

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

LUCAS SCHENKEL DO AMARAL E SILVA BEBER

PROJETO CONCEITUAL DE UM SISTEMA PROPULSIVO ELÉTRICO PARA  
EMBARCAÇÃO DE PESCA DE PEQUENO PORTE

Joinville

2018

LUCAS SCHENKEL DO AMARAL E SILVA BEBER

PROJETO CONCEITUAL DE UM SISTEMA PROPULSIVO ELÉTRICO PARA  
EMBARCAÇÃO DE PESCA DE PEQUENO PORTE

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Eng. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto.

Joinville

2018

LUCAS SCHENKEL DO AMARAL E SILVA BEBER

PROJETO CONCEITUAL DE UM SISTEMA PROPULSIVO ELÉTRICO PARA  
EMBARCAÇÃO DE PESCA DE PEQUENO PORTE

Esta Monografia foi julgada e aprovada com  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Naval da Universidade  
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de  
Joinville. Joinville (SC),

27 de novembro de 2018.

---

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Peres Calil

Coordenador de Curso

Banca Examinadora:

---

Dr. Eng. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto

Presidente/Orientador

---

Prof. Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi

Membro

---

Prof. Eng. Esp. Luiz Eduardo Bueno Minioli

Membro

## RESUMO

O presente trabalho propõe o projeto conceitual de um sistema propulsivo composto por motor elétrico, conjunto de baterias e hélice propulsor para uma embarcação de pesca destinada a navegar em águas abrigadas. O barco em questão possui 5 metros de comprimento e foi oferecido pelo Estaleiro Secboats para a pesquisa. Seguindo a tendência de mudança de matriz energética no mundo, é proposto um estudo de mercado, com intuito de entender as principais barreiras da tecnologia. Esse estudo é composto por entrevistas e questionários entre pescadores e um levantamento de dados sobre motores e embarcações semelhantes. A metodologia envolve as informações do barco e as obtidas no estudo de mercado, com objetivo de definir os principais requisitos do presente projeto. Nessa linha, o casco é modelado para posterior análise de resistência ao avanço. Com essas informações em mão, dimensiona-se o cada um dos componentes do sistema de propulsão e estuda-se o comportamento do barco equipado com a motorização apresentada. Ao final, foi possível verificar que o sistema supre a demanda energética dos modos de operação propostos, cumprindo com os requisitos de projeto.

**Palavras-chave:** Embarcação de Pesca. Sistema Propulsivo. Motor Elétrico. Estudo de Mercado.

## **ABSTRACT**

The conceptual project of an electric propulsion system for a small fishing vessel designed for sheltered waters is proposed. The system consists of an electric motor, a propeller and the selection of a battery set. The vessel's hull is 16 feet long and has been provided by Secboats Shipyard for the project. Following the shift towards electric, a market research is also proposed with the aim of understanding the main barriers of this technology. The study involves interviews and an online survey as well as a compilation of similar boats and marine electric motors. The methodology is set to take into consideration the data observed in the market research and the boat's geometry, in order to model its hull and run the resistance analysis. Subsequently, each of the proposed propulsion system components is designed and the boat attitude is investigated. Finally, it is proved that the boat meets the requirements of what has been proposed in the methodology.

**Key-words:** Fishing Vessel. Propulsion System. Electric Motor. Market Research.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potências vistas no sistema propulsivo de uma embarcação .....	23
Tabela 2 – Potências presentes no sistema elétrico .....	24
Tabela 3 – Categorias de motores elétricos e suas principais aplicações .....	31
Tabela 4 – Motores de popa elétricos disponíveis no mercado .....	31
Tabela 5 – Comparação quantitativa entre os motores BLDC, PMSM e DC escovado	40
Tabela 6 – Características de formas de armazenamento de energia .....	41
Tabela 7 – Tensão da célula e suas aplicações para eletroquímica .....	43
Tabela 8 – Níveis de Prontidão Tecnológica do projeto.....	54
Tabela 9 – Anúncio e entrada em rigor de leis para mudança de matriz energética .....	59
Tabela 10 – Embarcações semelhantes.....	74
Tabela 11 – Pesos e centros para esta etapa do projeto .....	78
Tabela 12 – Coordenadas do centro de gravidade .....	79
Tabela 13 – Resultados da simulação de resistência ao avanço .....	81
Tabela 14 – Matriz de comparação dos critérios para o método AHP .....	87
Tabela 15 – Resultado do método AHP para seleção do motor elétrico .....	87
Tabela 16 – Eficiências de eficiências entre os tipos de motor e seus controladores.....	88
Tabela 17 – Eficiências estimadas de cada etapa .....	90
Tabela 18 – Principais características do motor selecionado: Mars BLDC ME0913 ....	91
Tabela 19 – Matriz de comparação entre os critérios observados .....	93
Tabela 20 - Resultado do método AHP para seleção da eletroquímica da bateria .....	94
Tabela 21 - Características da bateria selecionada .....	94
Tabela 22 – Características do hélice dimensionado no programa OpenProp .....	96
Tabela 23 – Lista de massas dos componentes do sistema propulsivo selecionado.....	99

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Graus de detalhamento de um projeto.....	7
Figura 2 – Espiral de Evans .....	8
Figura 3 – Embarcação 160F do estaleiro Secboats .....	9
Figura 4 – Componentes da resistência ao avanço .....	10
Figura 5 – Escoamento ideal ao redor do casco de uma embarcação.....	11
Figura 6 – Padrão de ondas e esteira formado a partir da resistência de onda .....	12
Figura 7 – Distinção de embarcações pelo número de Froud, ou velocidade .....	13
Figura 8 – Força hidrostática e força dinâmica de sustentação .....	14
Figura 9 – Cenários $V \approx 0$ e $V \approx V_{MÁX}$ .....	15
Figura 10 – Forças atuantes durante o regime de planeio .....	16
Figura 11 – Parâmetros mostrados na vista frontal .....	17
Figura 12 – Região para instabilidade dinâmica longitudinal em barcos planantes.....	20
Figura 13 – Típicas formas de instalações propulsoras .....	21
Figura 14 – Potências entre o motor e o hélice.....	22
Figura 15 – Esquema de um sistema elétrico .....	24
Figura 16 – Posição do motor de popa .....	25
Figura 17 – Instalação do motor de popa na 160F.....	26
Figura 18 – Patente do motor de popa.....	27
Figura 19 – Principais tipos de motores elétricos.....	29
Figura 20 – Rotor e estator de um motor elétrico.....	30
Figura 21 – Tipos de motor elétrico em motores de popa totalmente elétricos.....	32
Figura 22 – Motor elétrico retrátil para manobra .....	33
Figura 23 – Diferentes tipos de rotor: em gaiola e bobinado. ....	34
Figura 24 – Eficiência de motores de indução pela potência em carga máxima .....	35
Figura 25 – Curva típica de rendimento do motor de indução .....	36
Figura 26 – Posição dos ímãs no rotor: na superfície (esquerda) e no interior (direita). 37	
Figura 27 – Diferença de montagem do motor de indução e de ímã permanente .....	38
Figura 28 – Posição dos ímãs e sistema de controle dos motores BLDC.....	39
Figura 29 – Sistema de controle dos motores PMSM. ....	39

Figura 30 – Configuração típica de uma célula de bateria .....	42
Figura 31 – Densidade energética volumétrica e gravimétrica para cada eletroquímica	44
Figura 32 – Características geométricas de um hélice de 3 pás .....	45
Figura 33 – Conceitos de funcionamento do hélice.....	46
Figura 34 – Diagrama de águas livres de um propulsor .....	48
Figura 35 - Teoria da Sustentação de Prandtl linearizada .....	50
Figura 36 – Hélice em vista lateral de acordo com a teoria.....	51
Figura 37 – Diagrama de forças e velocidades do sistema.....	52
Figura 38 – Associação do vórtice ligado e os vórtices livre .....	53
Figura 39 – Fluxograma do projeto .....	56
Figura 40 – Parcelas de setores de veículos náuticos elétricos em 2014.....	58
Figura 41 – Custo e demanda do mercado para baterias de lítio-íon.....	60
Figura 42 – Intensidade do campo magnético pelo volume do imã ao longo dos anos .	61
Figura 43 – Diferença de eficiência entre carros elétricos, à hidrogênio e à combustão	62
Figura 44 – Tamanho do barco e tipo de navegação do público .....	64
Figura 45 – Consumo de combustível durante a pesca pelo tempo da navegação .....	64
Figura 46 – Tempo de duração das pescarias em águas abrigadas e oceânicas .....	65
Figura 47 – Tempo médio que o motor é acionado durante a pesca esportiva.....	65
Figura 48 – Velocidades mínima e de serviço observadas no formulário .....	66
Figura 49 – Importância da velocidade para pesca.....	67
Figura 50 – O barulho e a fumaça dos motores de popa à combustão avaliados .....	68
Figura 51 – Problemas com gastos de manutenção e combustível na pesca esportiva ..	69
Figura 52 – Hipóteses levantadas para as entrevistas, exemplos de resposta.....	70
Figura 53 – Resultados das hipóteses para as 15 entrevistas .....	72
Figura 54 – Embarcação 160F do estaleiro Secboats .....	75
Figura 55 – Embarcação 160F modelada no Rhinoceros® .....	76
Figura 56 – Vistas dispostas no programa Rhinoceros® da embarcação modelada .....	76
Figura 57 – Arranjo proposto usualmente visto para o barco 160F .....	77
Figura 58 – Motor de popa elétrico e o conjunto de baterias propostos.....	78
Figura 59 – Dados de entrada da extensão Orca3D®.....	80
Figura 60 – Ângulo de trim pela velocidade em nós .....	83



Figura 61 – Resistência ao avanço pela velocidade.....	83
Figura 62 – Gráfico da potência efetiva pela velocidade .....	84
Figura 63 – Comparação entre os gráficos de resistência.....	85
Figura 64 – Eficiência do motor e controlador para motores de ímã permanente.....	89
Figura 65 – Transmissão típica dos motores de popa.....	90
Figura 66 – Dimensões do motor selecionado.....	91
Figura 67 – Diâmetros em motores de popa de 25 HP .....	96
Figura 68 – Curva de performance do hélice para as condições de entrada.....	97
Figura 69 – Seções do hélice para cada parcela radial .....	97
Figura 70 – Vista 3D do hélice otimizado no OpenProp.....	98
Figura 71 – Circulação ótima para cada seção radial do hélice.....	98
Figura 72 – Localização do LCG em relação a potência efetiva para $V = 15$ nós .....	100
Figura 73 – Arranjo geral da embarcação 160F .....	101
Figura 74 – Comportamento da resistência para a nova configuração.....	101
Figura 75 – Potência efetiva e fornecida com a presença de um terceiro passageiro...	102

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_{n\nabla}$	Número de Froud volumétrico	[—]
$V$	Velocidade	[ $m/s$ ]
$g$	Aceleração da gravidade	[ $m/s^2$ ]
$\nabla$	Deslocamento volumétrico	[ $m^3$ ]
$L_{WL}$	Comprimento da linha d'água	[ $m$ ]
$R_T$	Resistência ao avanço	[ $N$ ]
$\Delta$	Deslocamento	[ $kg$ ]
$\tau$	Ângulo de trim	[ $graus$ ]
$F_H$	Força hidrostática	[ $N$ ]
$F_P$	Força de pressão dinâmica	[ $N$ ]
$T$	Força propulsora	[ $N$ ]
$W$	Peso	[ $N$ ]
$D_f$	Resistência friccional	[ $N$ ]
$\epsilon$	Ângulo de aplicação da força propulsora	[ $graus$ ]
$N$	Resultante do campo de pressão	[ $Pa$ ]
$b$	Boca entre quinas	[ $m$ ]
$L_K$	Comprimento molhado da quilha	[ $m$ ]
$L_C$	Comprimento molhado da quina	[ $m$ ]
$U$	Velocidade de avanço	[ $m/s$ ]
$d$	Calado da quilha	[ $m$ ]
$\beta$	Ângulo de <i>deadrise</i>	[ $graus$ ]
$B_{m\acute{a}x}$	Boca	[ $m$ ]
$Z$	Pontal	[ $m$ ]
$\rho$	Densidade do fluido	[ $kg/m^3$ ]
$\lambda$	Relação comprimento molhado - boca	[—]

