eficiência geralmente está em torno 75% a 85%. (PATEL, 2012).

A eficiência de hélices bem projetados varia de 50 e 75% (MOLLAND, 2011). Entretanto, optou-se por utilizar a eficiência estudada do próprio hélice do Ayty para esta análise (descrita na seção 4.8). A eficiência considerada para o hélice foi de 59%.

A eficiência de transmissão mecânica encontrada em sistemas com tração usualmente elétrica, está em torno de 95 a 98% (OLIVEIRA, 2013).

Desta forma, utilizando os piores valores de eficiência possíveis (75% para o motor e 95% para transmissão), além da eficiência estimada do hélice propulsor, obteve-se a potência requerida do motor, a qual é mostrada na Tabela 15.

Tabela 15 – Potência Requerida pelo Motor mediante considerações de eficiência

Velocidade	Potência Efetiva CFD (Caso 3)	Potência Requerida Motor (BHP)
(nós)	(kw)	(kw)
6,0	5,69	11,94

Fonte: Autor (2017).

Observa-se que esta análise compreende somente a velocidade de serviço da embarcação. É importante deixar claro que a velocidade máxima desejada pelo armador, seria de 8 nós. Porém, este deixou claro que não era essencial alcançar a mesma, caso isto acarretasse aumentos consideráveis no orçamento do projeto. Por conseguinte, optou-se por selecionar um motor de 15kW, de forma a atender a potência exigida para velocidade de serviço e, também, atingir velocidade de 7 nós para a condição do casco deslocando 7 toneladas, com LCG posicionado exatamente a meia nau.

Considerando o fato que a embarcação possuía anteriormente um motor de 40HP (aproximadamente 30kW), a baixa potência encontrada tornou-se um fator de extrema

desconfiança inicial. Desse modo, analisou-se a potência instalada em diferentes embarcações elétricas dispostas na literatura, conforme pode ser observado no Apêndice H.

Sabendo que as embarcações disponíveis, apresentam valores muito divergentes de deslocamento, velocidade de serviço e, em alguns casos, até mesmo de comprimento, fazer uma análise regressiva geraria dados inconsistentes e duvidosos. Desta forma, focou-se nas embarcações que apresentavam características, como comprimento e deslocamento, mais próximas do veleiro Ayty.

A embarcação Shannon (38 pés e 8,165 toneladas), mesmo com comprimento e deslocamento um pouco superiores às da embarcação de análise, apresentou potência instalada de 15kW. A Tabela 16 apresenta dados relativos a potência (BHP) desenvolvida pela embarcação Shannon em operação, juntamente com os dados de potência (BHP) requerida para o Ayty.

Tabela 16 – Potência Shannon x Estimada Ayty

Velocidade	Potência Shannon (BHP)	Potência CFD Requerida Motor (BHP)
(nós)	(kW)	(kW)
2,0	0,4	0,16
3,0	1,07	0,44
4,0	2,13	1,6
5,0	4,27	5,3
6,0	8,5	11,94

Fonte: Autor (2017).

Nota-se que mesmo apresentando deslocamento um pouco superior, as potências desenvolvidas pela Shannon até a velocidade 6 nós ficaram inferiores a 10kW. Comparando os resultados, é possível perceber que os resultados obtidos para a potência do Ayty, apresentam acréscimo exponencial mais agudo do que o Shannon, isto pode estar relacionado tanto com a modelagem do casco, quanto com algumas condições de operações reais já explicitadas anteriormente.

Visto que as demais embarcações não apresentam dados sobre a potência em relação a velocidade com o mesmo rigor da primeira, estas foram analisadas somente em relação ao deslocamento e comprimento. A embarcação Lidgard (47 pés e 8,2 toneladas), apresenta potência instalada de somente 7,5kW.

Desta forma, as desconfiças referentes a potência dimensionada de 15kW se tornaram uma questão superada. Devido aos padrões de eficiência, confiabilidade, densidade

de potência, custo e maturidade de tecnologia, optou-se pela seleção de um motor de indução de corrente alternada.

Sabendo da competência e destaque no setor de desenvolvimento de motores elétricos da empresa WEG, buscou-se por selecionar um motor desenvolvido pela empresa que atendesse aos requisitos da embarcação.

A WEG apresenta diversas soluções para motores elétricos com aplicação naval com a linha WGM, arrefecidos por manto d'água, os quais apresentam volumes e pesos reduzidos quando comparados com motores de mesmas potências e arrefecidos a ar. No entanto, a linha trabalha com potência mínima de 315 kW. A WEG informou que fabricaria sob encomenda um motor de 15 kW arrefecido por manto d'água para a aplicação no projeto.

Algumas especificações iniciais já foram definidas: a tensão de trabalho do motor foi determinada em 72V, a corrente em 170Ah, e a potência em 15kW.

4.7. Seleção Bateria

O projeto do banco de baterias para uma aplicação elétrica geral, segundo Patel (2012), deve seguir as seguintes etapas:

1. Selecionar a eletroquímica adequada para os requisitos gerais do sistema.
2. Determinar o número de células necessárias para atender aos requisitos de voltagem.
3. Determinar a descarga Ah necessária para alimentar a carga (isto é, corrente de carga × duração).
4. Para o número requerido de duração do ciclo c / d, determinar a máxima profundidade de descarga.
5. A capacidade Ah da bateria é então determinada dividindo o Ah descarga necessária para alimentar a carga pela profundidade de descarga permitida (isto é, resultado do passo 3 ÷ resultado do passo 4).
6. Determinar as taxas de carga e descarga e os controles necessários para proteger contra sobrecarga ou excesso de descarga.
7. Determinar o aumento da temperatura e o requisito de resfriamento térmico.
8. Determinar a necessidade de ventilação da sala da bateria.

Deve-se salientar, que no presente trabalho o intuito é selecionar o banco de baterias adequado ao sistema elétrico proposto. Desta forma, não engloba o projeto de um banco de

baterias como um todo, limitando-se a seleção da eletroquímica, determinação do número de células necessárias a atender ao requisito de profundidade e a descarga necessária para alimentar a carga (passos 1, 2 e 3). Os demais passos estão aliados a produção da bateria como um todo e são satisfeitos pela empresa que a produz, garantindo que ela tenha um bom funcionamento.

A seleção da eletroquímica depende diretamente da aplicação, visto que cada sistema possui demandas específicas de funcionamento, que se não forem atendidas, acarretam em um mal funcionamento e/ou degradação rápida do sistema.

Desta forma, deve-se elencar as características de funcionamento do veleiro Ayty que acarretarão na seleção da melhor eletroquímica para este caso, sendo elas:

1. Custo: visto que existe um orçamento limitado para desenvolvimento do sistema elétrico da embarcação, o fator custo é extremamente relevante.
2. Autodescarga: visto que o veleiro será usado esporadicamente no ano, cerca de 1 vez a cada 3 meses, é importante que a eletroquímica selecionada não possua alto teor de autodescarga.
3. Atender a demanda de 72V do motor.
4. Atender a demanda de 170 Ah do motor.

Visto isto, realizou-se uma comparação entre as tecnologias disponíveis. Vale salientar, que a bateria de sódio foi descartada da comparação, visto que a mesma não foi encontrada comercialmente para esta aplicação em virtude de ser uma tecnologia muito recente.

A Tabela 17 apresenta dados como, ciclo de vida, vida útil, auto descarga e custo das diferentes eletroquímicas existentes nas baterias recarregáveis. A Tabela 18 apresenta as principais características discutidas no Apêndice D para facilitar a seleção da eletroquímica ideal para o Ayty.

Tabela 17 – Comparação entre as diversas baterias

Eletroquímica	Ciclo de Vida (em descargas completas)	Vida Útil em Anos	Auto Descarga (em % por Mês a 25°C)	Custo Relativo (dolares/kWh)
Chumbo-Ácido	500-1000	5-8	3-5	200-300
Níquel-Cádmio	1000-2000	10-15	20-30	300-400
Níquel-Hidreto Metálico	1000-2000	8-10	20-30	400-600
Lítio-Ion	1500-3000	8-10	5-10	500-800
Lítio-Polímero	1000-1500	n/a	1-2	>2000

Fonte: Adaptado de Patel (2012).

Tabela 18 – Vantagens e desvantagens das diversas baterias

Eletroquímica	Vantagens	Desvantagens	Destaque
Chumbo-Ácido	Baratas; Tecnologia Madura; Auto Descarga baixa; Baixa manutenção; Carga Rápida;	Baixa densidade de energia; Riscos Ambientais; Não pode ser armazenada descarregada;	Elevada capacidade de reter carga por longos períodos, o que as torna ideais para aparelhos intermitentes
Níquel-Cádmio	Ciclo de vida elevado; Bom desempenho a altas e baixas temperatura; Vida útil longa; Carga Rápida;	Elevado efeito de memória; Baixa densidade de energia; Riscos Ambientais; Elevada autodescarga;	Trabalha melhor em cargas rápidas e pulsadas
Níquel-Hidreto Metálico	Melhorias na densidade de energia; Segurança Ambiental. Vida útil longa; Ciclo de vida elevado;	Elevado efeito de memória (apesar de menor do que as de Ni-Cd); Elevada autodescarga; Preço significativo;	Trabalha melhor em cargas rápidas e pulsadas
Lítio-Ion	Elevada potência e densidade de energia; Tensão de Célula maior; Taxa de descarga relativamente baixa; Baixa Manutenção; Ciclo de vida elevado;	Requer circuito de proteção; Custo elevado; Tecnologia não está plenamente desenvolvida; Moderada corrente de descarga;	Destaca-se para aplicações com tamanho reduzido devido à alta densidade de energia
Lítio-Polímero	Mais leve que qualquer outra; Mais segura; Elevada potência e densidade de energia (menor que a de Lítio-ion);	Ciclo de vida menor que a de Lítio-Ion; Custo muito elevado;	Destaca-se para aplicações com tamanho reduzido devido à alta densidade de energia

Fonte: O Autor (2017).

A partir da análise dos dados segmentados nas tabelas vistas acima, optou-se pela utilização da decisão multicritério para seleção final da bateria. Os problemas complexos de tomada de decisão são comuns nas diversas áreas. Desde tempos mais remotos o homem tenta resolvê-los, apoiando-se em abstrações, heurísticas e raciocínios dedutivos, com o objetivo de orientar e validar as suas escolhas (GOMES, ARAYA e CARIGNANO, 2004).

A abordagem multicritério de apoio à decisão pode ser caracterizada como um conjunto de métodos que buscam tornar claro um problema, no qual as alternativas são avaliadas por múltiplos critérios, os quais na maioria dos casos são conflitantes (GOMES, ARAYA e CARIGNANO, 2004). De acordo com Diehl apud Marins e Cozendey (2005), esse tipo de abordagem não apresenta uma solução ideal para os problemas, mas entre todas as possíveis, a mais coerente com a escala de valores e o método utilizado.

Tratando o problema de seleção de equipamentos críticos para o processo, de escolha da melhor ou melhores alternativas, será utilizado o método AHP (Analytic Hierarchy Process) para esta aplicação. A matriz AHP procura esclarecer a decisão por intermédio da escolha de um subconjunto que seja restrito o máximo possível e que contenha as melhores alternativas.

Para elaboração da matriz AHP, inicialmente se denotam pesos para cada característica que será avaliada, variando de 1 a 5. Para exemplificar, o custo é um fator crucial do projeto, logo, seu peso será máximo: 5. Em seguida, são atribuídos valores referentes a cada característica para cada eletroquímica, variando de 0 a 1. Por exemplo, como a bateria de chumbo ácido é muito barata em relação as demais, sua nota será 0,9.

Por fim, realizou-se a soma de todas as características multiplicadas pelos seus respectivos pesos. Desta forma, a solução que apresenta maior soma será a mais eficiente dentro dos interesses de maior importância para o projeto. Na Tabela 19 pode ser vista a matriz AHP referente a seleção da eletroquímica.

Tabela 19 – Matriz AHP para Seleção da Eletroquímica

	Custo	Autodescarga	Efeito Memória	Densidade de Energia	Risco Ambiental	SOMA
Chumbo Ácido	0,9	0,8	0,7	0,3	0,3	11,0
Níquel-Cádmio	0,6	0,3	0,3	0,5	0,4	6,9
Níquel Hidreto	0,4	0,3	0,4	0,6	0,6	6,8
Lítio Ion	0,3	0,8	0,9	0,9	0,7	10,6
Lítio Polímero	0,1	0,8	0,9	0,8	0,9	9,8
Pesos	5	4	3	2	2	

Fonte: Autor (2017).

Desta forma, a bateria de Chumbo-Ácido foi selecionada. Isto deve-se, principalmente, ao fato que a bateria de Pb-Acid atende em excelência os dois principais requisitos mencionados anteriormente: custo e mínima auto descarga.

Entretanto, existem diversas soluções de bateria de chumbo ácido. Visto, isto, decidiu-se por investigar embarcações elétricas, essencialmente veleiros, já em utilização. Para esta investigação, houve a necessidade de visitar diversos fóruns e sites de motores elétricos, com

publicações dos próprios proprietários dessas embarcações, visto que não foram encontrados dados na literatura.

Como pode ser observado no Apêndice H, das 12 embarcações encontradas, somente 8 embarcações haviam informações sobre o tipo de bateria usada. Destas, 6 utilizavam a solução de bateria chumbo ácido AGM, e somente duas utilizavam lítio-ion. Importante salientar, que estes dados convergem com os resultados obtidos na matriz AHP, visto que as duas soluções que se apresentaram mais vantajosas foram estas (de forma bem próxima).

Visto isto, a bateria selecionada para o veleiro AITY foi a Chumbo-Ácido AGM. Desta forma, foi selecionada uma configuração capaz de atender a demanda de 72V e 170Ah do motor.

4.8. Seleção do Hélice Propulsor

A seleção do propulsor é feita, tradicionalmente, de modo iterativo e em conjunto com a escolha do motor. Os parâmetros a serem determinados são: número de pás (Z), diâmetro (D), razão passo por diâmetro (P/D), razão de áreas expandida (A_e/A_o) e rotação (n).

De acordo com a Revista Náutica (2013), o número de pás recomendado para veleiros é de 2 a 4, sendo mais usual os hélices de 2 e 3 pás. Quanto maior o valor deste parâmetro, menor o risco de cavitação. Já para a razão de áreas A_e/A_o , quanto maior for o seu valor, menor o risco de cavitação, porém o rendimento do hélice em geral é menor devido às perdas por atrito (MOLLAND, 2011). Logo, deve-se procurar uma combinação ótima dos parâmetros a fim de respeitar os critérios de cavitação e ainda ser capaz de proporcionar a maior eficiência possível.