$C_{FO}$	Coeficiente de fricção	[-]
$Re$	Número de Reynolds	[-]
$\vartheta$	Viscosidade cinemática do fluido	[ $m^2/s$ ]
$C_L$	Coeficiente de sustentação	[-]
$P_E$	Potência efetiva	[ $W$ ]
$V_s$	Velocidade de serviço	[ $m/s$ ]
$V_a$	Velocidade de avanço	[ $m/s$ ]
$\eta_{RR}$	Eficiência rotativa relativa	[-]
$\eta_H$	Eficiência do hélice	[-]
$\eta_t$	Eficiência de transmissão	[-]
$\eta_e$	Eficiência da caixa de redução	[-]
$t$	Coeficiente de dedução de empuxo	[-]
$w$	Fração de esteira	[-]
$I_c$	Corrente elétrica	[ $A$ ]
$U_c$	Força eletromotriz	[ $V$ ]
$M$	Momento	[ $N.m$ ]
$\omega$	Velocidade angular	[ $rad/s$ ]
$J$	Coeficiente de avanço	[-]
$D$	Diâmetro do hélice	[ $m$ ]
$n$	Rotação do hélice	[ $rpm$ ]
$K_T$	Coeficiente de força propulsiva	[-]
$K_Q$	Coeficiente de torque	[-]
$Q$	Torque	[ $N.m$ ]
$F_i$	Magnitude da força de sustentação	[ $N$ ]
$F_v$	Magnitude da força de arrasto viscosa	[ $N$ ]
$\beta_i$	Ângulo da resultante da velocidade de entrada	[ $graus$ ]
$V^*$	Resultante da velocidade de entrada	[ $m/s$ ]

$e_a$	Direção axial	[-]
$r_h$	Raio do bossô do hélice	[m]
$R$	Raio do hélice	[m]
$Z$	Número de pás	[-]
$\Gamma$	Circulação	[m <sup>2</sup> /s]
$C_D$	Coefficiente de arrasto	[-]
$c$	Corda da seção	[m]
$u_a^*$	Velocidade induzida axial	[m/s]
$u_t^*$	Velocidade induzida tangencial	[m/s]
$M$	Número de painéis	[-]
$V_\infty$	Velocidade do fluxo livre	[m/s]

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	4
1.1	OBJETIVOS .....	5
1.1.1	Objetivo Geral .....	5
1.1.2	Objetivos Específicos .....	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1	PROJETO DE EMBARCAÇÕES PESQUEIRAS.....	6
2.2	RESISTÊNCIA AO AVANÇO .....	9
2.2.1	Resistência de fricção .....	10
2.2.2	Resistência de pressão viscosa.....	10
2.2.3	Resistência de ondas .....	11
2.2.4	Método de Savitsky .....	12
2.3	SISTEMA PROPULSIVO.....	20
2.3.1	Motor à combustão .....	25
2.3.2	Motor elétrico .....	29
2.3.3	Bateria.....	40
2.3.4	Propulsor.....	45
3	METODOLOGIA.....	54
4	ESTUDO DE CASO.....	57
4.1	ESTUDO DE MERCADO .....	57
4.2	EMBARCAÇÃO ESCOLHIDA .....	74
4.3	ARRANJO GERAL.....	77
4.4	RESISTÊNCIA AO AVANÇO .....	79
4.5	SELEÇÃO DO MOTOR .....	86

4.6	SELEÇÃO DO CONJUNTO DE BATERIAS.....	92
4.7	SELEÇÃO DO PROPULSOR .....	95
4.8	REFINAMENTO DO PROJETO.....	99
4.9	CONCLUSÃO.....	103

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado da pesca sempre foi movimentado em países que possuem áreas propícias para a atividade. Mantido por muito tempo como uma necessidade, inclusive atividade comercial, hoje já se pode observar um movimento de parcela significativa do setor da pesca à prática esportiva, por puro lazer, transmitindo a cultura pesqueira às novas gerações.

No Brasil não é diferente. Segundo o SEBRAE, em levantamento denominado “Estudo de ideias de negócios para 2014”, entre os anos de 2004 e 2014, a quantidade de pessoas com o hábito de pescar quase dobrou, passando de 4 milhões para 7,8 milhões de praticantes. Isso representa, em números, um mercado que cresce mais de 30% ao ano, movimentando mais de R\$ 1 bilhão apenas no ano de 2013. Em um país com uma imensa costa marítima, 15 mil quilômetros de rios navegáveis, três grandes bacias hidrográficas e clima extremamente favorável, justifica-se com facilidade essa forte tendência de desenvolvimento do mundo pesqueiro.

Entretanto, o mercado brasileiro ainda tem muito a crescer. A título de comparação, nos EUA, onde a pesca esportiva emprega mais trabalhadores que a indústria automobilística, apenas o comércio de equipamentos de pesca movimenta US\$ 45 bilhões ao ano entre os americanos (DCI, 2014). Nessa linha, mas sob outro prisma, por estar diretamente associado ao turismo e ao meio ambiente no mundo, tende-se a exigir do setor da pesca esportiva um crescimento mais orgânico e controlado, focado no desenvolvimento sustentável e não prejudicial a outros setores. E é isso que vem sendo observado, especialmente com a chegada de novas tecnologias.

Uma das guinadas mais aguardadas no meio náutico é a dos motores elétricos em substituição aos motores à combustão. Traços dessa tendência já são realidade no setor automobilístico, onde, segundo relatório da Agência Nacional de Energia (ANEEL), foram vendidos mais de 1,1 milhão de carros elétricos no mundo em 2017, um recorde histórico. Outro dado relevante acerca do assunto foi o anúncio de a Volkswagen de investir mais de R\$ 129 bilhões em carros elétricos e autônomos ao longo dos próximos cinco anos, mostrando que as fabricantes tradicionais também estão aderindo à ideia (Agência France-Presse, 2017) – e confirmando os traços da tendência.

Apesar de antiga, a tecnologia dos motores elétricos foi abandonada pela ascensão dos combustíveis fósseis e pela imaturidade tecnológica quanto à sua implementação, circunstâncias que estão sendo gradualmente superadas (TVEITDAL, 2017).

Dentro da perspectiva da indústria da pesca, os motores elétricos representam um considerável avanço em diversos aspectos, a destacar: são extremamente mais silenciosos e não produzem fumaça, fatores que influenciam bastante na qualidade da pescaria e no conforto dos passageiros; exigem menos manutenção, por possuírem menos componentes; não necessitam do uso de combustível fóssil, como diesel e gasolina; a manobrabilidade de embarcações é feita com muito mais facilidade, principalmente em baixas velocidades, pela resposta instantânea do torque, entre outros. Tais avanços fazem parte do escopo deste trabalho e serão melhor apresentados posteriormente.

E é comendo a conjuntura de mercado da pesca e dos motores elétricos que se propõe, para a presente monografia, um estudo de caso da embarcação 160F, oferecida pelo Estaleiro Secboats, típica de pesca esportiva, que consistirá na determinação conceitual de um sistema propulsivo elétrico para o barco. Uma análise de mercado visando à implementação de barcos de pesca de pequeno porte movidos a energia elétrica também será estudada, observando os objetivos listados abaixo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver o projeto conceitual de um sistema propulsivo elétrico para a embarcação 160F do Estaleiro Secboats.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Conhecer o atual mercado de motores elétricos no meio náutico;
- Modelar o casco da embarcação 160F em programa de CAD;
- Estimar a resistência ao avanço da embarcação pelo método de Savitsky;
- Realizar a integração casco-hélice-motor;
- Otimizar o arranjo geral do projeto.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, toda teoria que embasou o presente trabalho é introduzida. Primeiramente, tem-se uma breve apresentação sobre barcos pesqueiros e as características essenciais de seus projetos. Em seguida, são apresentados os conceitos fundamentais de resistência ao avanço em barcos planantes, tanto no âmbito analítico quanto no computacional. Para isso, revisa-se o tradicional método de Savitsky e sua implementação modificada no programa Orca 3D®.

Como o enfoque da monografia é a implementação de um sistema propulsivo elétrico, será essencial uma revisão teórica completa acerca dos elementos que a compõe. Isto inclui: motores elétricos, conjunto de baterias e o propulsor do tipo hélice. Com intuito de comparar o sistema proposto com os sistemas já existentes no mercado, também será feito um breve resumo sobre os motores de popa à combustão.

Conclui-se este capítulo com uma explanação sobre o que será considerado para o estudo de mercado, assim como quais dados serão abrangidos no estudo. Nesse contexto, a viabilidade econômica do projeto poderá ser melhor desenvolvida e apresentada.

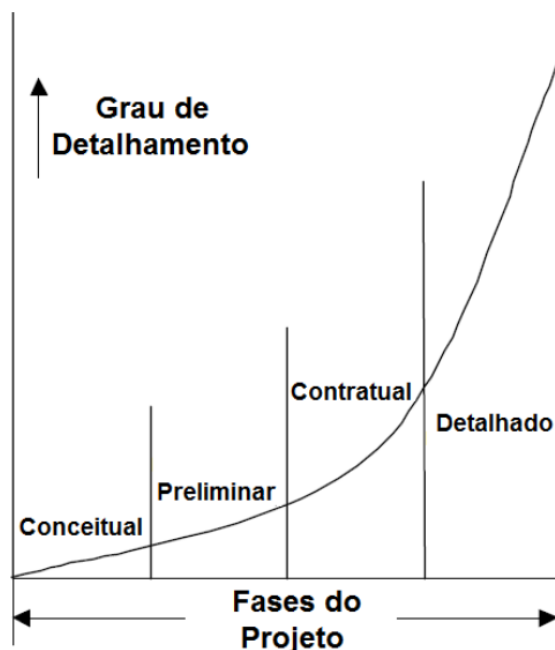
### 2.1 PROJETO DE EMBARCAÇÕES PESQUEIRAS

Primeiramente, a definição de projeto deve estar clara. Projeto é o conjunto de esforços realizados para criação de um produto, os quais constituem atividades ou empreendimentos com início e fim bem programados e formulados. É a determinação de uma solução ainda não existente, a qual usa conhecimentos científicos e práticos, para um entrave que se encontra no atual cenário de mercado profissional e acadêmico.

O projeto de engenharia de uma embarcação é apresentado de maneira complexa, uma vez que o objeto de estudo exige uma alta capacidade de análise de dados e integração de sistemas. O problema é, portanto, abordado em etapas menores com intuito de facilitar o estudo de cada um de seus componentes, tendo sempre em vista sua versão macroscópica. O papel do projetista envolve toda a organização dos requisitos de projeto e atributos de desempenho conflitantes, mirando o objetivo final. Normalmente, este objetivo está relacionado com aspectos físicos, financeiros, sociais ou ambientais, ficando a critério do responsável balanceá-los de forma coerente e buscar a solução ótima para cada cenário (LAMB, 2003).

Segundo Lamb (2003), um projeto pode ser dividido em quatro etapas de acordo com seu grau de detalhamento: conceitual, preliminar, contratual e detalhado. A Figura 1 retrata com mais clareza essa divisão.

Figura 1 – Graus de detalhamento de um projeto



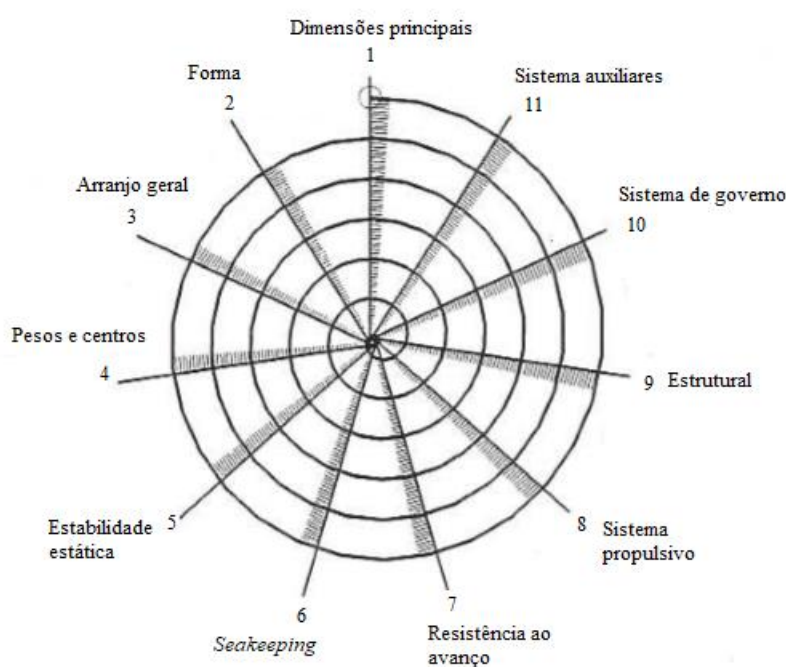
Fonte: Adaptado de Lamb (2003).

A primeira delas, o projeto conceitual, tem a finalidade de analisar os custos e a viabilidade do projeto em questão. Nesta etapa de projeto, realiza-se a coleta das informações necessárias e o desenvolvimento do objetivo a ser realizado pelo sistema. Para tal, é preciso que os interessados trabalhem em conjunto com o intuito de definir quais são os principais requisitos de desempenho. Com esses parâmetros pré-definidos, busca-se criar uma solução que combine da melhor maneira possível todas as variáveis de projeto (LAMB, 2003).

No projeto preliminar, um detalhamento mais refinado deve fornecer um volume de informações suficientes para realização de novas estimativas e análises por parte do projetista, reavaliando a viabilidade técnica e econômica do sistema proposto (LAMB, 2003). Esta reavaliação é o refinamento do sistema proposto na etapa conceitual, buscando melhorar as características do projeto.

Neste contexto, em 1959, J. Harvey Evans entrou para a história da engenharia naval por sintetizar todos os conceitos fundamentais para o processo de projeto do navio em uma representação iconográfica denominada espiral de projeto (AMORIM, 1997). Define-se espiral de Evans a abordagem do processo de projeto de forma sequencial e iterativa. O modelo de espiral normalmente aplicado para barcos de pesca é mostrado na Figura 2. É importante lembrar que ela ainda será adaptada para os requisitos do projeto em questão, uma vez que muitos dos parâmetros analisados podem já ter sido calculados, são de impossível mudança ou irrelevantes.

Figura 2 – Espiral de Evans



Fonte: Adaptado Larsson (2000).

Com a sequência de etapas traçada, refina-se o projeto a cada volta na espiral, visando buscar a solução ótima de acordo com os requisitos abordados. A definição do sistema propulsivo e motorização, objetivo do trabalho, representam o item 8. Seguindo a lógica, deve-se passar por uma série de etapas até completar a primeira volta.

Como o casco da embarcação já existe e é comercializado pelo Estaleiro Secboats, vide Figura 3, assume-se que as principais características estruturais e de construção já foram estudadas (isso inclui também as dimensões principais e a forma do casco).

O arranjo geral será fundamental para o refinamento, já que está diretamente relacionado ao centro de gravidade da embarcação, obtido pelos pesos e centros, item 4. A estabilidade estática e dinâmica (ou *seakeeping*), itens 5 e 6, serão otimizadas em iterações seguintes, após selecionado o possível arranjo propulsivo do barco elétrico na primeira volta da espiral, visando minimizar a resistência ao avanço. A estabilidade dinâmica pode ser averiguada em conjunto com a análise de resistência ao avanço pelo método de Savitsky.

Portanto, seguindo a ordem apresentada, a resistência ao avanço deverá ser estudada, antes de se revisar os componentes do sistema propulsivo.

Figura 3 – Embarcação 160F do estaleiro Secboats

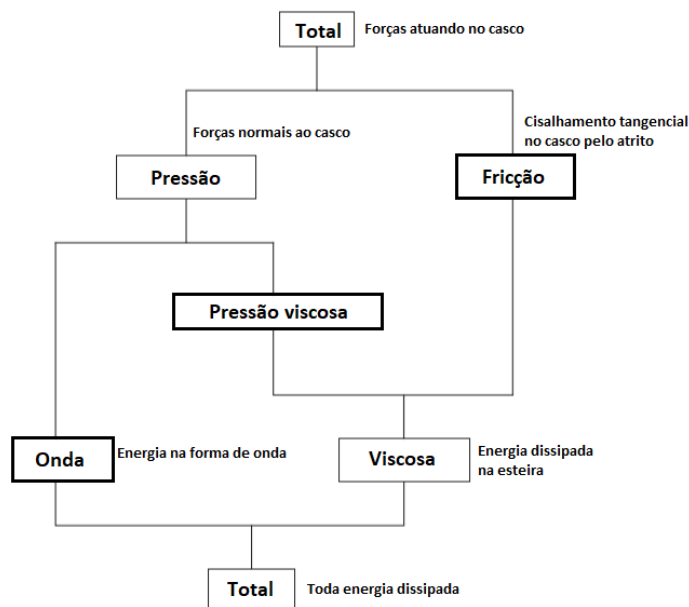


Fonte: Autor (2018).

## 2.2 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Nesta etapa, deseja-se obter o valor da potência requerida pelo motor para movimentar a embarcação a uma determinada velocidade. Para isso, é necessário avaliar, em termos de força, a resistência ao avanço do barco em água calmas e multiplicar pela velocidade de navegação almejada. A força de resistência, neste caso, pode ser dividida em três partes: resistência de fricção ou atrito, resistência de pressão viscosa e resistência de ondas, que interagem entre si (BERTRAM, 2000). Os componentes da resistência podem ser vistos na Figura 4.

Figura 4 – Componentes da resistência ao avanço



Fonte: Adaptado de Molland (2011).

### 2.2.1 Resistência de fricção

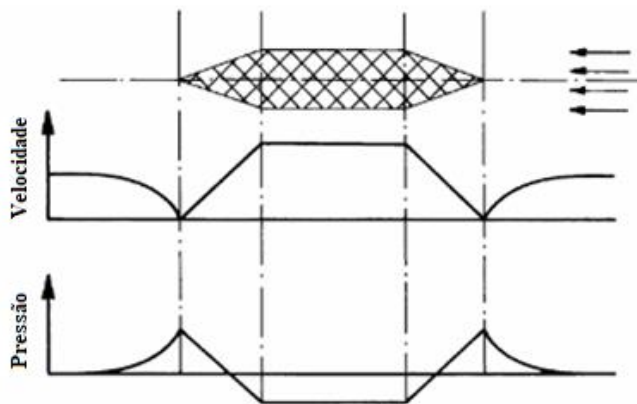
Devido à condição de não escorregamento de fluidos viscosos sobre superfícies sólidas, quando a embarcação navega sob fluido em repouso, as partículas próximas ao casco tendem a se aderir à superfície, adquirindo a velocidade da embarcação. À medida que a distância entre o fluido e o casco aumenta, a velocidade do fluido tende a entrar em repouso, chegando a velocidades próximas de zero. O que define o campo de velocidade do fluido é a camada limite, que define a zona entre o fluido estagnado e o escoamento uniforme. Estas rápidas mudanças de velocidade provocam grande troca de quantidade de movimento dentro da camada limite, resultando em perdas de energia por atrito. A integral do atrito na superfície molhada do casco resulta na resistência de fricção (TRINDADE, 2012; BERTRAM, 2000).

### 2.2.2 Resistência de pressão viscosa

Em um escoamento ideal sob um corpo profundamente submerso (Figura 5), a pressão exercida na popa do corpo é igual à exercida na proa, ou seja, tem-se uma força resultante nula

(Paradoxo D'Alembert). Na prática, efeitos viscosos reduzirão a pressão exercida na popa do navio, criando um gradiente de pressão proa-popa e, assim, uma força de arrasto.

Figura 5 – Escoamento ideal ao redor do casco de uma embarcação



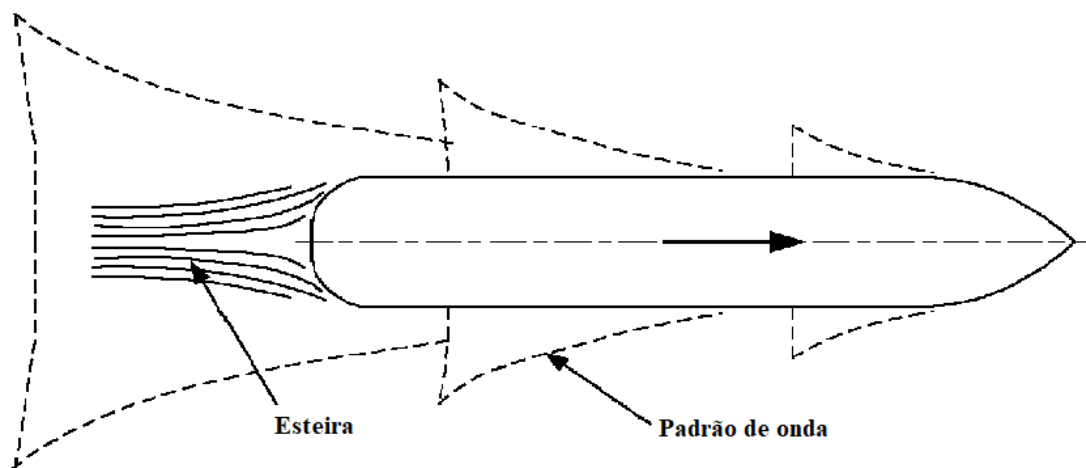
Fonte: Adaptado de Bertram (2000).

A geração de vórtices em regiões de discontinuidades do casco, onde partículas de água perdem sua capacidade de acompanhar o escoamento e acabam se descolando, constituem maior parte desta resistência, formando um volume entre o casco e o escoamento. Estes espaços são preenchidos por vórtices até o ponto de separação da camada limite, aumentando sua espessura inclusive (TRINDADE, 2012).

### 2.2.3 Resistência de ondas

Resultado da interação do casco com a superfície da água, a energia empregada na geração e destruição de padrões de ondas compõe a resistência de ondas (BERTRAM, 2000). Originalmente estudada por Kelvin (1887), que através de experimentos observou a formação de um sistema de ondas transversais e divergentes pelo deslocamento do casco. A Figura 6 ilustra o movimento de uma embarcação pela água, e o padrão de ondas que se forma e acompanha a embarcação. Uma região de turbulência se forma à ré da embarcação, se estendendo e formando a esteira.

Figura 6 – Padrão de ondas e esteira formado a partir da resistência de onda



Fonte: Adaptado de Molland (2011).

Diversos métodos foram desenvolvidos para estimativa da resistência ao avanço total de embarcações, os quais tipicamente foram baseados em ensaios com modelos em escala reduzida e calculados via interpolação dos dados ensaiados de maneira paramétrica. Desta forma, economizava-se tempo e dinheiro, sem prejuízo da obtenção de resultados relativamente confiáveis.

No âmbito de estudo de embarcações de alta velocidade, de acordo com Molland (2011), a parcela de ondas da resistência torna-se pequena e a pressão viscosa torna-se protagonista, sendo responsável pela maior parcela do arrasto. Subdivide-se, então, esta estimativa da resistência ao avanço e classificam os objetos de estudo em embarcações planantes, uma vez que tal progresso representa um salto de complexidade na análise. Isso se dá porque o somatório de forças varia com a velocidade, mudando, conseqüentemente, as características hidrodinâmicas da embarcação.