Com o auxílio de uma planilha eletrônica fornecida por Mendes (2015), realizou-se o procedimento descrito na seção 2.8 para diversas combinações entre os parâmetros do hélice, ou seja, foi variado de forma sistemática o número de pás, a razão de áreas, a razão de passo-diâmetro e até mesmo o próprio diâmetro do hélice (Tabela 20). Simultaneamente, cada combinação foi avaliada nos critérios de cavitação, até que o maior rendimento em águas abertas fosse encontrado.

Tabela 20 – Variação dos parâmetros.

Parâmetro	Faixa Avaliada
Z	2 – 3
D	0,2 – 0,6
Ae/Ao	0,3 – 1,05
P/D	0,5 – 1,4

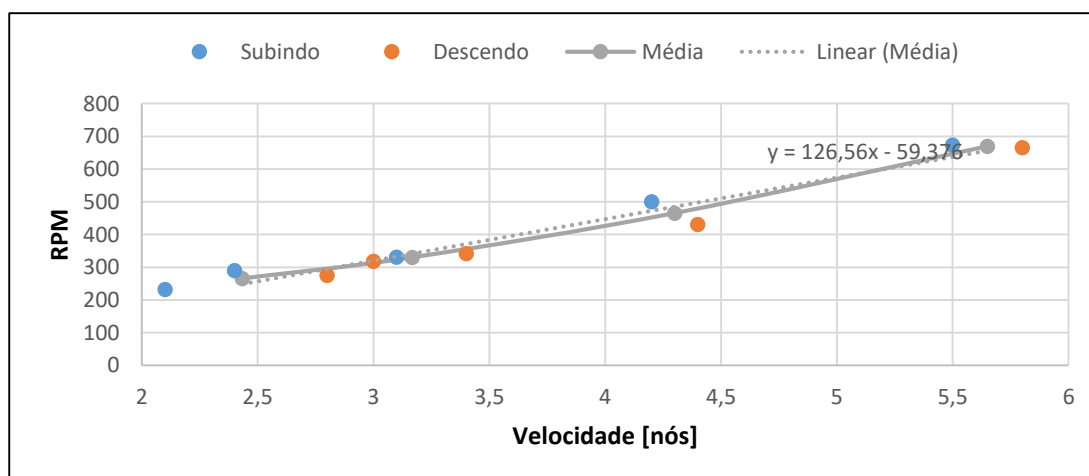
Fonte: Autor (2017).

As faixas avaliadas foram selecionadas em virtude de alguns fatores de projeto, dentre eles:

- Número de pás: número usual em veleiros de recreio (Revista Náutica, 2013).
- Diâmetro: diâmetros inferiores ao calado da embarcação, e encontrados em embarcações semelhantes;
- Ae/Ao: faixa respectiva a série B;
- P/D: faixa respectiva a série B.

No Apêndice I, podem ser vistos os resultados obtidos para as todas as combinações de parâmetros analisadas. Em paralelo, realizou-se um ensaio com um tacômetro na embarcação operando com o motor a diesel, subindo e descendo o rio, apresentados graficamente na Figura 31 e numericamente na Tabela 21.

Figura 31 – Ensaio Tacômetro



Fonte: Autor (2017).

Tabela 21 – Resultados Ensaio Tacômetro

VELOCIDADE	RPM MÉDIAS	RPM INTERPOLAÇÃO
2	193,744	200,731
3	320,304	323,441
4	446,864	446,151
4,5	510,144	507,506
5	573,424	568,861
5,5	636,704	630,216
6	699,984	691,571
6,5	763,264	752,926

Fonte: Autor (2017).

Este ensaio foi realizado para verificar rotação presente no eixo propulsor, de forma a complementar as demais informações presentes no memorial de cálculo do Ayty referentes ao hélice, como ilustra a Tabela 22.

Tabela 22 – Parâmetros conhecidos para o hélice da embarcação Ayty

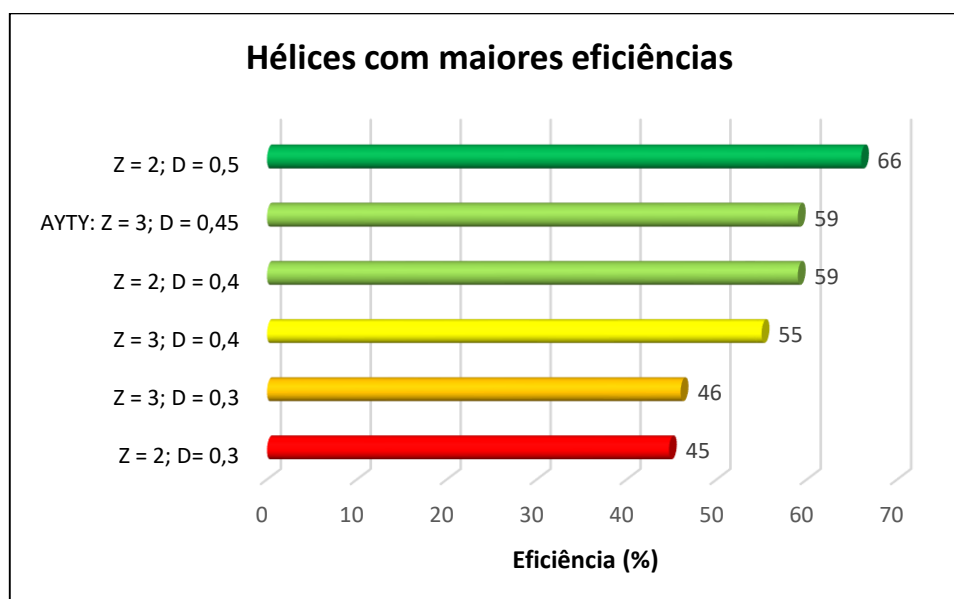
Parâmetros	
Número de Pás (Z)	3
Diâmetro (D)	0,45
Rotação (n)	699

Fonte: Autor (2017).

A partir dos parâmetros conhecidos, realizou-se uma análise iterativa de forma a conhecer a eficiência do hélice presente na embarcação, de forma que as rotações se aproximassem da rotação medida no ensaio do tacômetro. Desta forma, constatou-se que a eficiência do hélice em uso, está em torno de 59% (Apêndice J).

Comparando este valor, com os demais analisados (Figura 32), constata-se que a troca ou investimento em um novo hélice não se mostra vantajosa, uma vez que as maiores eficiências encontradas (que são aprovadas no teste de cavitação), não ultrapassam esse valor em mais do que 5% como um todo, ou até mesmo 7% na melhor condição possível (2 pás, diâmetro de 0,5 e passo-diâmetro de 0,7).

Figura 32 – Comparação Hélices aprovados no teste de Cavitação



Fonte: Autor (2017).

O gráfico da Figura 32 mostra somente as combinações que apresentavam maior eficiência para um mesmo diâmetro e número de pás, e que ao mesmo tempo, fossem aprovadas no teste de cavitação.

Ampliando esta análise, os hélices de 2 pás, de acordo com a Revista Náutica (2013), são mais utilizados em veleiros e lanchas de competição, visto que apesar do aumento na eficiência, aumenta-se a vibração.

Desta forma, os hélices de 3 pás, mesmo que apresentem uma eficiência um pouco inferior, são indicados para embarcações de passeio, com o intuito de recreação, visto que apresentam menor vibração e, conseqüentemente, uma navegação mais confortável, sem a presença de ruídos e, ainda, aceleração mais rápida.

Por conseguinte, optou-se por continuar com o hélice presente na embarcação, tanto pelas vantagens de navegação, aliadas ao propósito do veleiro Ayty, quanto pelo custo envolvido, onde não será necessário se investir em um novo hélice.

4.9.Planta Elétrica

Uma vez definidos os principais equipamentos que compõem o sistema elétrico, deve-se estabelecer o arranjo elétrico para funcionamento do sistema. Para tanto, deve-se entender o comportamento da tensão e da corrente em cada componente, desde a captação até o fornecimento da energia para o motor.

O banco de baterias fornece energia na forma de corrente contínua, desta forma, faz-se necessário um inversor de frequência para converter esta energia em corrente alternada, alimentando o motor a 170Ah.

O controle de potência do motor, por sua vez, é feito a partir de um potenciômetro de posição associado a um controlador de velocidade. Desta forma, conforme a embarcação precisa aumentar a velocidade, demandando mais potência, estes dispositivos trabalham em conjunto para acionar o motor.

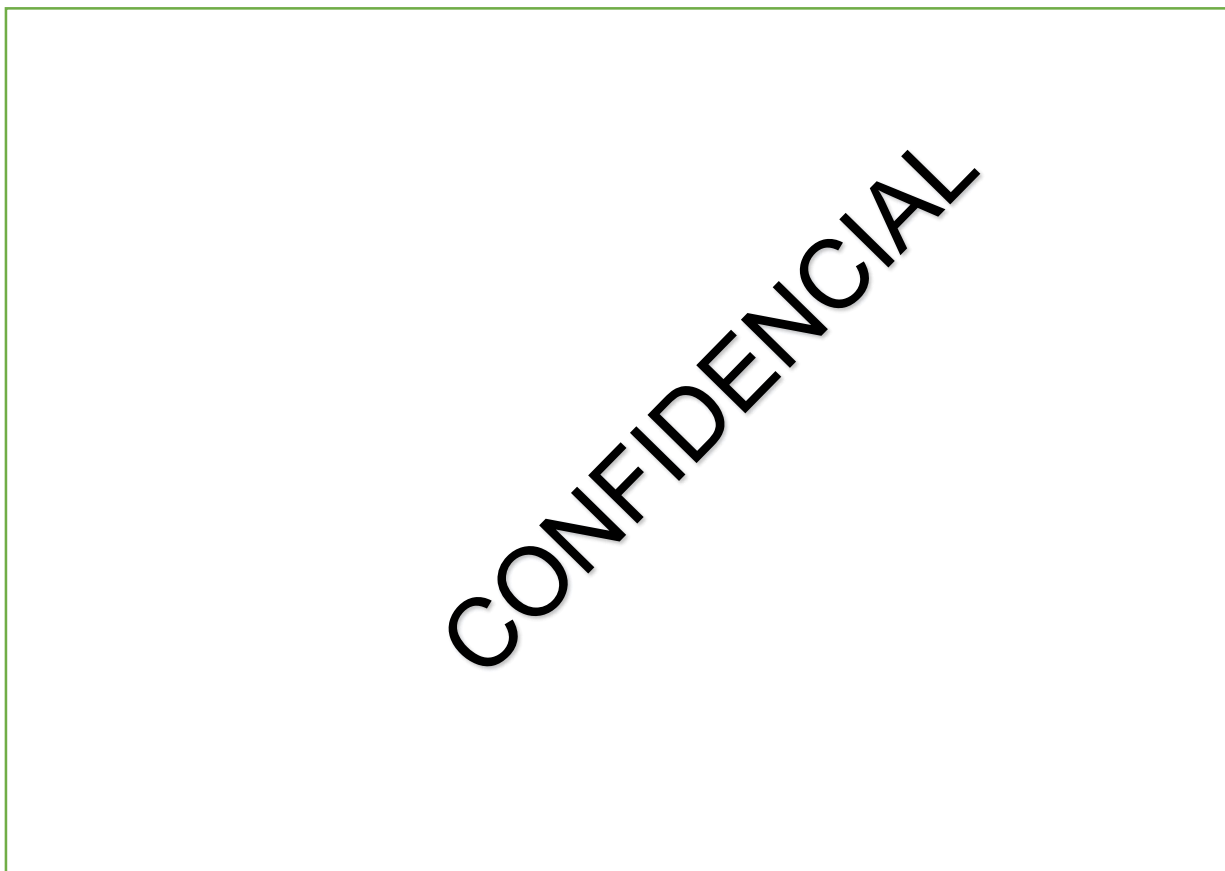
No arranjo (Figura 33) é possível ver as tomadas de cais, que serão uma alternativa (shore power) de recarga energética das baterias para quando a embarcação está atracada no cais. Logo após as tomadas de cais, é possível ver a presença do QuiQ1500, um carregador responsável por garantir que a tensão de trabalho vinda da tomada de cais (220V ou 110V) chegue no circuito da embarcação na mesma tensão de trabalho do motor (72V).

Por segurança, ainda foi integrado no sistema um gerador diesel-elétrico, caso a energia armazenada nas baterias não seja capaz de suprir a embarcação por algum motivo, seja ele, condições adversas ou tempo em mar maior do que o previsto.

Por fim, observa-se a inclusão de um transformador seguido por um retificador, que são responsáveis por garantir que a frequência, corrente e tensão de trabalho do gerador estejam alinhadas com a do sistema.

Nota-se a presença de um painel de chaveamento entre o motor, baterias, tomada de cais e gerador diesel-elétrico. Este, é responsável por alterar a forma de recebimento de energia do motor. Quando em mar aberto, o motor estará conectado diretamente as baterias, entretanto, caso estas não sejam suficientes, o chaveamento irá acionar de forma automática o gerador diesel elétrico. Quando a embarcação estiver atracada, é possível acionar de forma manual as tomadas de cais.

Figura 33 – Diagrama Tração Elétrica Ayty



Fonte: NavalCare (2017).

4.10. Pesos e Centros

Tendo em vista que não são conhecidos os pesos referentes a cada item da embarcação e que pesar separadamente cada um é fisicamente inviável, ainda mais pelo fato da embarcação estar em água, tornou-se necessário a realização de algumas premissas para esta análise.

Primeiramente, foi consultado com a empresa fabricante do antigo motor o peso do mesmo (490kg). Sabendo que o deslocamento da embarcação, na pior das hipóteses, é de 7000kg, definiu-se o peso do casco, casaria, e outros itens faltantes, como sendo o deslocamento menos o peso do motor (6510kg).

A posição de referência tomada para o posicionamento longitudinal (eixo “x”) foi a popa. Uma vez que o posicionamento do antigo motor é conhecido, é possível determinar sua posição na embarcação (2,387m). A posição do centro de gravidade do casco e outros itens faltantes, foi admitida como sendo na meia nau da embarcação (5,05m).

Deve-se salientar, que o motor de combustível e água estão inclusos nos outros itens, visto que não se tem o peso exato de ambos, e ainda, serão mantidos nas mesmas posições. O motor de combustível só conterà menor quantidade do mesmo, visto que não será necessário carregar a quantidade de combustível máxima do tanque, somente uma quantidade emergencial. Frisa-se que a diferença de peso entre o tanque cheio e ligeiramente preenchido é pouco relevante perto do peso total da embarcação.

Desta forma, as posições são multiplicadas por suas respectivas massas. O somatório deste produto, dividido pelo deslocamento da embarcação, resulta no centro longitudinal de gravidade (LCG) da embarcação com a propulsão a diesel, como pode ser observado na Tabela 23.