Dentre os principais métodos desenvolvidos nesta linha de pesquisa, o método de Savitsky é considerado o mais preciso na previsão do comportamento de embarcações planantes e da sua resistência ao avanço.

#### 2.2.4 Método de Savitsky

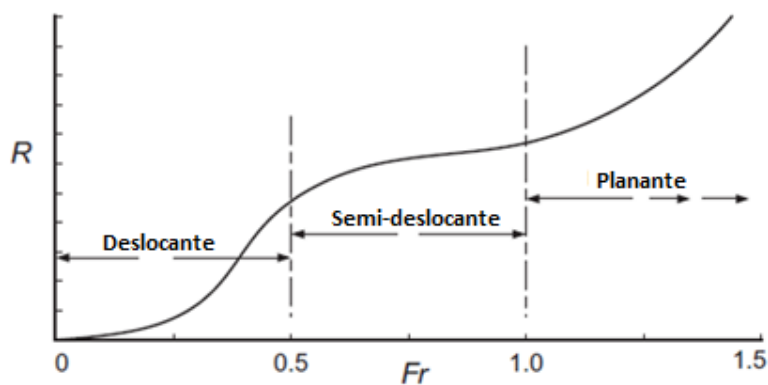
Os trabalhos desenvolvidos por Savitsky (1964) representam talvez o método mais usual para estimativa do comportamento de uma embarcação de planeio, o que inclui diversos

parâmetros como arrasto de fricção, centro de pressão e limites de estabilidade dinâmica longitudinal. Através das séries sistemáticas de diversos autores e contribuições de cerca de quatro décadas, Savitsky elaborou um método semi-empírico considerado preciso para predição de sustentação dinâmica de embarcações e que hoje é amplamente utilizado para estimativa da resistência ao avanço. Apesar disto, existem limitações de precisão decorrentes do fato dos cálculos se basearem em séries feitas com cascos prismáticos, longitudinalmente constantes, diferindo da maioria dos cascos reais. Além disso, o cálculo da posição longitudinal do centro de pressão é simplificado, comprometendo assim o resultado do equilíbrio dinâmico final da embarcação (RIBEIRO, 2002).

#### 2.2.4.1 Embarcações de planeio

Primeiramente, define-se embarcação de planeio. É possível distinguir os tipos de embarcação em três categorias, de acordo com seu comportamento hidrodinâmico para determinadas velocidades, elas são: deslocantes, semi-deslocantes e planantes. Do ponto de vista hidrodinâmico é possível afirmar que as deslocantes são sustentadas inteiramente por forças de flutuação, as semi-deslocantes são sustentadas por uma mistura de forças de flutuação e forças de sustentação dinâmicas, enquanto as planantes são totalmente sustentadas por forças de sustentação dinâmicas (MOLLAND, 2011).

Figura 7 – Distinção de embarcações pelo número de Froude, ou velocidade



Fonte: Adaptado de Molland (2011).

Apesar do mostrado na Figura 7, na qual afirma que embarcações planam a partir de um número de Froude igual a 1,0, é difícil de prever estas transições pela complexidade e quantidade de variáveis que influenciam o fenômeno. Vale citar que, por exemplo, Savitsky (1992) define que



o planeio surge quando o número de Froude de operação for acima de 1,2. Já Faltinsen (2005) generaliza para 1,0 e caracteriza embarcações rápidas a partir de um número de Froude volumétrico maior ou igual a 4,0.

$$F_{nV} = \frac{V}{\sqrt{g\nabla^{\frac{1}{3}}}} \quad (1)$$

Sociedades classificadoras também têm seus padrões para determinar o que é uma embarcação de planeio. Utiliza-se, aqui, a ISO 12215 de 2008, voltada a embarcações de pequeno porte (*Small Craft*), disponibilizada para o trabalho. Por definição, a norma abrange embarcações entre 2,5 e 24 metros que naveguem a velocidades menores de 50 nós. A Parte 5 da norma estabelece que o barco é de planeio caso:

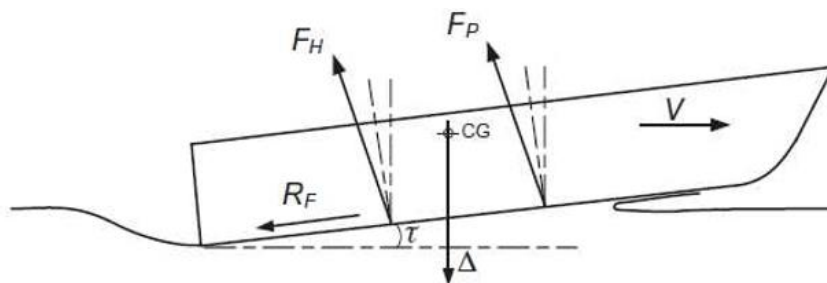
$$\frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{L_{WL}}} \geq 5 \quad (2)$$

A norma também dispõe que o “modo de navegação de planeio” é dado quando a massa total é majoritariamente suportada pelas forças de sustentação dinâmica na água. Portanto, a sustentação dinâmica é o que definirá conceitualmente o planeio.

#### 2.2.4.2 Sustentação dinâmica

A sustentação dinâmica, muito vista também na aeronáutica, nada mais é que uma força hidrodinâmica vertical que, devido à forma do casco, surge a partir do momento em que o escoamento de água é deslocado para baixo pelo encontro com o fundo do casco. Simplificadamente, ela é a reação da força do fluido sendo jogado para baixo. A Figura 8 mostra as forças atuando no barco em movimento.

Figura 8 – Força hidrostática e força dinâmica de sustentação



Fonte: Molland (2011).

Onde,

$R_F$  = resistência de fricção;

$V$  = velocidade;

CG = centro de gravidade;

$\Delta$  = deslocamento;

$\tau$  = trim;

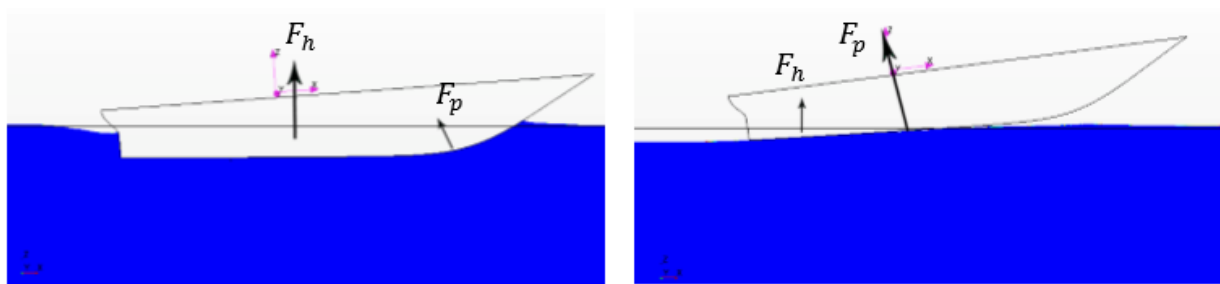
$F_H$  = força hidrostática;

$F_P$  = força de pressão hidrodinâmica – força de sustentação dinâmica.

Quanto maior for a velocidade da embarcação, maior será a força de sustentação dinâmica em relação à força hidrostática. Desta forma, o barco tende a planar. O trim gerado no movimento deve-se ao fato das forças hidrodinâmicas surgirem avante do centro de gravidade, produzindo um momento o qual faz com que o barco levante a proa.

À medida que a velocidade é aumentada, a resultante da força de sustentação tende a se aproximar do CG, diminuir este momento gerado e o barco a se estabilizar longitudinalmente, até encontrar equilíbrio estável. O semi-planeio e planeio ocorrem quando esta resultante é suficiente para sustentar todo peso da embarcação dinamicamente, imergindo-a e fazendo com que ela “deslize” sobre a água. Este cenário é bem ilustrado pela Figura 9, onde a primeira imagem o barco se encontra quase parado e na segunda em sua velocidade máxima.

Figura 9 – Cenários  $V \approx 0$  e  $V \approx V_{MÁX}$

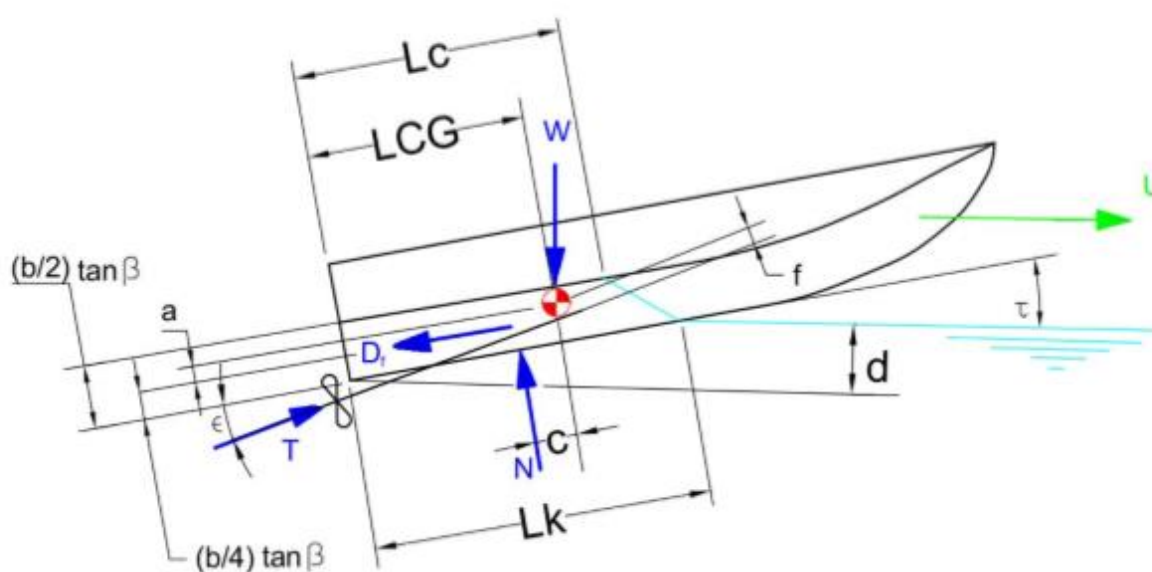


Fonte: Iervolino (2015).

### 2.2.4.3 Equacionamento do método

O método apresentado por Savitsky utilizou uma série de ensaios experimentais para desenvolver equações semi-empíricas para diversos parâmetros, como a força de sustentação, o ângulo de trim e própria resistência ao avanço para superfícies de planeio navegando com velocidades constantes. Apresenta-se as principais forças que atuam durante o regime de planeio e as dimensões que foram utilizadas no método na Figura 10.

Figura 10 – Forças atuantes durante o regime de planeio



Fonte: Nakanishi (2015).

Onde,

$T$  = força propulsora;

$W$  = peso da embarcação;

$D_f$  = resistência friccional;

$\tau$  = trim;

$LCG$  = centro de gravidade longitudinal, medido a partir do espelho de popa;

$\epsilon$  = ângulo de inclinação do eixo propulsor, medido em relação à quilha;

$N$  = resultante do campo de pressão que atua no fundo do casco;

$a$  = distância entre  $D_f$  e CG, medida perpendicularmente à  $D_f$ ;

$f$  = distância entre T e CG, medida perpendicularmente à T;

$c$  = distância entre N e CG, medida perpendicularmente à N;

$b$  = boca no *chine*<sup>1</sup> da embarcação (melhor visto na Figura 11);

$L_K$  = comprimento molhado da quilha;

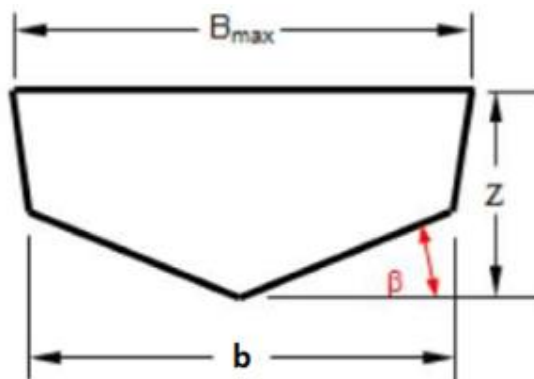
$L_c$  = comprimento molhado do *chine*;

$U$  = velocidade de avanço;

$d$  = calado da quilha, medida no espelho de popa;

$\beta$  = ângulo de *deadrise*<sup>2</sup> (melhor visto na Figura 11).