Tabela 23 – Estimativa LCG Propulsão a Diesel

	LCG (m)	Massa (kg)	LCG*Massa(kg.m)
Motor à Diesel	2,39	490	1169
Casco e outros	5,05	6510	32875
Deslocamento:		7000kg	LCG (m): 4,864m

Fonte: Autor (2017).

Posteriormente, repetiu-se a análise para a nova configuração (Tabela 24), necessitando buscar nos catálogos das empresas de cada equipamento, suas respectivas massas. O peso do casco com demais itens se manteve o mesmo, visto que a alteração realizada na embarcação, referiu-se somente a saída do motor e entrada dos equipamentos elétricos.

Tabela 24 – Estimativa LCG Propulsão Elétrica

	LCG (m)	Massa (kg)	LCG*Massa(kg.m)
Motor Elétrico	1,29	59,2	76,19
Casco e Outros	5,05	6510	32875
Gerador	1,17	195	227,76
Caixa Marítima (Carregador+Inversor+Contator)	1,77	17,16	30,41
Baterias	2,39	315	751,91
Deslocamento:		7096kg	LCG (m): 4,786m

Fonte: Autor (2017).

Percebe-se que o LCG estimado permaneceu praticamente inalterado, com uma mudança de somente 0,078m. As premissas da análise foram realizadas somente para que

pudesse ser feita uma comparação entre ambas configurações. Deve-se salientar que se a posição do casco e outros itens fosse alterada, resultaria na alteração para ambos os casos, desta forma, não prejudicou a análise presente, mesmo se tratando de uma premissa grosseira.

Em relação ao peso, é importante ressaltar que mesmo o motor elétrico se apresentando muito mais leve que o motor a diesel, os itens que englobam o sistema elétrico acabam resultando num aumento no peso final da configuração. Neste caso, o aumento foi significativo quando mensurado somente a motorização, de 490kg para 586kg, representando um aumento de 96kg. Entretanto, em relação ao peso total da embarcação, 96kg não se apresenta significativo diante de 7000kg.

A análise para o VCG não foi necessária, visto que o VCG do motor antigo estava centralizadamente posicionado na transversal, e os equipamentos que foram inseridos no arranjo da embarcação, foram posicionados de tal forma que o VCG destes se comportasse da mesma maneira. Não houve nenhum problema, visto que o compartimento destinado a estes equipamentos, não possuía restrições para este tipo de posicionamento.

Desta forma, como houve pouca mudança de LCG e VCG a análise de estabilidade não se justifica.

5. CONCLUSÃO

A temática energética, diretamente relacionada à questão ambiental, aliada a volatilidade do mercado do petróleo e ao desenvolvimento tecnológico das baterias, configura um ambiente propício ao desenvolvimento de embarcações elétricas.

Este trabalho apresentou um estudo sobre a conversão do sistema de propulsão de uma embarcação do tipo veleiro de 33 pés de um sistema de combustão para um sistema elétrico.

O resultado consiste em um projeto auspicioso, que mesmo diante das adversidades de um projeto precursor, pode representar um importante desenvolvimento para o transporte hidroviário e embarcações recreativas, bem como para a Engenharia Naval.

A embarcação foi modelada em CAD respeitando o modelo real, baseando-se nas dimensões e características do casco. Visto isto, a integração casco-hélice se iniciou com o estudo da resistência ao avanço e, conseqüentemente, a estimativa de potência requerida, a partir de duas abordagens: analítica (com auxílio da série DELFT) e fluidodinâmica computacional (com auxílio do software Star-CCM+).

O método analítico tem por vantagem a rápida implementação e a facilidade de utilização das ferramentas, sendo, por isso, menos custoso e mais tradicional. Por outro lado, pode acarretar em erros provenientes de geometrias diferentes à da série. Já o método computacional exige tempo de processamento, licença de software, e seu ajuste é mais delicado, mas em contrapartida a análise leva em conta o real formato da geometria. Visto que ambos os métodos apresentaram problemas intrínsecos em suas abordagens, optou-se por utilizar os resultados provenientes da abordagem CFD, resultando em uma abordagem mais conservadora.

O estudo da resistência ao avanço permitiu que fosse avaliada a motorização necessária para mover o veleiro com a velocidade de cruzeiro 6 nós, alcançando até uma velocidade máxima de 7 nós. Em decorrência pôde-se fazer a seleção de um motor elétrico de 15 kW, assemelhando-se a embarcações elétricas já produzidas na Europa.

O motor elétrico que se apresentou mais vantajoso mediante análise foi o de indução trifásico, destacando-se alguns fatores: eficiência, confiabilidade, densidade de potência, custo e maturidade de tecnologia. Respeitando as características de trabalho do motor, selecionou-se o banco de baterias de chumbo-ácido AGM que mediante análise via matriz AHP. Tal escolha, foi determinada por dois principais fatores: custo e mínima auto descarga. Importante ressaltar

que se a embarcação fosse destinada a grandes travessias (autonomia), o requisito de densidade de energia seria muito mais relevante na análise. Desta forma, deve-se atentar de forma meticulosa as necessidades do armador.

Ao analisar o hélice propulsor que integra a embarcação atual, de forma a compará-lo com diferentes soluções, constatou-se que a mudança do mesmo não implicaria em vantagens que justificassem investimento em uma nova solução.

Por fim, discorreu-se sobre os demais componentes que integram o sistema elétrico, de forma a perfazer a planta elétrica. Verificou-se que a mudança do sistema de propulsão pouco interferiu no equilíbrio longitudinal e transversal da embarcação, visto que ambos os sistemas apresentaram pesos semelhantes e uma pequena variação na posição do centro de gravidade.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- Escaneamento do casco para determinar a forma correta do casco;
- Realização de ensaio de reboque com modelo para aperfeiçoar a estimativa da resistência ao avanço;
- Prova de mar com o modelo com a instalação elétrica para verificar se o projeto atendeu o esperado;
- Estudo paramétrico visando estabelecer um manual para instalação propulsora elétrica de veleiros para diferentes dimensões e razões de aspecto de casco.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, Fernando Antonio Sampaio de. **A reconstrução do Conceito de Projeto Preliminar do Navio**. 1997. 177 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1997.
- AZIZ, A. ; et al. CFD modeling of pin shape effects on capillary flow during wave soldering. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 72, p. 400-410. 2014.
- BERMANN, Célio. **Crise Ambiental e as energias renováveis**. Cienc. Cult. [online] 2008, v. 60, n. 3, p. 20-29. ISSN 0009-6725.
- BERTRAN, Volker. **Practical ship hydrodynamics**. Butterworth-Heinemann. Grã Bretanha, 2000.
- BHASKARAN, Rajesh; COLLINS, Lance. **Introduction to CFD Basics**. p. 17. Disponível em: < <http://www.erac.ntut.edu.tw/ezfiles/39/1039/img/832/3-1-00001-intro-FiniteDifference.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2017.
- BRINATI, Hernani L. **PNV 2324 Instalações De Máquinas Marítimas**. Universidade de São Paulo. 45p., 2010.
- CARNEIRO, R. F. et al. **Aspectos essenciais das baterias chumbo-ácido e princípios físico-químicos e termodinâmicos do seu funcionamento**. Revista virtual de química, Bauru, v. 9, n. 3, mai./jun. 2017.
- CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro De; FERREIRA, Tiago Toledo. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES**. 267-310, 2010.
- CORDEIRO, Antônio. Sistemas de propulsão e auxiliares. **Navegação I – UFPA**. 104p., 2008.
- FONSECA, M. M.; **Arte naval**. 6. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2002.
- GARRIGAN, N. R. **Electric drive technology considerations for aircraft Propulsion**. Cleveland: EnergyTech: 2015. 15 slides, color. Acompanha texto.
- GOMES, L. F. M. A.; ARAYA, M. C. G. & CARIGNANO, C. Tomada de decisões em cenários complexos. São Paulo: Pioneira, 2004.
- GOMES, L. F. M. A.; GOMES, C. F. S. & ALMEIDA, A. T. Tomada de decisão Gerencial: Enfoque Multicritério. Rio de Janeiro: Atlas, 2002.
- GUEDES, Manuel Vaz. **O motor de indução trifásico: seleção e aplicação**. 1 ed. Porto: Universidade do Porto, 1994. 75 p.
- HECKLER, Rafael dos Santos, 2011. **Comparativo das aplicações de motores CC e motores de indução trifásicos**. Universidade do Vale do Peixe – UNIARP.

HELPORCA3D. **User Guide**. Orca3D, 2015.

HERMUNDSTAD, Ole A.; MOAN, Torgeir. Efficient calculations of slamming pressures on ships in irregular seas. **Journal of Marine Science and Technology**. Noruega: 2007, p. 160-182.

IERVOLINO, L. A. **Estudo de resistência ao avanço de embarcação de planeio: Comparação entre método Savitsky e CFD**. 2015. 45 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

International association of classification societies (IACS). **Classification Societies - What, Why and How?**. 2011. Disponível em: <http://www.iacs.org.uk/document/public/explained/class_whatwhy&how.pdf>. Acesso em: 30 out. 2015.

International Energy Agency. **World Energy Outlook 2016**. 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2016_Executive_Sum>. Acesso em 04 out. 2016.

International maritime organization (IMO - HSC CODE). **International code of safety for high-speed craft**. [S. l.]. The Maritime and Coastguard Agency, 2000.
International Towing Tank Conference. 8ª edição. Madri, Espanha, 1957.

IST SISTEMAS. **Análise CFD**. Disponível em: <<http://istsistemas.com.br/meios-porosos/>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

KAR, N. C., NANDA, G., “A survey and comparison of characteristics of motor drives used in electric vehicles” CCECE/CCGEL IEEE, 811-814, Ottawa, May 2006.

KCEL. **Manual de motores elétricos**. 1 ed. São Paulo, 2016. 71p.

ŁAPKO, Aleksandra. The use of auxiliary electric motors in boats and sustainable development of nautical tourism – cost analysis, the advantages and disadvantages of applied solutions. **International conference "Green cities - Green logistics for greener cities"**. Szczecin, Polônia, v. 2, p. 323-328, mar. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516306457>>. Acesso em: 16 mai. 2017.

LARSSON, L.; ELIASSON, R. **Principles of Yacht Design**. 2 Ed. Londres: Adlard Coles Nautical, 2000.

LEWIS, Edward V. **Principles of naval architecture: Stability and Strength**. USA: The Society of Naval Architects and Marines Engineers, 1988.

MACIEL, Roelton. **Setor náutico de Santa Catarina prepara retomada nos negócios**. 09 maio 2016. Disponível em: <<http://dc.clicrbs.com.br/sc/noticias/noticia/2016/05/setor-nautico-de-santa-catarina-prepara-retomada-nos-negocios-5796758.html>>. Acesso em: 25 set. 2016.

MANSOUR, Alaa; LIU, Donald. **The principles of naval architecture series: strength of ships and ocean structures**. USA: The Society of Naval Architects and Marines Engineers, 2008.

MARINS, Cristiano S. & COZENDEY, Manaara I. A metodologia de multicritério como ferramenta para tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. In: **25º Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)**. Anais. Porto Alegre / RS, 2005.

MENDES, E. R. **Procedimento para Seleção Otimizada de um propulsor da série B**. 2015. 81 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

Ministério do Turismo. **Turismo náutico: Orientações Básicas**. 3 ed. Brasília: Ministério do Turismo, 2010. 72 p.

MOLLAND, F. A.; TURNOCK R. S.; HUDSON D. A. **Ship Resistance and Propulsion: Pratical Estimation of Ship Propulsive Power**. Cambridge, 2011.

OLIVEIRA, Maurício Aguilar Nepomuceno de. **Análise da Viabilidade de Embarcações Solares para Transporte de Passageiros**. 2013. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Oceânica., Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrj.br/intranet/teses/2013_Mestrando_Mauricio_Aguilar_Nepomuceno_de_Oliveira.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2017.

PATEL, M. R. **Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy**. CRC Press, 2012.

PEA - Laboratório De Instalações Elétricas. **O motor de Indução: Partes 1 e 2**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2006. 34 p.

PEA - Laboratório De Instalações Elétricas. **Motores** : Ligações/partidas e operações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: [20..]. 66 p.

REVISTA NÁUTICA. **Hélices**. Disponível em: <<http://www.nautica.com.br/helices/>>. Acesso em: 04 set. 2017.

SILVA, Ricardo José Cardoso da. **Modelação de hélices utilizando “Surrogate Modelling”**: Otimização de hélices em motores elétricos para utilização em plataformas marítimas autônomas (catamarãs). 2015. 209 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação da Escola Naval da Marinha de Portugal – Ciências Militares Navais. Lisboa, 2015.

SMIRDELE, F. **Influência da Popa Transom na Resistência ao Avanço em uma embarcação do tipo PSV**. 2016. 89 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

STA ELETRONICA . **Manual das Baterias Recarregáveis, Pilhas e Carregadores**.

Disponível em: <<http://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/manual.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2017.

TARANTOLA, Andrew. **Baterias e pilhas: o guia definitivo**. Disponível em: <<http://gizmodo.uol.com.br/baterias-e-pilhas-o-guia-definitivo/>>. Acesso em: 19 jul. 2017.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de Máquinas Marítimas**. Escola Náutica Infante D. Henrique. Portugal, 2012.

UNESP – Eletronica Geral. **IX Motores Elétricos**. Universidade Estadual Paulista. São Paulo: [20..]. 27 p.

US NAVY. Bureau of Naval Personnel. Submarine Main Propulsion Diesel. Consulant by Standards and Curriculum Division. Washington, 1976.

VAN MANEN, J. D.; VAN OSSANEN, P. **Principles of Naval Architecture, Second Revision, Volume II: Resistance, Propulsion, and Vibration**. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, New Jersey USA, 1988.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA., W.. **An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume methods**. Longman Scientific , 2007. 267 p.

APENDICE A

Figura A1 – Constantes a_n série Delft

Fn	a0	a1	a2	a3	a4
0,125	-6,735654	38,36831	-0,008193	0,055234	-1,997242
0,15	0,38287	38,1729	0,007243	0,026644	-5,295332
0,175	-1,503526	24,40803	0,0122	0,067221	-2,448582
0,2	11,29218	-14,51947	0,047182	0,085176	-2,673016
0,225	22,17867	-49,16784	0,085998	0,150725	-2,878684
0,25	25,90867	-74,75668	0,153521	0,188568	-0,889467
0,275	40,97559	-114,2855	0,207226	0,250827	-3,072662
0,3	45,83759	-184,7646	0,357031	0,338343	3,871658
0,325	89,20382	-393,0127	0,617466	0,460472	11,54327
0,35	212,6788	-801,7908	1,087307	0,538938	10,80273
0,375	336,2354	-1085,134	1,644191	0,532702	-1,224173
0,4	566,5476	-1609,632	2,01609	0,265722	-29,24412
0,425	743,4107	-1708,263	2,435809	0,013553	-81,16189
0,45	1200,62	-2751,715	3,208577	0,25492	-132,0424

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000).

Figura A2 – Constantes a_n série Delft

Fr	a5	a6	a7	a8	a9
0,125	-38,86081	0,956591	-0,002171	0,272895	-0,017516
0,15	-39,55032	1,219563	0,000052	0,824568	-0,047842
0,175	-31,9137	2,216098	0,000074	0,244345	-0,015887
0,2	-11,41819	5,654065	0,007021	-0,094934	0,006325
0,225	7,167049	8,600272	0,012981	-0,327085	0,018271
0,25	24,12137	10,48516	0,025348	-0,85494	0,048449
0,275	53,0157	13,02177	0,035934	-0,715457	0,039874
0,3	132,2568	10,86054	0,066809	-1,719215	0,095977
0,325	331,1197	8,598136	0,104073	-2,815203	0,15596
0,35	667,6445	12,39815	0,166473	-3,026131	0,165055
0,375	831,1445	26,18321	0,238795	-2,45047	0,139154
0,4	1154,091	51,46175	0,288046	-0,178354	0,018446
0,425	937,4014	115,6006	0,365071	1,838967	-0,062023
0,45	1489,269	196,3406	0,528225	1,379102	0,013577

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000).

Figura A3 – Constantes c_n série Delft

Fr	c0	c1	c2	c3	c4	c5
0,475	180,1004	-31,50257	-7,451141	2,195042	2,689623	0,00648
0,5	243,9994	-44,52551	-11,15456	2,179046	3,857403	0,009676
0,525	282,9873	-51,51953	-12,9731	2,274505	4,343662	0,011066
0,55	313,4109	-56,58257	-14,41978	2,326117	4,690432	0,012147
0,575	337,0038	-59,19029	-16,06975	2,419156	4,766793	0,014147
0,6	356,4572	-62,85395	-16,85112	2,437056	5,078768	0,01498
0,625	324,7357	-51,31252	-15,34595	2,334146	3,855368	0,013695
0,65	301,1268	-39,79631	-15,02299	2,059657	2,515676	0,013588
0,675	292,0571	-31,85303	-15,58548	1,847926	1,569917	0,014014
0,7	284,4641	-25,14558	-16,15423	1,703981	0,817912	0,014575
0,725	256,6367	-19,31922	-13,0845	2,152824	0,348305	0,011343
0,75	304,1803	-30,11512	-15,85429	2,863173	1,524379	0,014031

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000).

APENDICE B

Os motores síncronos, pela sua própria características, requerem cuidados especiais na operação (em potências mais elevadas, devem partir sem carga mecânica), apresentam construção mais elaborada e, por isso, apresentam um campo de atuação mais restrito (PEA, 20..). É empregado quando se faz necessária velocidades estáveis mesmo que submetidos a cargas variáveis, quando se requer grande potência com torque constante, além de ser utilizado para correção de fator de potência.

Os motores de indução geralmente trabalham em velocidade estável, variando lentamente com a carga mecânica exigida em seu eixo. É simples, robusto, de baixo custo e de reduzida necessidade de manutenção, sendo desta forma, o mais utilizado industrialmente. Com os avanços tecnológicos recentes, neste caso, principalmente da eletrônica, é possível controlar a velocidade desses motores com inversores de frequência. (HECKLER, 2011).

Geralmente, motores de indução de pequena potência são monofásicos, necessitando de dispositivos especiais para partida, pois não possuem arranque próprio. Já os motores de maior potência são trifásicos de indução e tem arranque próprio, e ao contrário dos de pequena potência, necessitam destes dispositivos para diminuir a corrente. (HECKLER, 2011).

Existe uma grande variedade de motores elétricos, desde servomotores, aplicados em algumas partes restritas da indústria, até motores universais que podem funcionar tanto em corrente contínua como alternada, sendo amplamente utilizados em equipamentos domésticos como furadeiras, batedeiras, e outros instrumentos de menores aplicações.

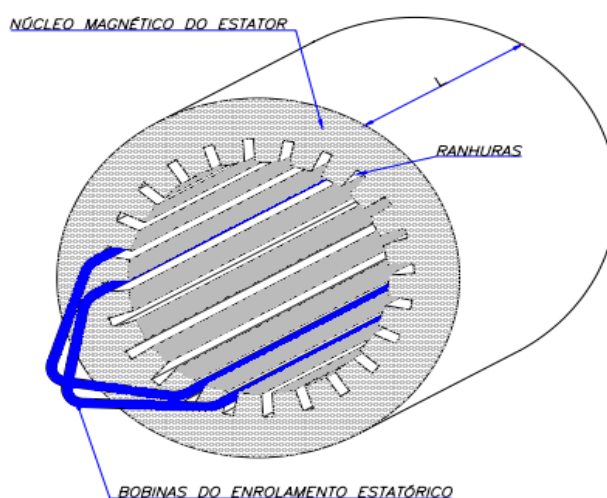
APENDICE C

O motor de indução ou motor assíncrono é o motor de construção mais simples e robusta. Este fato, aliado à produção altamente seriada de motores padronizados, tornou a máquina de indução uma “commodity” cujo custo é muito reduzido quando comparado aos demais motores, justificando sua vasta utilização no ramo industrial.

Ele é composto basicamente de duas partes: estator (parte estática) e rotor (parte móvel). Estes, são montados de forma solidária, com um eixo comum aos anéis que os compõem.

O estator é composto de um núcleo ferromagnético na forma de coroa cilíndrica, constituído de lâminas de aço silicioso justapostas no sentido longitudinal e isoladas uma da outra, formando um comprimento ativo “L”. Na superfície interna do cilindro existem ranhuras distribuídas uniformemente, onde são alojadas as bobinas que formarão o enrolamento do estator. Na Figura C1 estão representadas apenas duas bobinas para efeito de visualização de sua execução, mas na máquina real elas existem usualmente em quantidade igual ao número de ranhuras, cada bobina alojada em um par de ranhuras distanciadas adequadamente, formando o que se chama de enrolamento imbricado de dupla camada. Como será visto adiante, este conjunto de bobinas irá formar o enrolamento trifásico, cuja função será produzir um campo magnético rotativo no entreferro.

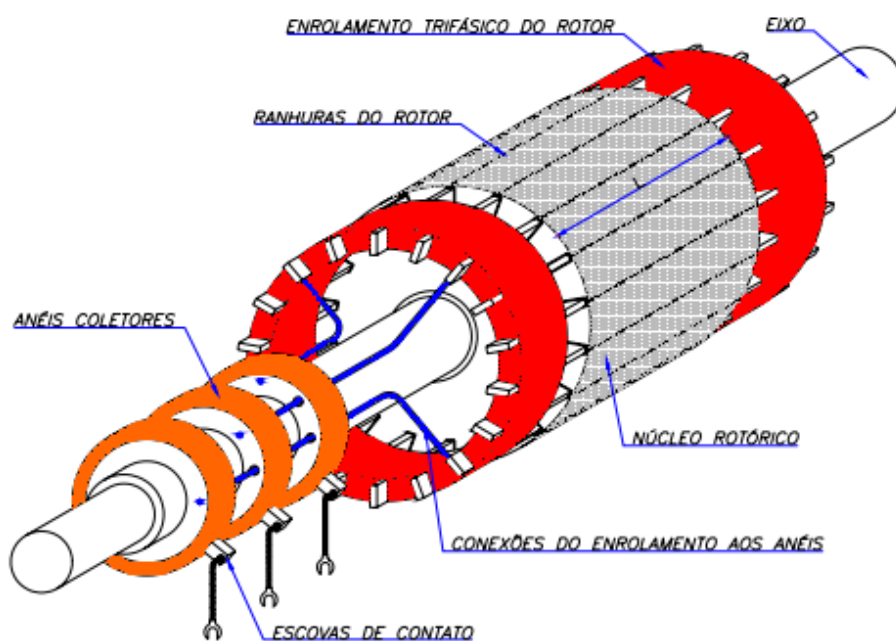
Figura C1 – Estator do motor de indução



Fonte: PEA (2006).

O rotor do motor de indução tem duas variantes construtivas possíveis, o rotor bobinado e o rotor em gaiola. O rotor bobinado, ou também rotor de anéis, é composto de um núcleo ferromagnético cilíndrico constituído de lâminas, com a superfície externa ranhurada, onde é alojado um enrolamento trifásico similar ao do estator. As terminações das bobinas que formam o enrolamento são conectadas a três anéis coletores solidários ao eixo (isolados eletricamente do mesmo e entre si). O acesso ao rotor é então obtido através de escovas de carvão apropriadas, fixadas à estrutura do motor. Desse modo, os anéis coletores e as escovas formam um sistema de contatos móveis tornando possível o acesso ao enrolamento mesmo com o rotor em movimento. Essa variante construtiva tem a vantagem de permitir a alteração de parâmetros elétricos do rotor por inserção de elementos externos de circuito, tipicamente resistores, o que promove a modificação das características do motor, adequando-as ao tipo de carga acionada. A Figura C2 ilustra a construção mecânica típica de um rotor bobinado.

Figura C2 – Rotor Bobinado do motor de indução

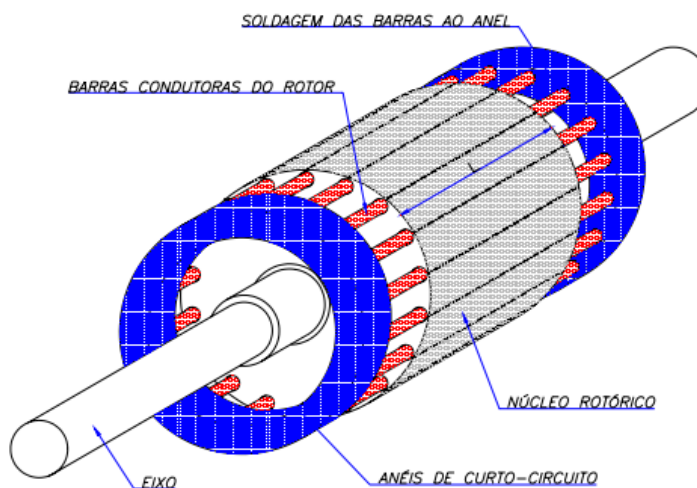


Fonte: PEA (2006).

Na grande maioria das aplicações industriais, utiliza-se o rotor em gaiola para o acionamento dos mais diversos tipos de cargas. Este fato está aliado a construção deste rotor, onde os condutores do rotor são montados sobre o núcleo sem nenhum tipo de isolamento, aumentando expressivamente a confiabilidade do mesmo.

O rotor gaiola também possui um núcleo ferromagnético cilíndrico com superfície externa ranhurada, onde está alojado o enrolamento. Ele é constituído por barras condutoras de cobre ou alumínio inseridas nas ranhuras, eletricamente conectadas em cada extremidade do rotor a anéis condutores, formando um circuito elétrico fechado em curto. Desse modo, o rotor de gaiola não permite nenhum acesso ao enrolamento rotórico, sendo os parâmetros do mesmo determinados pela sua execução. A Figura C3 ilustra a construção mecânica típica de um rotor em gaiola.

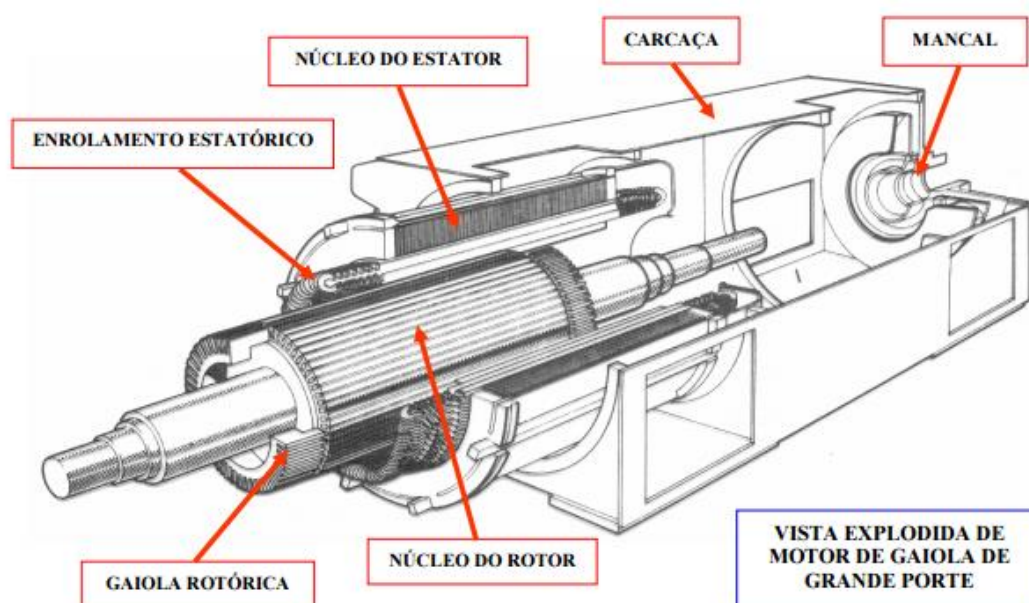
Figura C3 – Rotor em gaiola do motor de indução



Fonte: PEA (2006).

Em qualquer das execuções do rotor, o mesmo é montado dentro do estator e mantido concêntrico com o mesmo, sustentado por um sistema de mancais suportados na estrutura mecânica geral do motor. A Figura C4 ilustra a construção mecânica típica de um motor de indução de gaiola de grande porte.

Figura C4 – Construção típica de um motor de indução com rotor em gaiola



Fonte: PEA (2006).

O espaço de ar anular que se forma entre a superfície interna do estator e a superfície externa do rotor é chamada de entreferro, e é nela que ocorre a conversão eletromecânica do motor de indução.

Dada suas características construtivas, deve-se atentar ao funcionamento dos motores de indução trifásicos. O funcionamento do motor de indução trifásico está diretamente relacionado com o conceito de campo magnético girante. Este campo é produzido, quando coloca-se nas ranhuras do estator um conjunto de três bobinas independentes, defasadas 120° no espaço, e faz-se circular por estas bobinas correntes trifásicas defasadas 120° no tempo. As correntes trifásicas, aplicadas as bobinas do estator podem ser representadas por:

$$i_a(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (18)$$

$$i_b(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (19)$$

$$i_c(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (20)$$

Essas correntes aplicadas às três bobinas equivalentes das fases irão produzir a cada instante um vetor de campo resultante, composto pelas componentes instantâneas dos vetores individuais de cada fase, representadas pelas equações abaixo. Na Figura C5 são mostradas algumas situações desses vetores para o instante de tempo $\omega t = 0^\circ$.