Figura 11 – Parâmetros mostrados na vista frontal



Fonte: Savitsky (1964).

Onde,

$B_{max}$  = boca da embarcação;

$Z$  = pontal da embarcação.

O primeiro passo para a resolução do problema é aplicar a Segunda Lei de Newton, resolvendo o sistema resultante de forças que atua no casco. Para o equilíbrio das forças horizontais, tem-se:

<sup>1</sup> Também conhecido como “quina”, é onde termina a primeira seção da boca. Foi preferido deixar o termo na versão inglesa por ser mais usual;

<sup>2</sup> É a angulação da boca na vista frontal da embarcação, também deixado em inglês por ser mais comum.

$$\cos(\tau + \epsilon) = D_f \cos \tau + N \operatorname{sen} \tau \quad (3)$$

Para o equilíbrio de forças verticais, tem-se:

$$W = N \cos \tau + T \operatorname{sen} (\tau + \epsilon) - D_f \operatorname{sen} \tau \quad (4)$$

E para o equilíbrio dos momentos em relação ao centro de gravidade, tem-se:

$$N c + D_f a = T f \quad (5)$$

Fazendo as devidas substituições, o sistema de equações pode ser sintetizado em uma única equação:

$$W \left\{ \frac{[1 - \operatorname{sen} \tau \operatorname{sen} (\tau + \epsilon)]}{\cos \tau} c - f \operatorname{sen} \tau \right\} + D_f (a - f) = 0 \quad (6)$$

Os valores de  $W$ ,  $\epsilon$ ,  $a$  e  $f$  são dependentes apenas da geometria, do arranjo do barco e da instalação propulsora da embarcação. Assim, restam as variáveis  $\tau$ ,  $D_f$  e  $c$  que são, respectivamente, o ângulo de trim de equilíbrio, a resistência friccional e o braço da força resultante do campo de pressão que atua no fundo do barco. Sabe-se que a resistência friccional depende da área molhada do barco, que é determinada através da geometria do casco e do ângulo de trim. O mesmo vale para  $c$ . Portanto, resumidamente, o equilíbrio depende inteiramente na variação do trim da embarcação.

Nesta etapa entram os ensaios experimentais conduzidos por Savitsky. Eles tiveram como finalidade a obtenção prática de equações semi-empíricas para a sustentação, comprimentos molhados (componente friccional) e a posição do centro de pressão, as quais são imprescindíveis para encontrar a resistência ao avanço total.

Após diversas formulações, a equação final obtida pelo método para estimativa da resistência é mostrada abaixo. Savitsky propõe um processo iterativo a fim de encontrar um ângulo de trim de equilíbrio que, depois de obtido, permite que todos os outros parâmetros sejam encontrados.

$$R_T = W \tan \tau + 0,5 \frac{V^2 \rho \lambda b^2 C_{FO}}{\cos \tau \sec \beta} \quad (7)$$

Onde,

$R_T$  = resistência ao avanço da embarcação;

$\rho$  = densidade do fluido onde a embarcação navega;

$$\lambda = \frac{(L_K + L_C)}{2b} = \text{relação comprimento molhado – boca};$$

$$L_K = \lambda b + \frac{b \tan \beta}{2\pi \tan \tau};$$

$$L_C = \lambda b - \frac{b \tan \beta}{2\pi \tan \tau};$$

$C_{FO}$  = coeficiente de fricção, baseado no método ITTC 1957, em função do número Reynolds relativo à boca;

$$R_e = \frac{V_1 \lambda b}{\vartheta} = \text{Reynolds relativo à velocidade média no fundo do casco } (V_1) \text{ e boca};$$

$\vartheta$  = viscosidade cinemática do fluido.

Em relação à velocidade média no fundo casco, vale comentar que ela é menor que a velocidade de serviço, uma vez que há um aumento de pressão do fluido devido à passagem do casco do barco. Uma expressão que sumariza a relação destas velocidades pode ser vista no trabalho de Hadler (1966) e é mostrada abaixo, já que Savitsky apresentou esta relação apenas através de gráficos nos seus trabalhos.

$$\frac{V_1}{V} = \left[ 1 - \frac{0,012\lambda^{0,5}\tau^{1,1} - 0,0065\beta(0,012\lambda^{0,5}\tau^{1,1})^{0,6}}{\lambda \cos \tau} \right]^{0,5} \quad (8)$$

É importante ressaltar que o método possui correções empíricas de diversos parâmetros da embarcação, assim como intervalos de validade baseados nos ensaios realizados e, conseqüentemente, nas formulações utilizadas para chegar na resistência ao avanço.

Outra consideração a ser levantada é o fato de o método apresentado ter sido feito para cascos totalmente prismáticos, sem variação do ângulo de *deadrise*, sem a presença de apêndices e para velocidades de planeio completamente desenvolvidas. Nenhuma dessas premissas se aplica para o caso da embarcação 160F. Desta forma, alguns métodos complementares, os quais aumentam a abrangência e precisão, foram propostos desde a publicação de Savitsky (1964). Um bom compilado destas melhorias é utilizado hoje por empresas que desenvolvem programas computacionais no ramo da engenharia naval e serão vistos adiante.

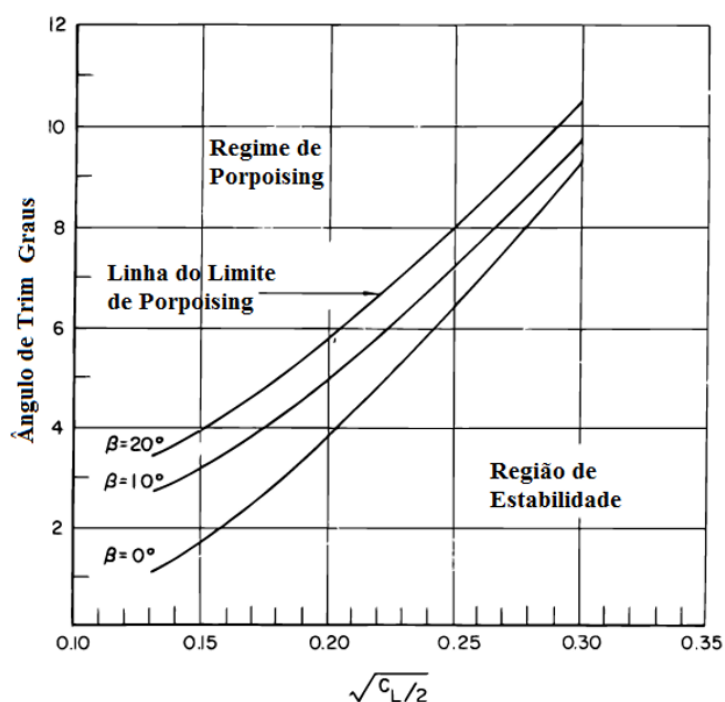
#### 2.2.4.4 Estabilidade dinâmica longitudinal

O último tema a ser visto acerca do método de Savitsky é a estabilidade dinâmica longitudinal. Também conhecida pelo termo inglês *porpoising*, é um fenômeno particular para

casos planantes de altas velocidades que ocorre ao navegar em águas calmas. É uma combinação de oscilações na embarcação em movimentos de *pitch* e *heave*, de amplitude constante ou crescente que pode levar a danos estruturais devido ao choque da embarcação contra a água (MARIN, 2015).

Basicamente, os resultados do estudo sobre *porpoising* mostram que para dado ângulo de *deadrise* há uma relação específica entre o ângulo de trim,  $\tau$  e o coeficiente de sustentação,  $C_L$ , que definem o início da instabilidade. Dessa forma, pode-se traçar um gráfico com áreas seguras para navegação sem que o fenômeno ocorra, como visto na Figura 12.

Figura 12 – Região para instabilidade dinâmica longitudinal em barcos planantes



Fonte: Adaptado de Savitsky (1964).

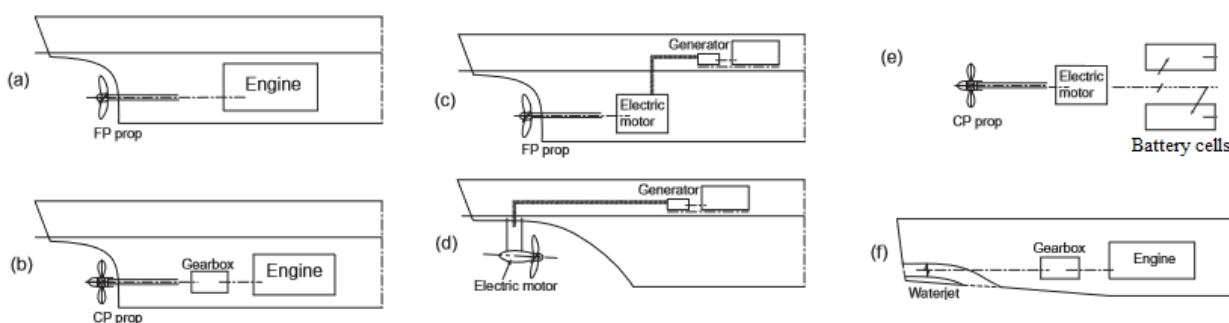
### 2.3 SISTEMA PROPULSIVO

Com os valores de resistência ao avanço estimados, a próxima etapa consiste em selecionar o sistema de propulsão. Ele consiste no conjunto de componentes responsável por fornecer energia para que a embarcação consiga se deslocar na água, superando a resistência ao avanço. O arranjo e a seleção desse sistema dependem dos requisitos de projeto, como velocidade

de serviço e condições de operação, assim como das características do barco, como espaço e tamanho.

Os principais componentes de um sistema de propulsão à combustão para navios são: o motor, 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. Molland (2011) resume bem essas formas, as quais podem ser vistas na Figura 13.

Figura 13 – Típicas formas de instalações propulsoras



Fonte: Adaptado de Molland (2011).

Onde,

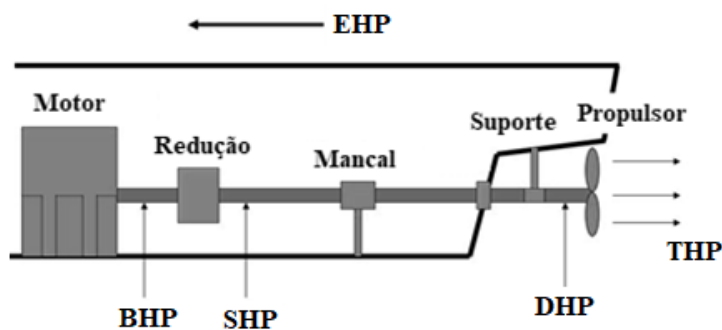
- a) Diesel direto: normalmente utilizado para rotações baixas (entre 90 e 130 rpm). Embarcações como graneleiros, contêineiros e petroleiros;
- b) Diesel com caixa de redução: usado para velocidades médias (entre 500 e 600 rpm). A caixa de redução pode se apresentar de diferentes formas. Embarcações para transporte de passageiros, balsas e lanchas menores;
- c) Sistema híbrido: gerador normalmente de diesel fornecendo energia para o motor elétrico que por sua vez fornece para o eixo e hélice;
- d) Sistema híbrido com motor elétrico externo: mesmo esquema que o anterior, porém com o motor elétrico conectado direto no hélice. Embarcações como veleiros e multicascos elétricos que requerem boa manobrabilidade;
- e) Sistema elétrico: energia fornecida por baterias que são carregadas antes do início da navegação. Normalmente usados como motor reserva para segurança.