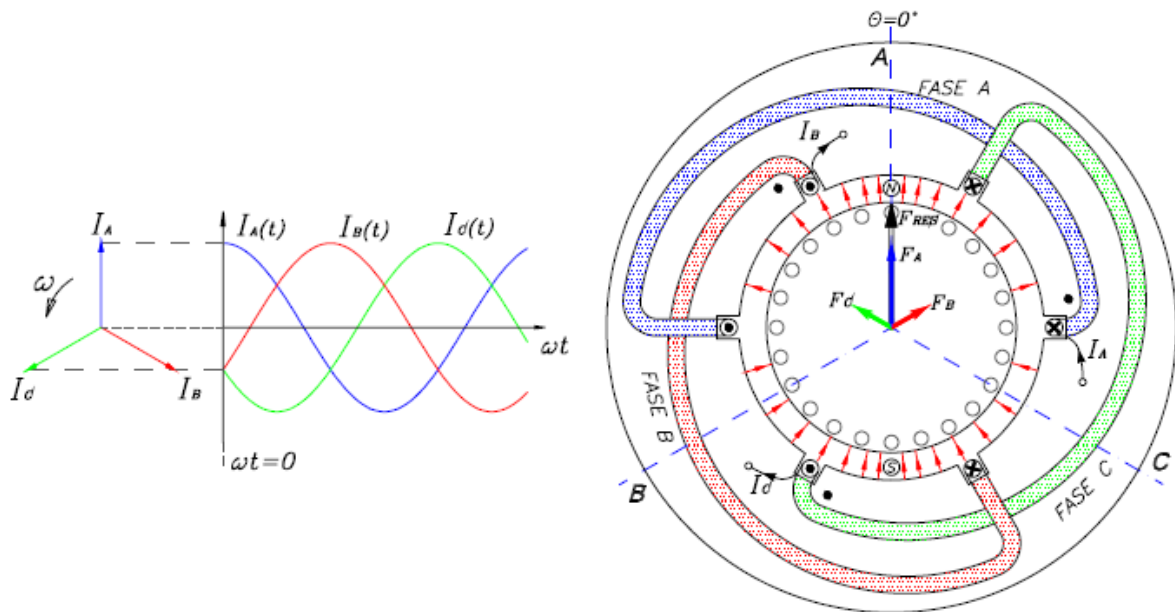
$$\tau_a(t) = N.I.\text{sen}(\omega t) \quad (21)$$

$$\tau_b(t) = N.I.\text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (22)$$

$$\tau_c(t) = N.I.\text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (23)$$

Sendo “N” o número de espiras efetivas da bobina.

Figura C5 – Campo resultante para o instante de tempo $\omega t = 0^\circ$



Fonte: PEA (2006).

Se as três bobinas estiverem orientadas segundo um eixo comum, a força resultante será nula ($\tau_a(t) + \tau_b(t) + \tau_c(t) = 0$). Entretanto, como as três bobinas estão defasadas no espaço de 120° , adotando-se a bobina percorrida por $i_a(t)$ na referência, têm-se:

$$\tau(t) = \tau_a \cdot (\cos 0^\circ) + \tau_b \cdot \cos(120^\circ) + \tau_c \cdot \cos(240^\circ) \quad (24)$$

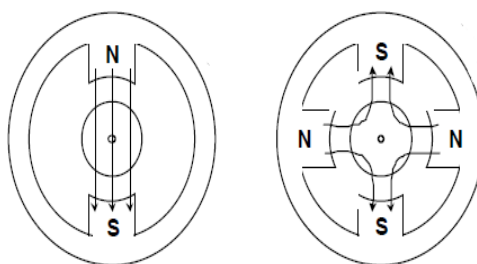
$$\tau(t) = N.I. [\text{sen}(\omega t) \cdot (\cos 0^\circ) + \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos(120^\circ) + \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \cdot \cos(240^\circ)] \quad (25)$$

Após o desenvolvimento trigonométrico, o campo magnético produzido será:

$$\tau(t) = 1,5. N. I. \text{sen}(\omega t) \quad (26)$$

Ou seja, a força eletromotriz total produzirá um campo magnético girante com velocidade e intensidade constantes, com a velocidade dependendo das correntes aplicadas às bobinas. As características ligadas ao número de bobinas colocadas nas ranhuras do estator determinam o número de polos que a máquina irá possuir, que por sua vez, determinam a velocidade do campo girante. Na Figura C6, para ilustrar o conceito de polos, apresenta-se esquematicamente duas máquinas de indução, a da esquerda de dois polos e a da direita de 4 polos.

Figura C6 – Campos Girantes (2 e 4 polos)



Fonte: UNESP (20..).

A velocidade de rotação do campo girante criado pela força $\tau(t)$ é denominada velocidade síncrona (n_s), sendo dada por:

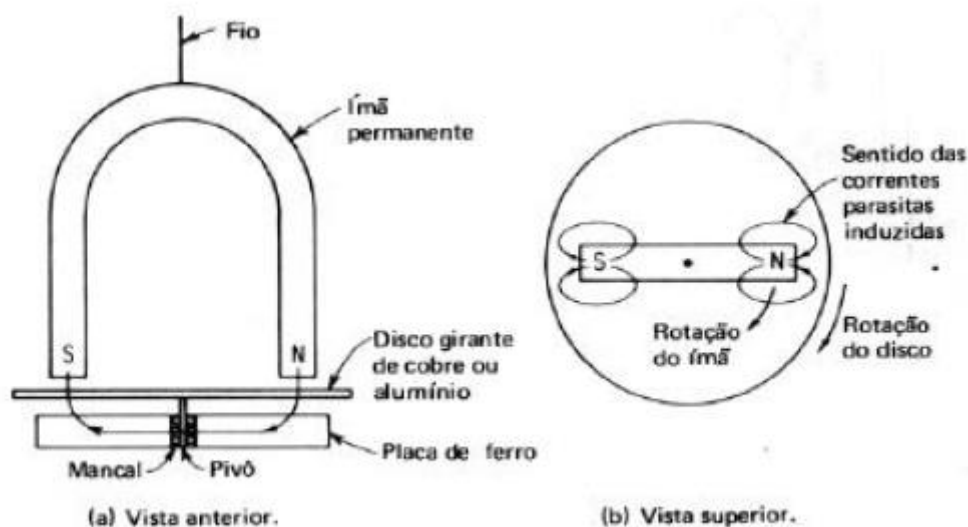
$$n_s = \frac{120. f}{p}, \quad \text{onde:} \quad (27)$$

f = frequência da rede em hertz;

p = número de polos.

O dispositivo mostrado na Figura C6 será utilizado para demonstrar o princípio de funcionamento do MIT. Este dispositivo, consiste em um imã suspenso por um fio. Sob o imã um disco de cobre ou alumínio está apoiado sob um mancal que está por sua vez apoiado em uma placa de ferro. O campo do imã permanente completa-se através do conjunto disco - placa de ferro, como ilustrado na Figura C7.

Figura C7 – Princípio de funcionamento do motor de indução



Fonte: UNESP (20..).

A medida que o ímã gira o disco irá acompanhá-lo. Este fato se deve às correntes parasitas (Figura C7 (b)) que aparecerão no disco devido a seu movimento relativo em relação ao campo magnético.

A Lei de Lenz⁶ explica o sentido contrário da tensão induzida (e conseqüentes correntes parasitas) que irá produzir o campo que tenderá a se opor a força, ou seja, ao movimento que produziu a tensão induzida.

Estas correntes parasitas tenderão a criar sob o polo N do ímã um polo S no disco e sob o polo S do ímã um polo N no disco. Enquanto durar o movimento, que produz as correntes parasitas, estes polos serão criados no disco. O disco desta maneira irá girar no mesmo sentido do ímã pela atração existente entre estes pares de polos que tenderão a alinhar-se.

Um fato extremamente importante é que o disco irá girar a uma velocidade menor que a do ímã, pois caso contrário não existiria movimento relativo entre o ímã e o disco e como conseqüência não existiriam as correntes parasitas, e por conseqüência, os polos, o movimento do disco e o torque. Desta forma, o disco deve escorregar em velocidade para que se produza torque. A diferença de velocidade que existe entre a velocidade síncrona do campo magnético

⁶ Em todos os casos de indução eletromagnética, uma força eletromotriz induzida fará com que a corrente circule em um circuito fechado, num sentido tal que seu efeito magnético se oponha à variação que a produziu.

girante e a velocidade um pouco menor na qual gira o disco é chamada de escorregamento (s), e é normalmente expressa em porcentagem, como pode ser observado na equação abaixo.

$$s = \frac{\text{velocidade de escorregamento}}{\text{velocidade síncrona}} = \frac{n_s - n_r}{n_s}, \quad \text{onde:} \quad (28)$$

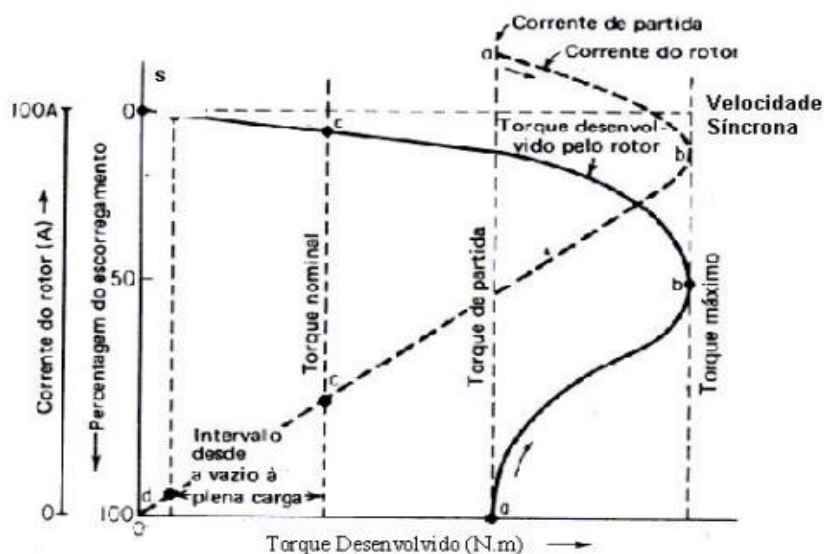
n_s = velocidade síncrona do campo girante (rpm);

n_r = velocidade do rotor (rpm).

Estando o motor desligado, ao aplicar-se a ele sua tensão nominal, esse desenvolverá o torque de partida de tal modo que sua velocidade começa a crescer. Com o motor em movimento, o escorregamento diminui, pois, o rotor está aumentando sua velocidade e o torque aumenta até a condição de torque máximo. Desta maneira a velocidade do motor irá aumentar ainda mais, reduzindo o escorregamento e simultaneamente o torque desenvolvido pelo motor. A velocidade do motor continuará a aumentar até um valor de escorregamento onde o torque desenvolvido torna-se igual ao torque aplicado. Neste ponto de equilíbrio o motor continuará a girar na velocidade estabelecida até que o torque aplicado aumente ou diminua.

A Figura C8 mostra a relação entre os valores dos torques de partida, máximo e de plena carga desenvolvidos pelo motor em função da sua velocidade e escorregamento. A figura mostra também a corrente no rotor do instante da partida (ponto a) até as condições de funcionamento em regime permanente, limitadas pelas posições a plena carga e a vazio (pontos c e d).

Figura C8 – Torque desenvolvido e corrente no motor



Fonte: UNESP (20..).

Embora haja algumas exceções, de uma maneira geral, um motor de indução requer uma corrente aproximadamente seis vezes maior durante a partida do que quando operando a tensão nominal. Na maioria das utilizações, residenciais ou industriais, pequenos motores de indução do tipo gaiola, de baixa potência, podem partir com ligação direta à rede, sem que se verifiquem quedas na tensão na instalação elétrica e sem que se verifique no motor um grande aumento do período de aceleração, desde o repouso, até sua velocidade nominal.

Pelos elevados valores das correntes de partida as concessionárias de energia responsáveis pelo fornecimento de energia residencial e comercial estabelecem limites de potência para a partida a plena carga de grandes motores (UNESP, 20..). Deve-se, portanto, utilizar sistemas de partida visando a diminuição da corrente de partida. No meio industrial, a adoção de um sistema de partida eficiente envolve considerações quanto à capacidade da instalação, requisitos da carga a ser considerada, além da capacidade do sistema gerador. Os principais métodos de partida utilizados com MITs, segundo Patel (2012) são:

- Partida estrela-triângulo: motor parte ligado em Y, desta forma a tensão é reduzida $\sqrt{3}$ vezes e a corrente se torna 0,33 da original, provocando significativa redução do torque. Após a partida, faz-se comutação para ligação delta.
- Partida com chave compensadora: baseia-se na utilização de autotransformador. Possibilita a aplicação de tensões reduzidas por intermédio da seleção manual ou automática de taps (transformador de núcleo de ferro com tomada central). A medida

que o motor vai acelerando, maiores valores de tensão são aplicados. Solução mais volumosa e cara, porém possibilita a escolha de taps adequados para o torque desejado. Provoca oscilações menos bruscas durante as comutações entre tensões.

- Partida com Soft Start: sistema eletrônico que controla a corrente de partida e torque da máquina. Conquistando grande popularidade, além de redução de preço e grande eficiência.

APENDICE D

D.1 Chumbo-Ácido

Gaston Plante inventou a mais antiga tecnologia de baterias recarregáveis, a célula úmida de chumbo-ácido, em 1859. Estas baterias usam eletrodos de chumbo submersos em uma mistura de ácido sulfúrico e água. Diferentemente das baterias de níquel e lítio, o eletrólito das baterias de chumbo-ácido faz mais que apenas atuar como um transmissor entre os polos mas contribui ativamente com elétrons para o processo. Quando a bateria descarrega a corrente, o eletrólito e as chapas oxidam, dando elétrons para produzir água e sulfato de chumbo. Reverter a corrente também faz com que a reação seja revertida, produzindo eletrólito e chumbo, que reforma o eletrodo. (STA Eletronica, 20..).

Baterias de chumbo-ácido não são muito eficientes. Elas possuem uma capacidade assombrosamente baixa, dado seu peso e volume. Desta forma, ela é a bateria mais econômica quando o problema peso pode ser desprezado. O que elas têm, no entanto, é potência. Elas são capazes de entregar voltagens superiores as demais baterias. Este fato, faz com que a maioria das baterias automotivas e marítimas no mercado hoje sejam deste tipo. (TARANTOLA, 2012; STA Eletronica, 20..).

Outra característica importante, é a sua elevada capacidade de reter carga por longos períodos, o que as torna ideais para aparelhos intermitentes, como sinais de ferrovias — e os próprios veleiros, tópico deste trabalho — onde chegam a durar até 25 anos.

Observa-se que a Marinha Americana usa esse tipo de baterias em seus modernos submarinos nucleares. (TARANTOLA, 2012; STA Eletronica, 20..)

Nos anos 70, esta tecnologia sofreu uma mudança considerável com o advento da bateria de chumbo-ácido regulada por válvulas, que usa eletrólito suspenso em gel em vez de líquido, o que permite que ela seja usada em qualquer posição (CARNEIRO, et al, 2017). Desta forma, as baterias de chumbo-ácido foram direcionadas as mais diversas aplicações, sendo classificadas de acordo com as seguintes configurações específicas:

- Baterias de arranque: chamadas também de SLI (do inglês Starting Lighting and Ignition) ou automotivas. São responsáveis pelo fornecimento de energia para combustão interna do motor e para fornecer energia ao sistema elétrico do veículo quando este não está em funcionamento (CARNEIRO, et al, 2017). Elas são subdividas em baterias ventiladas e seladas (SLA).

1. SLA: do inglês Sealed Lead Acid, significa bateria selada de chumbo ácido, também é conhecida comercialmente como GelCell. Possuem uma faixa típica de capacidade de 0,2Ah até 30Ah. São utilizadas principalmente em: no-breaks de computadores, pequenas unidades de iluminação, ventiladores hospitalares, cadeiras de rodas elétricas, etc. (STA Eletronica, 20..)
 2. Ventiladas: apresentam grades de chumbo-antimônio (Pb-Sb). Esta liga possui característica de decomposição de hidrogênio, ocasionando maior perda de água na bateria, necessitando de mais cuidado com a reposição de água, superaquecimento e posterior falecimento da bateria. (STA Eletronica, 20..)
- Baterias tracionárias: trabalha sob condições mais severas, onde se faz necessário maior potência, energia e ciclo de vida longo. Funcionam em ciclos de carga/descarga muito profundos em curto espaço de tempo, apresentando desta forma uma descarga muito maior que as baterias de arranque. Porém, estas descargas completas podem ocasionar variações de até 50% na grade, agravando o desprendimento de material ativo. As principais aplicações dessas baterias são: carrinhos de transporte de pessoas e cargas, prateleiras e plataformas elétricas, lavadoras, varredoras industriais, sistemas de energia solar e eólica, etc. (CARNEIRO, et al, 2017).
 - Baterias estacionárias: são utilizadas como fonte de energia reserva, trabalhando na maior parte do tempo carregadas. Como elas passam a maior parte do tempo carregada, são projetadas com maior eletrólito do que as outras e, desta forma, apresentam placas mais pesadas, com alta densidade de massa, o que acarreta o aumento da vida útil da bateria, sendo mais duradouras quando comparadas às tracionárias e de arranque (CARNEIRO, et al, 2017).
 - VRLA: do inglês Valve Regulated Lead Acid, significa bateria de chumbo ácido regulada por válvula, sendo utilizadas em aplicações estacionárias. São consideradas baterias de última geração, visto que foram desenvolvidas com o intuito da diminuição de manutenção. Sua capacidade vai de 30Ah até milhares de Ah. São utilizadas tipicamente em: no-breaks de grande porte para reserva de energia, repetidoras telefônicas, hospitais, bancos, aeroportos e instalações militares. Elas são subdivididas em baterias AGM e baterias GEL.
 1. AGM: do inglês Absorbent Glass Mat, significa manta de fibra de vidro absorvente, tem como característica principal a absorção total da solução ácida (eletrólito) em seus separadores. Com isso, a bateria não derrama líquido, não

sulfata e não degrada como ocorre na bateria inundada. O separador AGM mantém o eletrólito em suspensão, mantendo-o em contato constante com o material ativo nas placas. Isto resulta numa maior eficiência quando ambas descarregam e recarregam proporcionando mais durabilidade que as baterias convencionais e desempenho elétrico para o veículo. Estas baterias apresentam cerca de duas vezes o valor da baterias de chumbo-ácido convencionais, sendo utilizadas no armazenamento de energia solar e em carros elétricos. (TARANTOLA, 2012; CARNEIRO, et al, 2017; HELIAR, 2014).

2. Baterias Gel: Na bateria em gel, o eletrólito é misturado em partículas de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), resultando assim em uma consistência gelatinosa. O separador é de polietileno, como nas baterias convencionais. Esta configuração permite que a bateria trabalhe em altas e baixas temperaturas e elevados regimes de vibrações, além de resultar em maior confiabilidade e vida útil. Porém, este tipo de bateria apresenta custo cerca de cinco vezes maior que as baterias de chumbo-ácido convencionais. (TARANTOLA, 2012; CARNEIRO, et al, 2017).

D.2 Níquel-Cádmio

As baterias de Níquel-Cádmio (NiCd) são usadas comercialmente desde 1950. Ela é o único tipo de bateria que trabalha melhor em cargas rápidas e pulsadas, ao invés de cargas lentas ou moderadas e cargas contínuas (TARANTOLA, 2012). Baterias NiCd usam eletrodos de óxido de níquel e cádmio metálico. Sua composição química permite que elas operem em temperaturas baixas ou em aplicações de alta descarga sem sacrificar a vida útil e a capacidade. (STA Eletronica, 20..).

É uma bateria que deve ser utilizada constantemente, quando utilizada brevemente e sem descarga completa, pode ocorrer a formação de grandes cristais nas placas das células (efeito memória) e a bateria perderá rapidamente sua capacidade. Além disso, são mais caras que às de chumbo-ácido, descarregam sozinhas mais facilmente e podem não funcionar direito em alguns dispositivos pensados especificamente para pilhas alcalinas, devido a tensão e capacidade menores. E, mesmo fornecendo mais força, o cádmio é um material caro e ecologicamente agressivo, sendo esse é um dos principais motivos de sua substituição por baterias de níquel-hidreto metálico. (STA Eletronica, 20..).

Mais de 50% de todas as baterias recarregáveis para equipamentos portáteis são de NiCd, como por exemplo, walkie-talkies, equipamentos de emergência médica, câmeras de vídeo profissionais e ferramentas elétricas. (STA Eletronica, 20..)

D.3 Níquel-Hidreto Metálico

As baterias de NiMH têm substituído as baterias de NiCd nos mercados de comunicações sem fio e computação móvel. Isto deve-se a preocupações ambientais com o descarte das baterias em fim de vida útil.

Inicialmente mais caras que as baterias NiCd, atualmente os preços já se apresentam bem próximos (STA Eletronica, 20..).

São muito parecidas com as NiCd na construção, no entanto, elas substituem o ânodo de cádmio por uma liga que absorve hidrogênio, feita de uma mistura de materiais raros (combinando latânio, cério, neodímio e praseodímio ou níquel, cobalto, manganês e/ou alumínio) e usam um eletrólito alcalino, normalmente hidróxido de potássio. Isso garante que as baterias NiMH tenham entre 200% e 300% da capacidade de uma NiCd e uma corrente próxima de uma célula de lítio. Em algumas aplicações de alta performance, o ânodo pode ser feito de um composto de titânio ou zircônio, que aumenta ainda mais a capacidade. (TARANTOLA, 2012)

Apesar de eficientes, baratas e ecologicamente corretas, as baterias deste tipo descarregam sozinhas facilmente. Algumas variantes da fórmula da NiMH de baixa autodescarga estão disponíveis, mas que resultam em um capacidade 20% menor do que as baterias de NiMH tradicionais. Além disso, este tipo de bateria tem fama de ser sensível ao calor, que reduz drasticamente a vida operacional delas. (TARANTOLA, 2012)

D.4 Lítio-Ion

O Lítio é o mais leve de todos os metais usados em baterias, tem o maior potencial eletroquímico e fornece a maior densidade de energia por peso. Baterias recarregáveis que usam anodos de metal de lítio (eletrodos negativos) são capazes de fornecer alta tensão e excelente capacidade, resultando em uma extraordinária densidade de energia (PATEL, 2012; TARANTOLA, 2012; STA Eletronica, 20..).

Depois de muita pesquisa em baterias recarregáveis de lítio durante os anos 80, foi descoberto que a o ciclo de carga/descarga causa mudanças no eletrodo de lítio. Essas

transformações reduzem a estabilidade térmica, causando potenciais condições de fuga térmica. Por causa da instabilidade inerente do metal de lítio, pesquisas conduziram para uma bateria de lítio não-metálica que usa íons de lítio. Embora superficialmente menor em densidade de energia do que a de metal de lítio, a de Lítio-Íon pode ser considerada segura, desde que tomadas certas precauções nos ciclos de carga e descarga (STA Eletronica, 20..).

A tecnologia Li-ion oferece cerca de três vezes a densidade de energia em relação a de chumbo-ácido. Uma grande melhora na densidade de energia vem do baixo peso atômico do lítio (6,9 versus 207 para o chumbo). Além disso, o íon de lítio tem uma tensão celular mais alta, 3,5 V por célula versus 2,0 V do chumbo-ácido e 1,2 V para as eletroquímicas de níquel. (PATEL, 2012).

A Lítio-Íon é uma bateria de baixa manutenção, uma vantagem que a maioria das outras químicas não têm. Não existe memória e nenhum ciclo programado é exigido para prolongar a vida da bateria. Além disso, a auto-descarga é consideravelmente menor quando comparada as baterias de NiCd e NiMH. (STA Eletronica, 20..).

A alta tensão da célula de Lítio-Íon permite a fabricação de conjuntos de baterias que consistem em apenas uma célula. Muitos dos telefones móveis de hoje funcionam com uma célula simples, uma vantagem que simplifica o projeto da bateria.

As tensões de alimentação de aplicações eletrônicas têm caído, o que requer poucas células por conjunto de baterias. No entanto, para manter a mesma energia, são necessárias maiores correntes. Isto enfatiza a importância de uma resistência muito baixa da célula para permitir fluxo irrestrito de corrente (STA Eletronica, 20..).

Apesar de suas vantagens totais, as baterias de Lítio-Íon também têm as suas inconveniências. Ela é frágil e requer um circuito de proteção para manter uma operação segura. Além disso, a máxima corrente de carga e descarga é limitada e a temperatura da célula é monitorada para prevenir temperaturas extremas. Armazenamento prolongado não é recomendado para baterias de Lítio-Íon, assim o comprador deve estar ciente da data de fabricação quando comprar baterias de reposição de Lítio-Íon (PATEL, 2012; STA Eletronica, 20..).

Esta tecnologia se destaca quando se faz necessário ter um conjunto de baterias mais fino (menor que 18 mm), desta forma, é muito utilizada nos mais recentes notebooks e celulares. Entretanto, tais benefícios apresentam um custo bem superior em relação as demais versões de baterias.

D.5 Lítio-Polímero

A bateria de Lítio-Polímero se diferencia dos outros sistemas de baterias no tipo de eletrólito usado. O projeto inicial, anterior aos anos 70, usa somente um eletrólito seco de polímero sólido. Esse eletrólito se assemelha a um filme tipo plástico que não conduz eletricidade, mas permite uma troca de íons. O eletrólito de polímero substitui o separador poroso tradicional, que é embebido com eletrólito. (PATEL, 2012; STA Eletronica, 20..)

O projeto de polímero seco oferece simplificações no que diz respeito à fabricação, rugosidade, segurança e geometria de perfil fino. Não há perigo de inflamação porque nenhum eletrólito líquido ou gel está sendo usado, além de possui uma espessura de célula medindo cerca de um milímetro (0,039 polegadas). Desta forma, essa tecnologia se destaca quando faz-se necessário geometrias ultra finas (menores que 4mm), sendo a solução mais cara presente no mercado. (STA Eletronica, 20..)

D.6 Sódio

A bateria de sódio é a mais recente eletroquímica disponível no mercado. A General Electric Company faz esta bateria avançada em uma nova fábrica perto de Albany, Nova York, para locomotivas híbridas, veículos de serviço pesado e armazenamento de backup em fazendas de energia eólica e solar.

A eletroquímica de sódio baseia-se em uma tecnologia de halogeneto de metal de sódio, que é mais adequada para as breves explosões de energia intensa necessária para que um veículo se mova e também para um alto poder durante um longo período de tempo. (PATEL, 2012)