- f) Sistema de propulsão a jato: usado para rotações médias (500 rpm) e altas (1000 rpm) com motores a diesel. Jet-skis e superfícies planantes.

Até o propulsor (o que de fato fornecerá a energia para a embarcação navegar na velocidade desejada), há diversas perdas, as quais precisam ser previamente avaliadas. Com essa estimativa, pode-se selecionar um motor para o barco, assegurando-se que ele suprirá os requisitos, apesar das perdas de energia ao longo do processo. A Figura 14 mostra um modelo típico visto em aplicações náuticas, com motor, transmissão com redução e o hélice propulsor.

Figura 14 – Potências entre o motor e o hélice



Fonte: Adaptado de Pope (2010).

Para cada componente do sistema há uma perda associada que pode ser estimada. A Tabela 1 explica com detalhes cada uma das potências deste tipo de modelo.

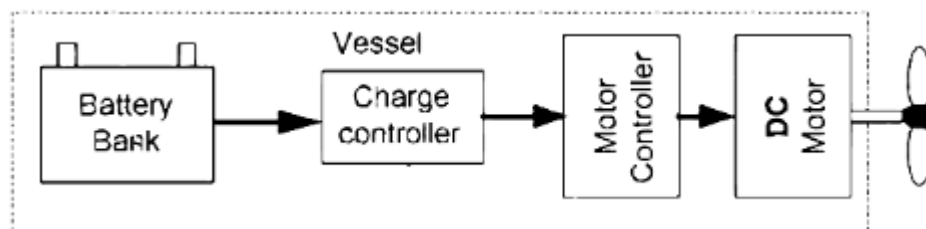
Tabela 1 – Potências vistas no sistema propulsivo de uma embarcação

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 ( $n_H$ ).	$DHP = \frac{THP}{n_p};$ $n_p = n * n_{RR} * n_H;$ $n_H = \frac{1 - t}{1 - w};$
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: Martins (2017).

No entanto, o enfoque deste trabalho é o sistema propulsivo elétrico, representado anteriormente pela letra “e”, o qual será selecionado e dimensionado. Ele consiste principalmente em um motor elétrico, um banco de baterias e o hélice propulsor. Segundo Tveitdal (2017), eles ainda precisam possuir os controladores de carga da bateria e do motor, de acordo com esquema mostrado na Figura 15.











Figura 15 – Esquema de um sistema elétrico

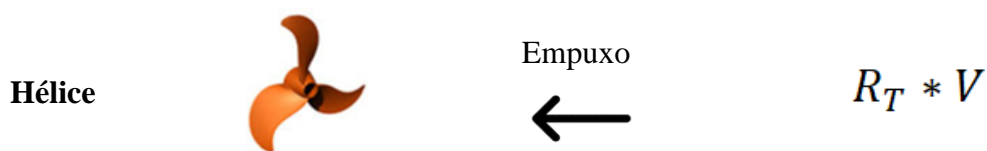


Fonte: Tveitdal (2017).

A Tabela 2 evidencia as potências de sistemas propulsivos inteiramente elétricos, mais especificamente de motores de popa. Vale lembrar que as eficiências de cada uma das etapas de potência serão melhor discutidas no capítulo do estudo de caso.

Tabela 2 – Potências presentes no sistema elétrico

		<b>Energia</b>	<b>Potência</b>
<b>Baterias</b>		Corrente contínua  DC	$I * U$
<b>Cabos</b>		Corrente contínua  DC	$I_C * U_C$
<b>Alternador</b>		Corrente alternada  AC	$\frac{1}{T} \int_0^T U_E(t) * I_E(t) dt$
<b>Eixo do motor</b>		Rotação 	$M_M * \omega_M$
<b>Eixo do hélice</b>		Rotação 	$M_P * \omega_P$



Fonte: Adaptado de Torquedo (2018).

Tendo isso em vista, todas as opções de cada um dos componentes serão estudadas, de forma a projetar o melhor sistema possível dentro dos requisitos de projeto e limites tecnológicos e financeiros.

### 2.3.1 Motor à combustão

Um motor à combustão tem como principal função transformar a energia química do combustível em energia mecânica. Os motores mais comuns para embarcações de pequeno porte (até 26 pés) são os motores de popa. Caracteriza-se, como o próprio nome diz, por estar instalado no espelho de popa da embarcação e ter o propulsor conectado por um sistema de transmissão do tipo rabeta, como visto na Figura 16.

Figura 16 – Posição do motor de popa



Fonte: FS Yachts (2016).

Normalmente, utiliza gasolina como combustível e, por isso, necessita de um tanque que fica na parte interna do barco quando instalado. Como a embarcação 160F teve seu interior e exterior previamente projetados para esta instalação, mostrada na Figura 17, será dado um enfoque

maior a este tipo de arranjo propulsivo – motor de popa, transmissão do tipo rabeta e hélice propulsor.

Figura 17 – Instalação do motor de popa na 160F

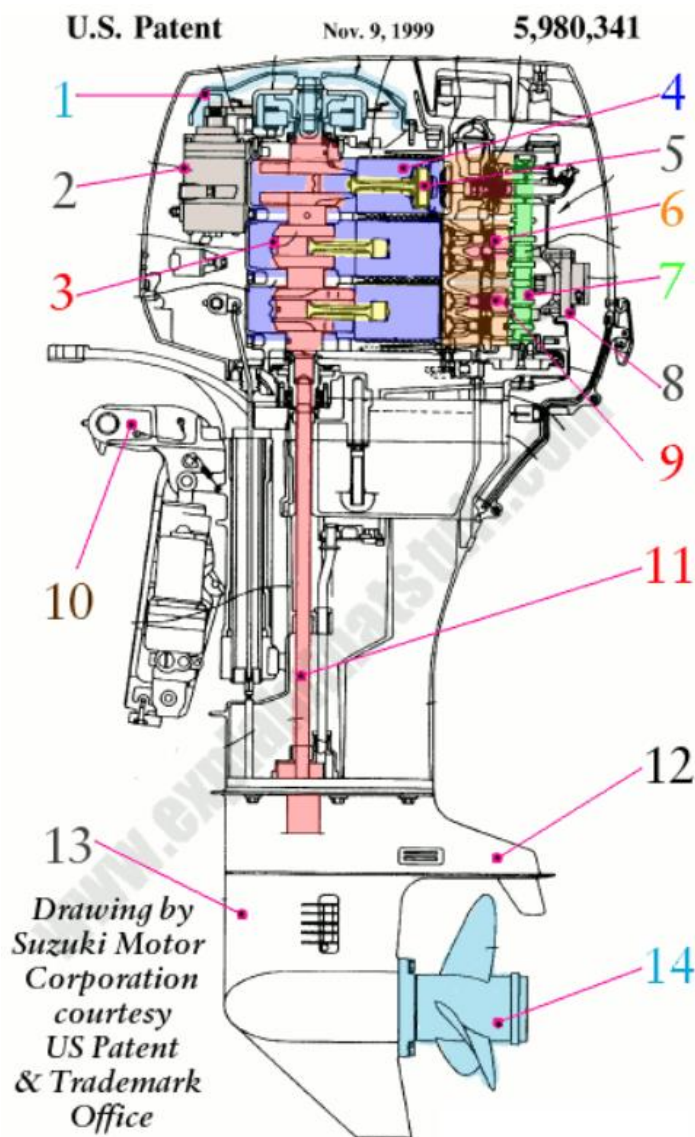


Fonte: Autor (2018).

Quando comparado aos outros tipos de motores, as principais vantagens dos motores de popa são a facilidade de manutenção, o peso e o preço. Por ficarem inteiramente na parte externa do barco, tem-se um melhor acesso ao equipamento e também a possibilidade de remoção. Pelo peso, como é utilizada gasolina, combustível mais leve que o diesel, as peças que compõe o motor podem ser menos robustas, conferindo um menor preço e peso total.

Nessa linha, o funcionamento deste conjunto é detalhado abaixo, de acordo com a própria patente da invenção, disponibilizada pela Suzuki (1999). A Figura 18 mostra os principais componentes presentes no sistema.

Figura 18 – Patente do motor de popa



Fonte: Adaptado de Suzuki (1999).

Onde,

- 1) Volante (em azul): pesada roda que tem como função armazenar energia rotacional para ajudar o motor a manter sua velocidade durante seu funcionamento;
- 2) Motor de arranque (cinza): normalmente um motor elétrico é acionado para pôr em movimento o motor principal. Também é visto acionamento por corda, a qual é engatada ao volante (1) para acionar mecanicamente o motor principal;

- 3) Virabrequim (vermelho): coleta energia dos pistões para posterior transferência ao eixo, transformando o movimento linear dos pistões para o movimento rotacional do eixo;
- 4) Cilindros (azul): o motor em destaque tem três cilindros arranjados horizontalmente. Eles têm a função de abrir os pistões e é dentro deles que acontece a combustão;
- 5) Pistões (amarelo): movimentam-se para trás e para frente dentro dos cilindros através da energia liberada na queima do combustível, transferindo essa energia para o virabrequim;
- 6) Carburadores (laranja): combinam o combustível com ar para realizar a combustão (há um carburador para cada cilindro);
- 7) Eixo de comando (verde): abre e fecha as válvulas do cilindro para entrada de combustível e saída dos gases de exaustão da queima;
- 8) Bomba de combustível: responsável pelo envio de combustível para os carburadores;
- 9) Velas de ignição (vermelho): como o próprio nome diz, elas têm a função de fazer a ignição dentro dos cilindros;
- 10) Suporte de montagem: onde o motor engate no espelho de popa do barco, é onde o movimento de trim do motor é realizado;
- 11) Eixo de transmissão (vermelho): transmite a energia gerada pela combustão até a caixa de redução e depois ao hélice propulsor;
- 12) Placa anticavitação: parte projetada para diminuir o efeito de cavitação nas pás do hélice (será explicado na seção do Hélice Propulsor);
- 13) Caixa de redução: apesar de não ser detalhado no documento da patente, ele tem duas funções básicas. A primeira é ajustar a rotação para o hélice com intuito de aumentar a eficiência do mesmo. A segunda é embutir um sistema de engrenagens para realizar a reversão do movimento do propulsor;
- 14) Hélice propulsor.

Como visto, são diversos componentes que constituem o motor, encaixados de forma a ocupar o mínimo espaço possível e compactar-se em apenas um equipamento. Entretanto, pelo fato de dependerem da combustão para produção de energia, isto traz consigo grandes

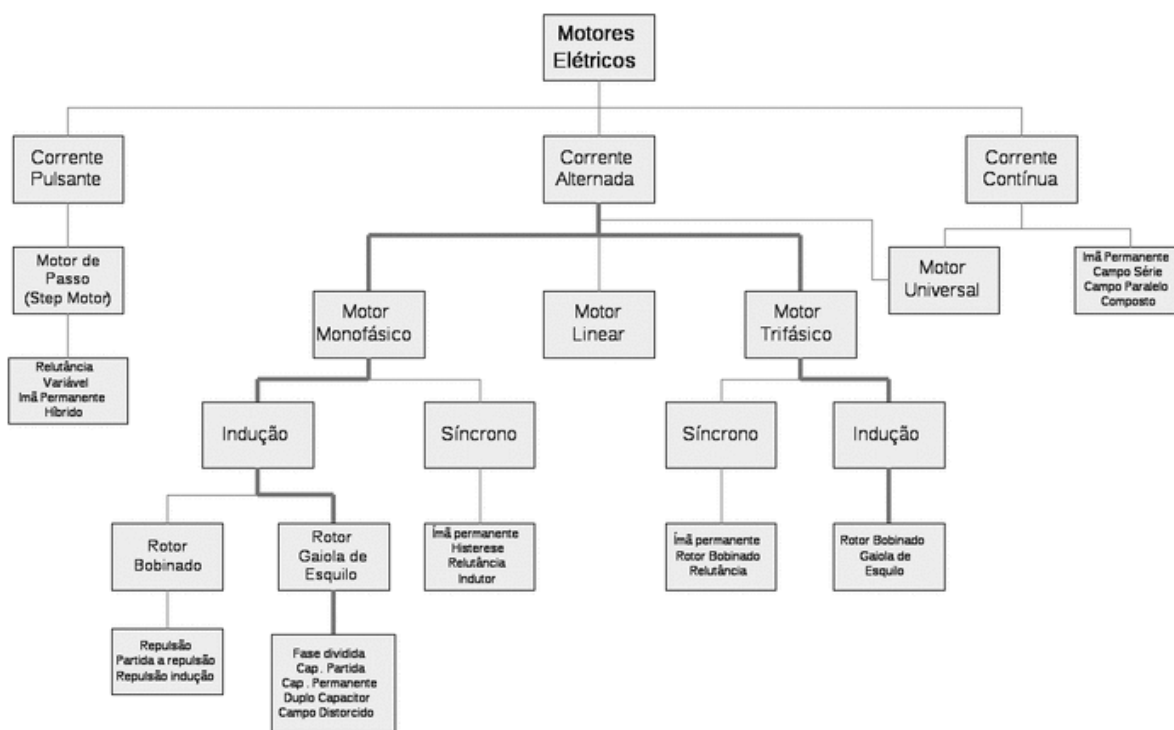
desvantagens, principalmente para pesca, como fumaça, barulho e baixíssima eficiência energética.

Nesse sentido, uma alternativa elétrica para um motor compactado como os motores de popa atualmente encontrados no mercado é proposta, fugindo dos problemas descritos e também se adequando ao projeto interno da embarcação utilizada para o estudo de caso.

### 2.3.2 Motor elétrico

Os motores elétricos são máquinas responsáveis por transformar energia elétrica em energia mecânica. Seu princípio de funcionamento está associado à interação entre corrente elétrica e campo magnético a fim de produzir movimento relativo entre eles e, assim, produzir energia mecânica. Os diversos tipos de motores elétricos podem ser classificados pela corrente elétrica que os alimenta, conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Principais tipos de motores elétricos



Fonte: IFSC-RS (2016).

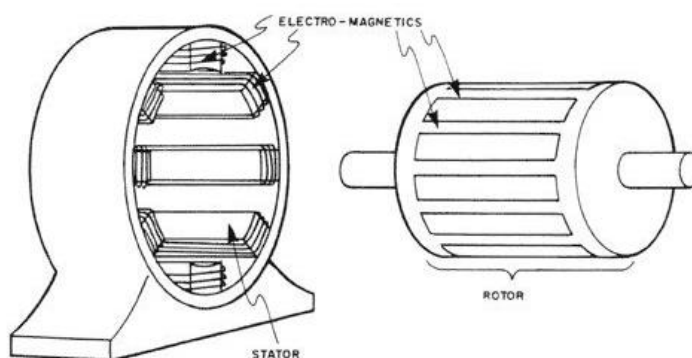
Os tipos mais comuns de motores elétricos hoje são os motores de corrente alternada (CA), que pode ser subdivididos em motores síncronos e motores de indução (também conhecidos



como motores assíncronos); motores de corrente contínua (DC); e os motores universais, que utilizam os dois tipos de corrente.

Na maior parte dos casos, os motores elétricos são compostos por duas partes (Figura 20): o rotor (enrolamento de armadura), que é a parte móvel (girante); e uma parte fixa, denominada estator ou carcaça (enrolamento de campo ou imã permanente). Dentro do estator, há bobinas por onde passam duas correntes diferentes ( $I_1$  e  $I_2$ ). A interação eletromagnética das correntes gera um torque no rotor ( $T_{motor} = KI_1I_2$ ) que acelera a carga do eixo acoplado até que  $T_{motor} = T_{carga}$ , desacelerando e mantendo uma velocidade constante (PATEL, 2012).

Figura 20 – Rotor e estator de um motor elétrico



Fonte: Formación Para La Industria 4.0 (2014).

O motor entrega o que é necessário ao eixo e extrai energia da fonte igual ao que entrega 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:

$$P(HP) = \frac{T_{lb.ft} n_{rpm}}{5252} \quad (9)$$

$$P(kW) = \frac{T_{N.m} 2\pi n_{rpm}}{60000} \quad (10)$$

Tendo isso em vista, a Tabela 3 apresenta os tipos de motores e seu uso de energia em várias classificações de potência. Ressalta-se 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 (PATEL, 2012).

Tabela 3 – Categorias de motores elétricos e suas principais aplicações

<b>Categoria do Motor</b>	<b>Porcentagem de utilização em relação a todos os motores</b>	<b>Porcentagem de energia usada em relação a todos os motores</b>	<b>Aplicação Típica</b>
<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 entanto, isso não necessariamente condiz com a presente aplicação. Com intuito de limitar o estudo a apenas aos motores que de fato poderão ser utilizados no presente projeto, pela variedade de opções disponíveis, faz-se uma comparação entre os principais tipos vistos em motores de popa elétricos.

Por ser uma tecnologia relativamente recente, foram levantados somente 14 motores no mercado de 14 diferentes empresas. A Tabela 4 mostra os principais dados estudados.

Tabela 4 – Motores de popa elétricos disponíveis no mercado

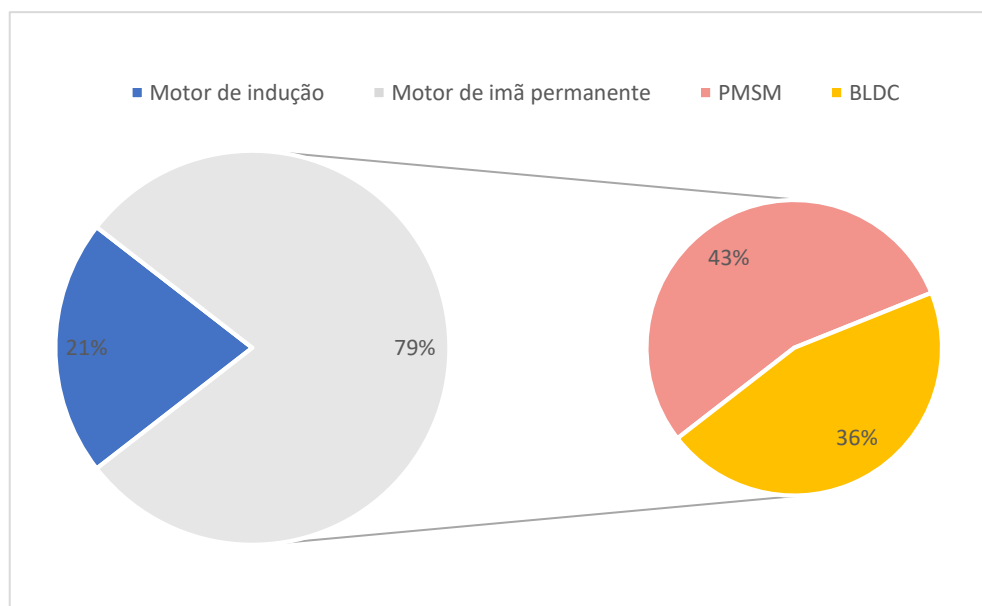
<b>Empresa</b>	<b>Motor elétrico</b>	<b>Arrefecimento</b>	<b>Potência de entrada [kW]</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>Redução</b>	<b>Rotação no hélice [rpm]</b>	<b>Tensão nominal [V]</b>
<b>Aquawatt</b>	Indução	água	13,0	52,0	-	2500	48
<b>ePropulsion</b>	BLDC	ar	6,0	25,0	1,85	1550	48
<b>Elco</b>	PMSM	água	8,8	39,0	2,08	1500	48
<b>Torqueedo</b>	PMSM	água	10,0	60,0	2,08	1400	48
<b>Parsun</b>	Indução	água	7,3	42,0	2,08	2160	48
<b>Pure Watercraft</b>	PMSM	-	20,0	41,7	8,00	1500	350
<b>Goldmotor</b>	BLDC	água	6,0	35,0	-	2500	48
<b>EZ outboards</b>	BLDC	água	12,0	48,0	-	2500	48

<b>KARVIN</b>	BLDC	água	6,8	26,0	-	1500	48
<b>Ray Electric</b>	Indução	ar	5,0	-	2,60	-	60
<b>Stealth</b>	PMSM	água	23,0	57,0	-	2500	96
<b>Hangkai</b>	BLDC	ar	3,8	10,5	1,50	2000	48
<b>Motor INEP</b>	PMSM	água	10,5	-	2,08	2645	96
<b>Kräutler</b>	PMSM	-	8,0	48,0	1,00	1200	48

Fonte: Autor (2018).

Nota-se que são três tipos de motores principalmente utilizados para esta aplicação: o de indução, como anteriormente mencionado por Patel (2012); o BLDC (Corrente Contínua Sem Escovas, do inglês *Brushless Direct Current*); e o PMSM (Motor Síncrono de Imã Permanente, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Motor*). Os últimos dois são motores de imã permanente, subdivisões do PMAC (Imã Permanente de Corrente Alternada, do inglês *Permanent Magnet Alternating Current*), como será visto adiante. A Figura 21 ilustra o cenário atual do mercado de motores de popa elétricos.

Figura 21 – Tipos de motor elétrico em motores de popa totalmente elétricos



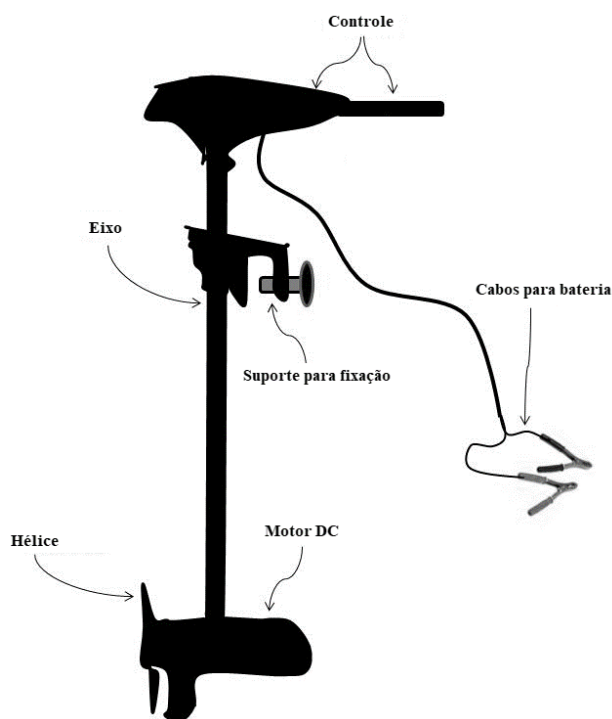
Fonte: Autor (2018).

Os motores elétricos portáteis (Figura 22) também são muito utilizados na pesca, principalmente para manobra da embarcação e deslocamento na velocidade de pesca. Entre eles, o principal tipo de motor elétrico visto é o motor de corrente contínua com escovas, por causa do

seu custo de aquisição baixo (para potências baixas) e o fato de não precisar de um controlador para velocidades fixas (BASNET, 2013).

Tendo isso em visto, pode-se afirmar que ela é a opção mais simples de utilizar. Fornecer corrente contínua constante ao motor é suficiente para o acionar. O grande problema da tecnologia é a manutenção e a durabilidade, uma vez que ele comporta enrolamentos ou comutadores no seu interior (DARAMMELAERE, 2016).

Figura 22 – Motor elétrico retrátil para manobra



Fonte: Adaptado de Basnet (2013).