APENDICE E⁷

Figura E1 – Resistência Série Delft 5 Toneladas

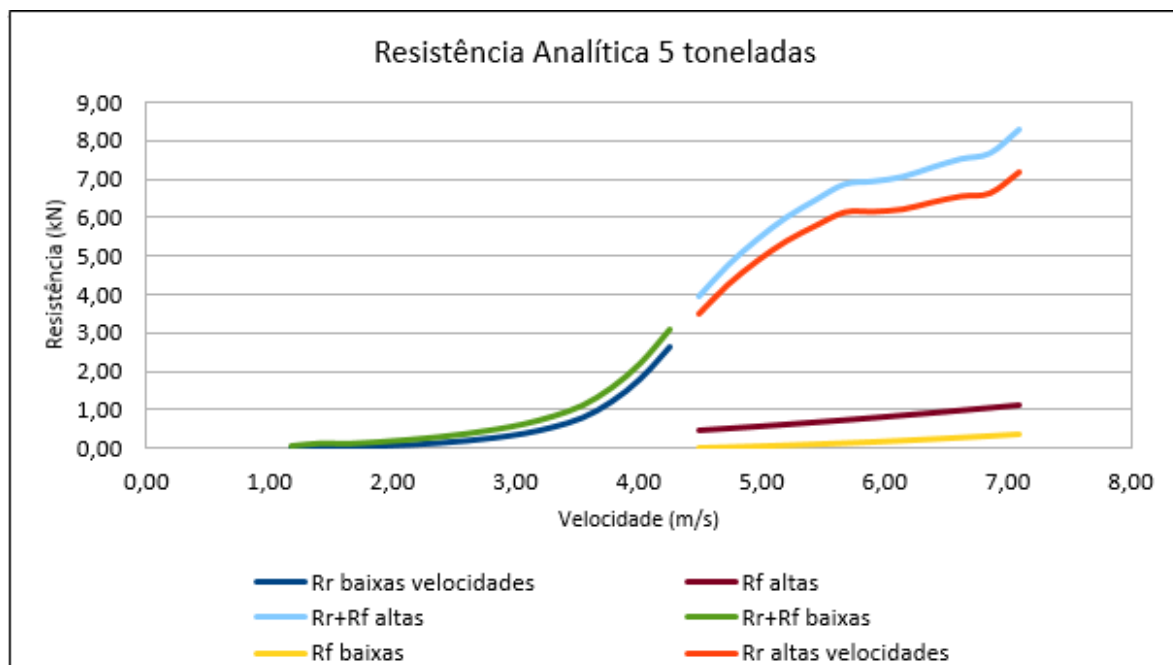
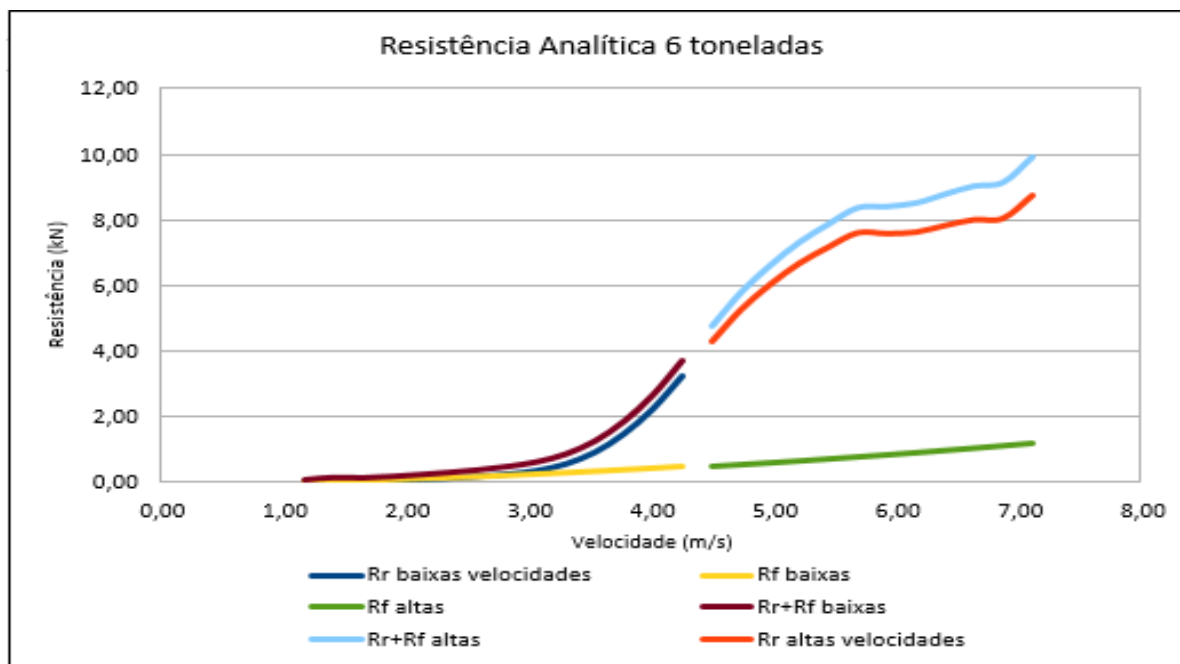
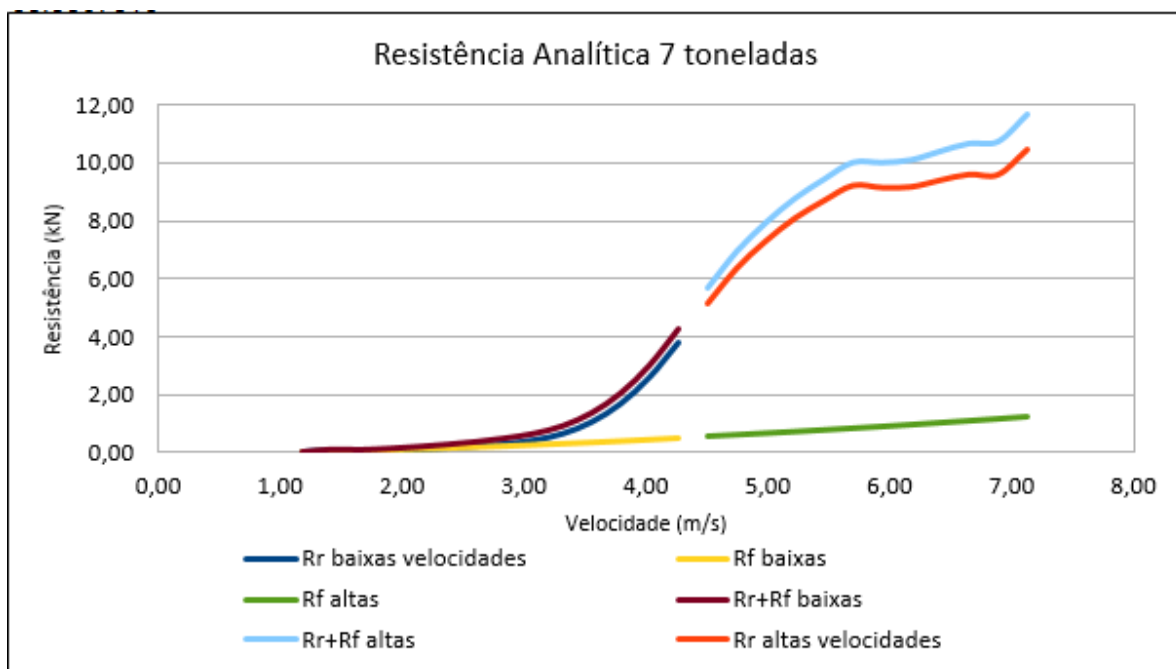


Figura E2 – Resistência Série Delft 6 Toneladas



⁷ Rr: Resistência Residual; Rf: Resistência Friccional; Altas: altas velocidades; Baixas: baixas velocidades.

Figura E3 – Resistência Série Delft 7 Toneladas



Fonte: Autor (2017).

APENDICE F

Equações referentes ao modelo de turbulência:

K

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

Epsilon

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Onde u_{ij} é a velocidade em uma dada direção, E_{ij} é a taxa de deformação, μ_t é a viscosidade de eddy:

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon}$$

As constantes foram obtidas a partir de um enorme banco de dados de escoamentos turbulentos.

$$C_\mu = 0,09$$

$$C_{1\epsilon} = 1,44$$

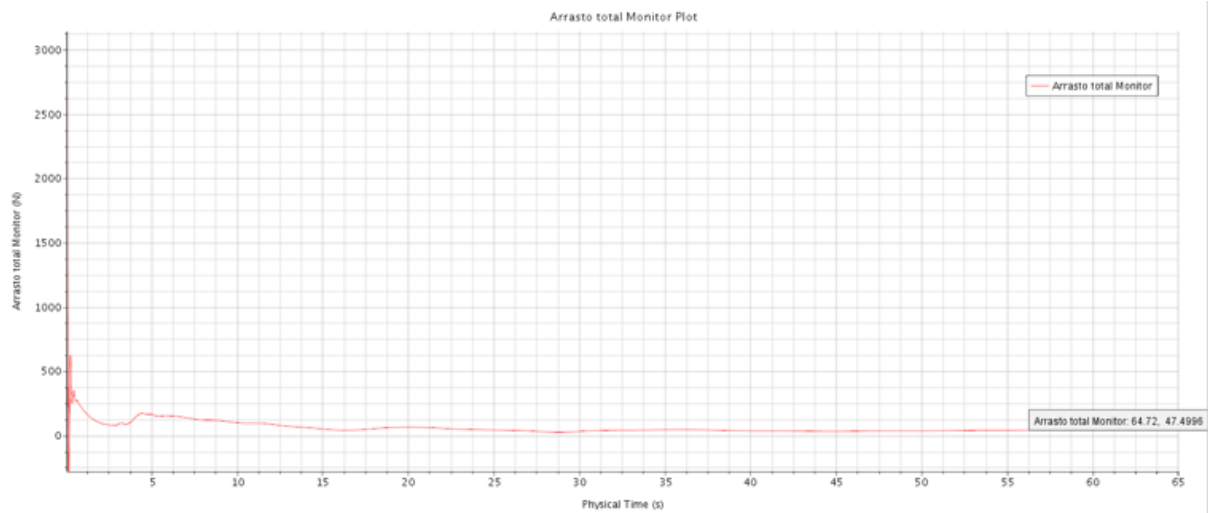
$$C_{2\epsilon} = 1,92$$

$$\sigma_k = 1,00$$

$$\sigma_\epsilon = 1,30$$

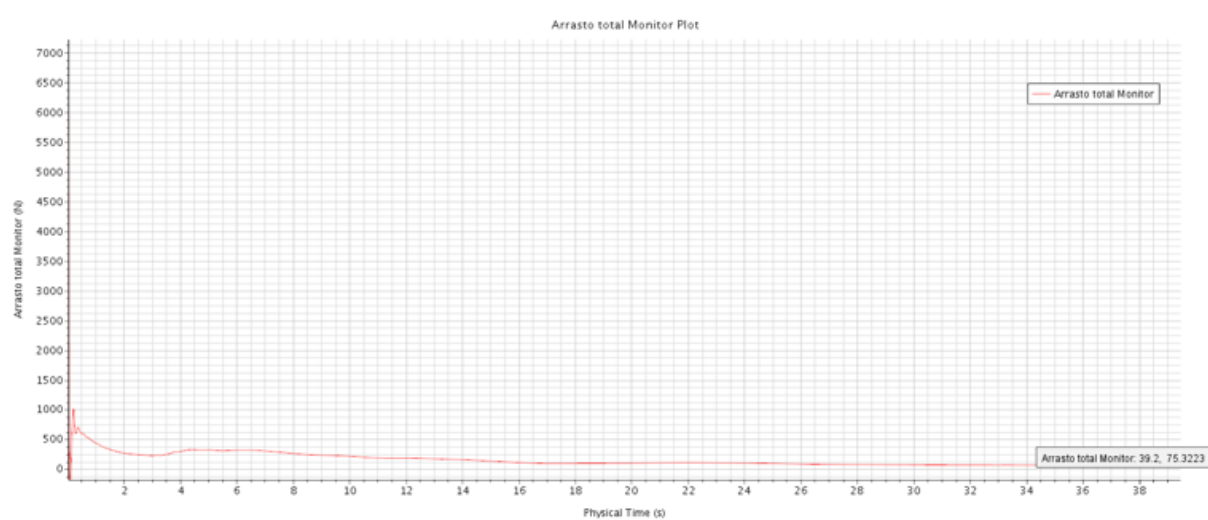
APENDICE G

Figura G1 – Resultado da Resistência Total no modelo a 1 nó



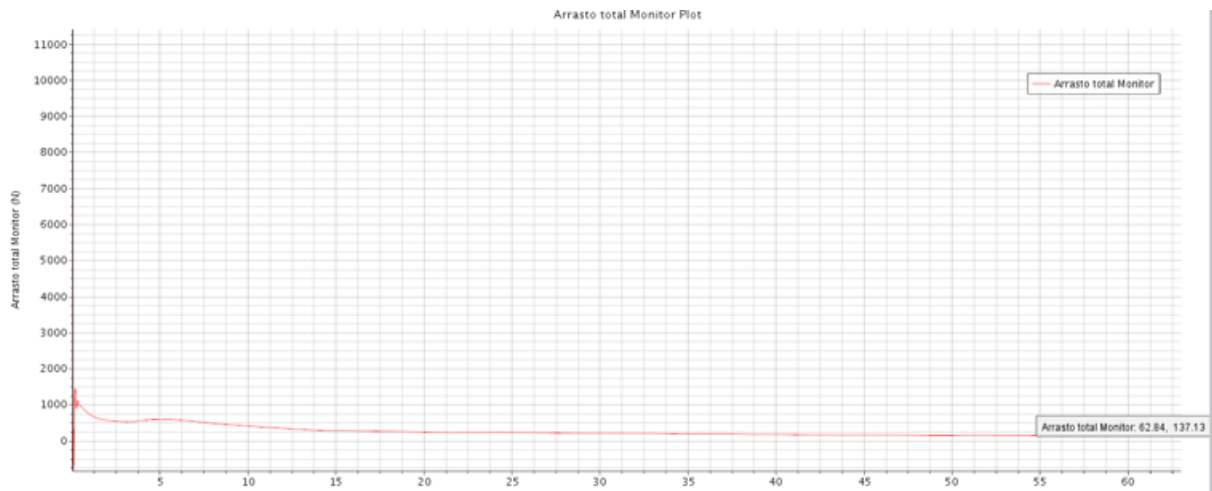
Fonte: Autor (2017).

Figura G2 – Resultado da Resistência Total no modelo a 2 nós



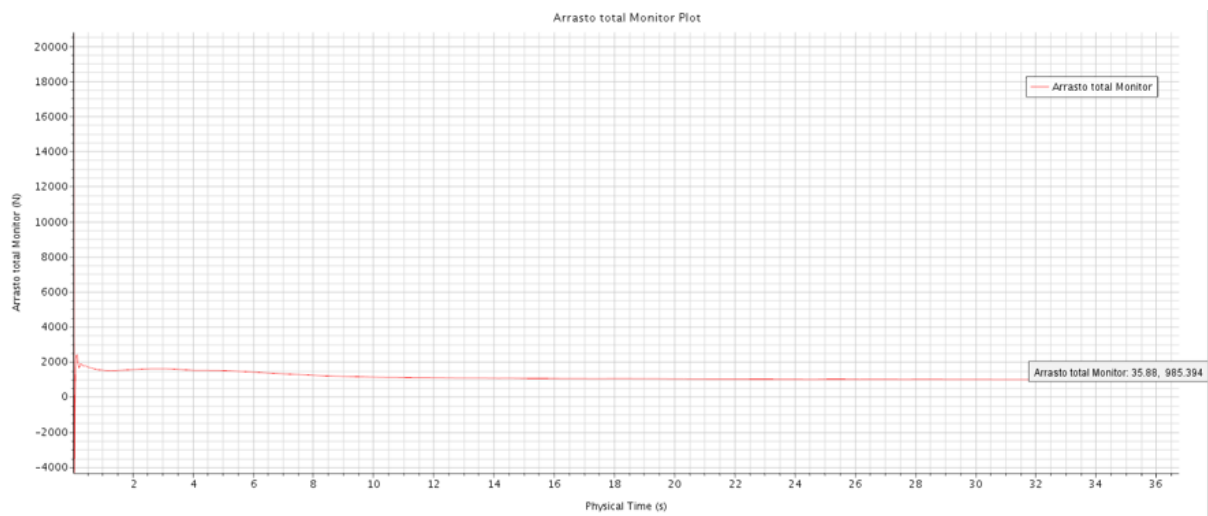
Fonte: Autor (2017).

Figura G3 – Resultado da Resistência Total no modelo a 3 nós



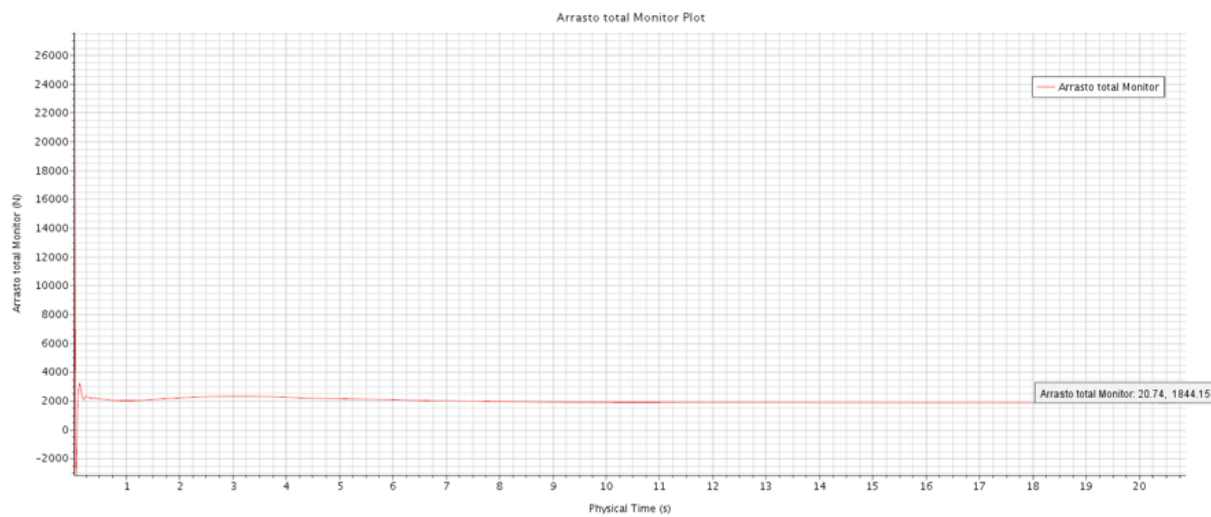
Fonte: Autor (2017).

Figura G4 – Resultado da Resistência Total no modelo a 5 nós



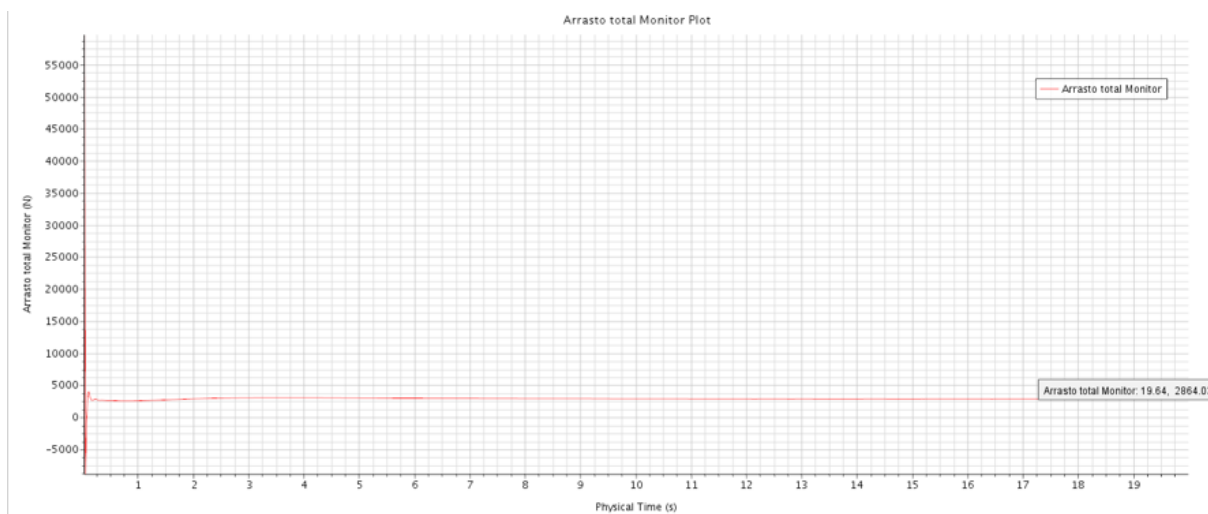
Fonte: Autor (2017).

Figura G5 – Resultado da Resistência Total no modelo a 6 nós



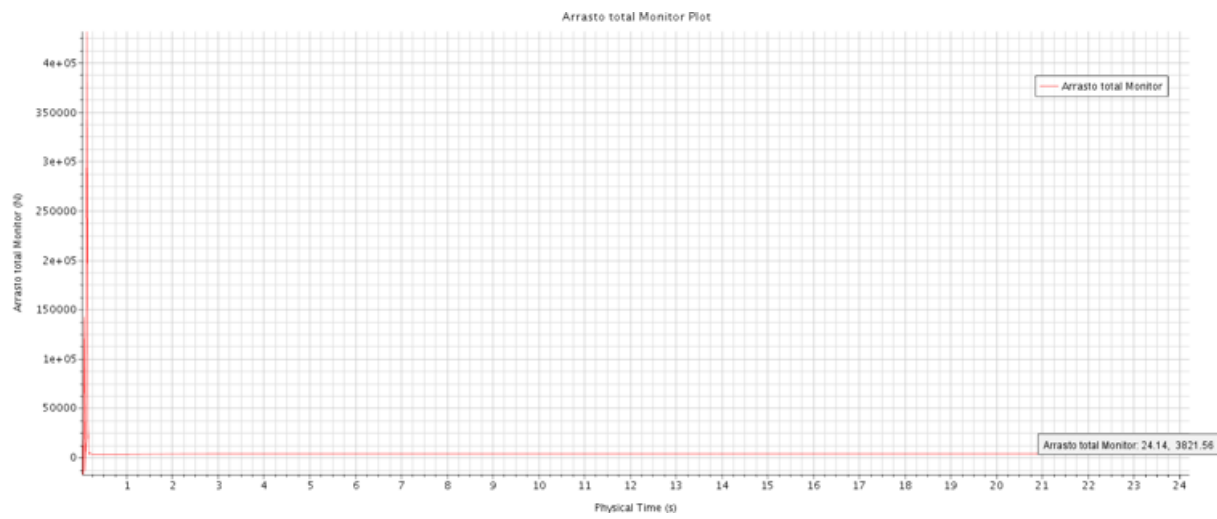
Fonte: Autor (2017).

Figura G6 – Resultado da Resistência Total no modelo a 7 nós



Fonte: Autor (2017).

Figura G7 – Resultado da Resistência Total no modelo a 8 nós



Fonte: Autor (2017)

APENDICE H

Figura H1 – Embarcações Elétricas Semelhantes

Embarcação	L (pés)	Deslocamento (kg)	Potencia (kW)	Rotação (RPM)	Baterias				Tipo	Hélice	Referencia
					Bancos	Número	Voltagem (V)	Capacidade (Ah)			
Amanda	31		7	2250	2	4	48		AGM		Oceanna Navigator
Gulfstar Sailmaster	39	9525						440			Electric Yatch
Mathis 30	30				2	4	48	220			Electric Yatch
Shannon	38	8165	10		2	12	84		Lítio-Ion	4 pás	Electropop
Solaris	25	2800	5,5	1400	2	2	48	150			Revista Náutica
Summerwind	27		5			4	48	200	AGM	4 pás	Electropop
Lidgard	47	8200	7,5				48	270	Lítio-Ion		Ecoboats
Cruising Yatch	28	3200	2,5		1	2	24	120	AGM		Ecoboats
Filsan	20	1000	4,2	900	1	8	48	225		3 pás	Ecoboats
Couta Boat - "Odin"	19		3,6	1600	1	3	36	150	AGM		Ecoboats
Laarol	39		4,8				48	120	AGM	3 pás	Ecoboats
"Friendship"	19		3,5			8	48	225	AGM		Ecoboats

Fonte: Autor (2017).

APENDICE I

Figura II – Estudo do Hélice

Número de Pás do Hélice (Z)	2										2										2										2									
	0,3										0,4										0,5										0,6									
Dímetro do Hélice (D)	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05										
Razão de Área Expandida - A_{rel}	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05										
Razão Passo-Dímetro - P/D	0,7	0,7	0,7	1,4	1,4	0,7	0,7	0,7	1,4	1,4	0,7	0,7	0,7	1,4	1,4	0,7	0,7	0,7	1,4	1,4	0,7	0,7	0,7	1,4	1,4	0,7	0,7	0,7	1,4	1,4										
RPM	1415	1415	1372	808	794	849	849	849	499	485	590	590	590	348	340	404	404	404	263	263	257	257	257	257	257	257	257	257	257	257										
Coefficiente de Avanço J	0,32	0,32	0,33	0,56	0,57	0,4	0,4	0,4	0,88	0,7	0,46	0,46	0,46	0,78	0,8	0,56	0,56	0,56	0,86	0,86	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88										
Eficiência em Água Aberta-η_a	0,48	0,46	45	0,43	0,46	59	0,56	0,53	0,51	0,56	66	0,63	0,59	0,58	0,63	0,72	0,68	0,64	0,62	0,62	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67										
CAVITAÇÃO 2,5 E 5%	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado										
Número de Pás do Hélice (Z)	3										3										3										3									
Dímetro do Hélice (D)	0,3										0,4										0,5										0,6									
Razão de Área Expandida - A_{rel}	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05										
Razão Passo-Dímetro - P/D	0,7	0,7	0,7	1,4	1,4	0,8	0,8	0,8	1,3	1,4	0,9	0,9	0,9	1,4	1,4	0,9	0,9	0,9	1,4	1,4	1	1	0,9	0,9	1,4	1,4	1	0,9	0,9	1,4	1,4									
RPM	1332	1332	1332	1104	1104	755	755	755	522	492	485	477	477	344	340	333	359	359	280	280	257	257	257	257	257	257	257	257	257	257										
Coefficiente de Avanço J	0,34	0,34	0,34	0,41	0,41	0,45	0,45	0,45	0,85	0,89	0,56	0,57	0,57	0,79	0,8	0,68	0,63	0,63	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88										
Eficiência em Água Aberta-η_a	0,49	0,47	46	0,43	0,42	0,57	55	0,54	0,5	0,52	0,63	0,61	0,6	0,57	0,59	0,67	66	0,65	0,62	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64										
CAVITAÇÃO 2,5 E 5%	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado										

Fonte: Autor (2017).

APENDICE J

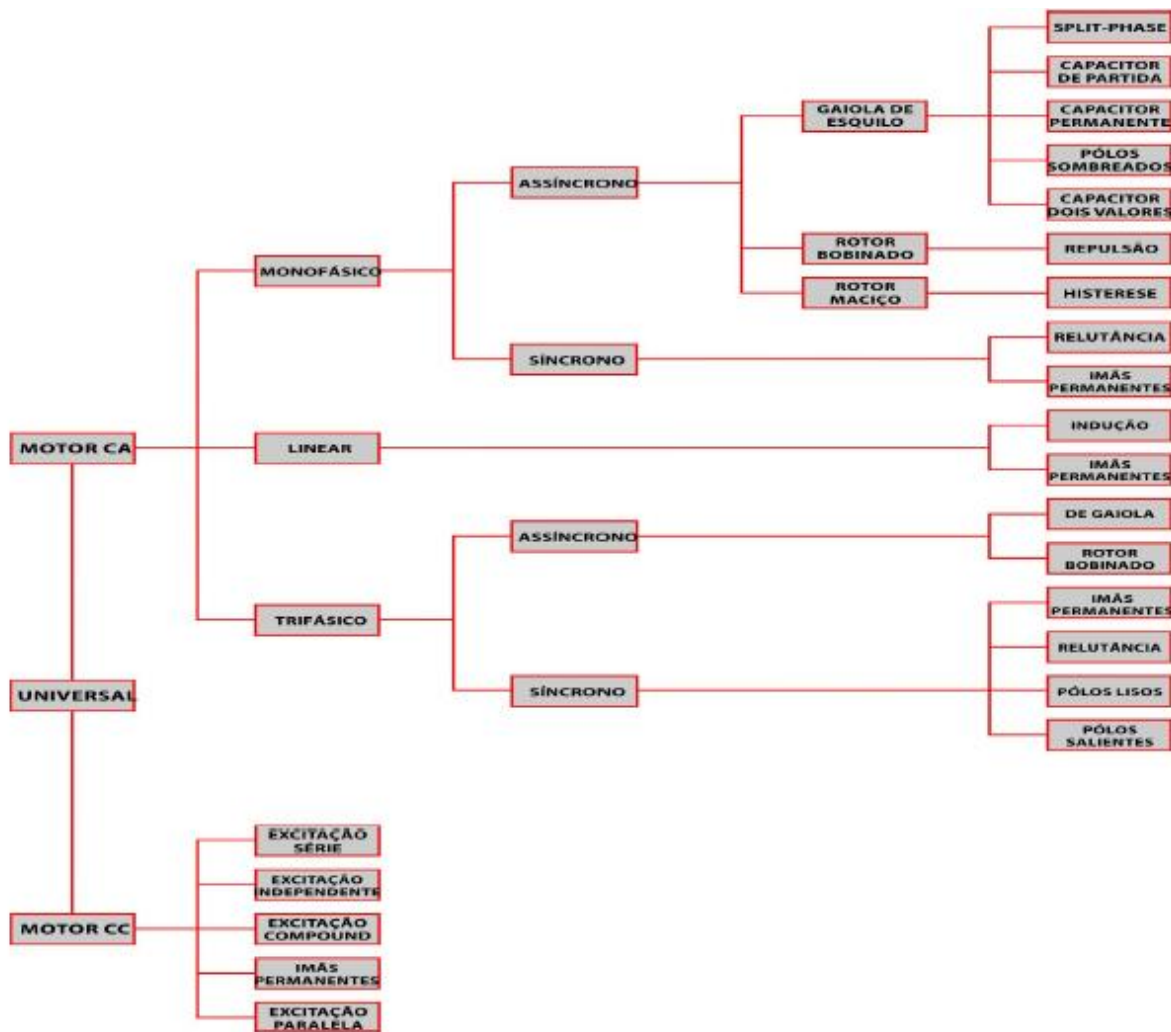
FIGURA J1 – Estudo do Hélice Ayty

Número de Pás do Hélice (Z)	3					
Diâmetro do Hélice (D)	0,45					
Razão de Área Expandida - Ae/A	0,3	0,4	0,5	0,9	1,05	0,3
Razão Passo-Diâmetro - P/D	0,9	0,8	0,8	1,4	1,4	0,65
RPM	569	616	616	408	402	686
Coefficiente de Avanço J	0,53	0,49	0,49	0,74	0,75	0,44
Eficiência em Água Aberta-η_a	0,6	0,59	0,58	0,54	0,56	59
CAVITAÇÃO 2,5 E 5%	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado

Fonte: Autor (2017).

ANEXO A

Figura A 1 1 – Classificação Motores Elétricos



Fonte: KCEL (2016).