Segundo Matheou (2018), apesar dos motores DC com escovas terem sido amplamente usados no meio náutico, sua versão sem escovas (com uso de ímãs permanentes em substituição às bobinas, por exemplo) vem para substituí-los pelas seguintes razões:

- Controle dinâmico das velocidades;
- Menor manutenção e peso pelo fato de não possuírem escovas;
- Produzem ainda menos ruído;
- Maior eficiência;
- Maior segurança de operação por ter melhor dissipação de calor.

Nesse sentido, as principais características dos motores de indução e de imã permanente serão apresentadas, pois representam maior parcela de uso no mercado.

### 2.3.2.1 Motor de indução

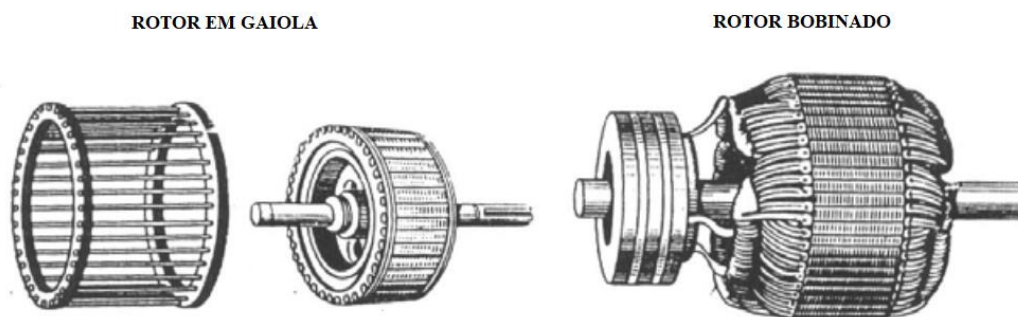
O motor de indução é mais barato e fácil de manter que as demais alternativas disponíveis no mercado, principalmente se comparado ao motor DC. Isso se deve ao fato de não possuir comutador o que o torna um motor de construção mais simples. Possui vantagens em aplicações de boa eficiência em uma estreita faixa de velocidades, podendo ser empregado numa grande quantidade de aplicações. Ainda assim, sua maior vantagem é o baixo custo, seu preço é o maior atrativo para a indústria em geral (SANTOS, 2015).

Como mencionado, o motor de indução é composto pelo estator e rotor (vide Figura 20). Entre eles existe um entreferro preenchido com ar. Seu nome deriva do fato das correntes alternadas serem induzidas no rotor pelo campo magnético girante produzido no estator.

A aplicação de tensão alternada nos enrolamentos do estator produz campos magnéticos pulsantes que geram um campo resultante girante com a frequência da rede. O fluxo magnético no estator, então, induz tensão alternada no enrolamento trifásico do rotor que produz um fluxo no rotor que tentará se alinhar com o campo magnético girante do estator (SANTOS, 2015).

Existem dois tipos de motores de indução e é a configuração do rotor os difere: rotor em gaiola e rotor bobinado (Figura 23). O motor com rotor em gaiola é o mais comum principalmente em virtude do menor preço (SANTOS, 2015).

Figura 23 – Diferentes tipos de rotor: em gaiola e bobinado.

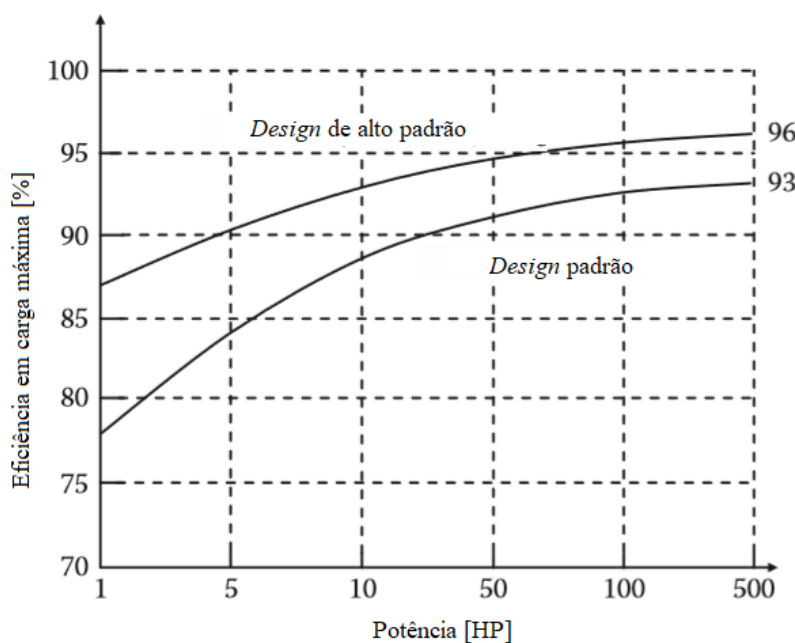


Fonte: Adaptado de PUC (20..).

O motor de indução, diferente de outros motores, apresenta escorregamento, ou seja, o rotor gira com rotação levemente mais baixa que o campo girante do enrolamento de armadura. Se o rotor girasse com a mesma velocidade do campo girante não haveria tensão induzida no rotor e assim ele iria perder velocidade (SANTOS, 2015). Por esse motivo ele é considerado assíncrono.

A eficiência do motor de indução depende da potência que ele fornece, uma vez que motores maiores são desenvolvidos para possuírem eficiências maiores quando comparadas aos motores menores. Como pode ser visto na Figura 24, motores com potências maiores a 500 HP normalmente têm eficiências de 93% em *design* padrão e 96% em *design* de alto padrão<sup>3</sup> em carga máxima (PATEL, 2012).

Figura 24 – Eficiência de motores de indução pela potência em carga máxima



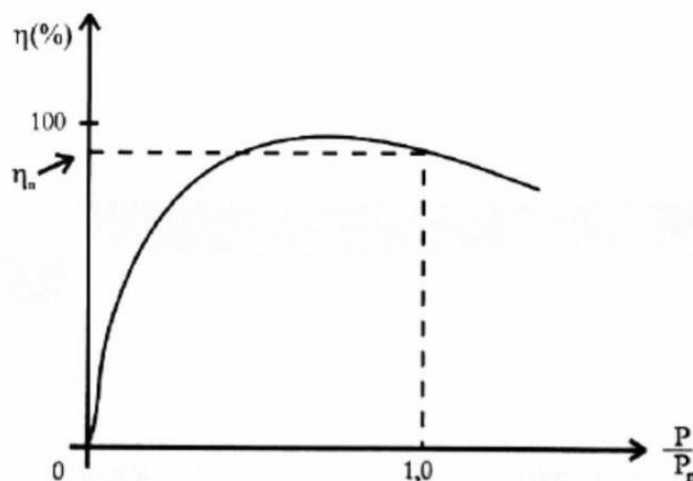
Fonte: Adaptado de Patel (2012).

Todavia, o motor usualmente não trabalha em carga máxima. A Figura 25 mostra a eficiência pela porcentagem da potência nominal usada. A curva mostra que, para cargas pequenas, em relação a sua potência nominal, o rendimento é baixo, já que as perdas fixas são maiores comparadas com a potência fornecida. Quando o carregamento do motor cresce, o rendimento se

<sup>3</sup> Alto padrão segundo normas da NEMA (*National Electrical Manufacturers Engineers*), o qual envolve requisitos de eficiência energética e regulações ambientais.

eleva e, quando o motor opera com mais de 50% de sua potência nominal, o rendimento é muito próximo dos valores de rendimento nominal e máximo, que para alguns motores ocorre a 75% da potência nominal (FREITAS, 2013).

Figura 25 – Curva típica de rendimento do motor de indução



Fonte: Freitas (2013).

O motor de indução possui uma estreita faixa de velocidades com altas eficiências (comparativamente) em altas velocidades. Um ponto negativo é o fato da corrente de magnetização necessária e as perdas térmicas (ôhmicas) no rotor reduzirem a eficiência, que diminui na faixa nominal de velocidades em comparação com o motor de ímã permanente (SANTOS, 2015).

Resumidamente, as principais vantagens são:

- Robustez por baixo custo de aquisição e baixa manutenção (média no caso dos rotores bobinados);
- Disponibilidade no mercado, ampla gama de potências;
- Torque de partida não nulo.

E as principais desvantagens são:

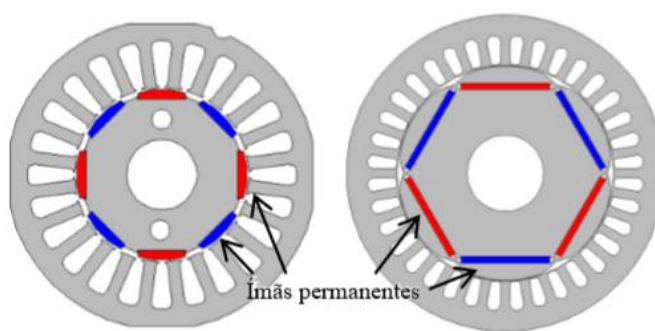
- Difícil controle de velocidades;
- Eficiência alta para uma faixa estreita de velocidades;
- Corrente de partida elevada;
- Fator de potência baixo e sempre indutivo.

### 2.3.2.2 Motor síncrono de ímã permanente

Em geral, os motores de ímãs permanentes podem ser empregados em qualquer aplicação que utilize motores de indução. O motor pode ser alimentado por corrente contínua ou alternada e são síncronos pelo fato de o rotor girar a mesma velocidade do campo magnético. Além disso, o motor de ímã permanente assegura uma eficiência muito maior por não apresentar quase nenhuma perda Joule no rotor.

Esses rotores possuem, em sua maioria, os ímãs fixados em sua superfície, podendo ainda serem instalados no seu interior, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Posição dos ímãs no rotor: na superfície (esquerda) e no interior (direita)



Fonte: Ribeiro e Prado (2016).

Seu funcionamento depende da excitação produzida pelo ímã e não pelos enrolamentos vistos nos motores de indução. Isso permite a construção de motores de ímãs permanentes menores e que entregam a mesma potência de motores de indução maiores. Essa característica ilustra uma vantagem em aplicações em que o espaço e a massa são fatores determinantes (SANTOS, 2015).

Existem 3 tipos de ímãs, dependendo da composição química:

- *Alnicos* (Al, Ni, Co e Fe);
- Cerâmicos (*ferrites* de bário e de estrôncio);
- Terras-raras (SmCo e NdFeB).

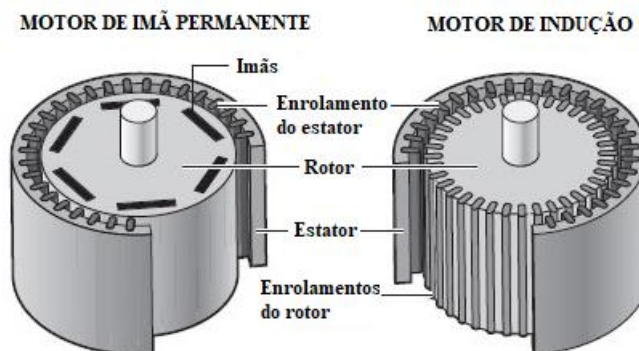
O aumento do uso de motores de ímãs permanentes deu-se a partir da utilização dos terras-raras. Esses ímãs permitem um alto rendimento para as máquinas elétricas, uma elevada relação conjugado/volume pelo fato de serem síncronos e uma diminuição do risco de desmagnetização. Um aspecto importante desse tipo de motor é que a capacidade de sobrecarga é dada pelas



características do próprio ímã. Além disso, é necessário um controle de temperatura do motor, uma vez que existe a possibilidade de desmagnetização irreversível em condições de alta temperatura e corrente no estator (SANTOS, 2015).

Entretanto, a utilização de ímãs também possui desvantagens. A principal seria o fato desses ímãs serem extraídos da natureza e serem limitados. Esse ponto traduz-se em um alto custo para obtenção dos mesmos, elevando o custo total da máquina (SILVA S. A.; LUCIANO, 1997).

Figura 27 – Diferença de montagem do motor de indução e de ímã permanente



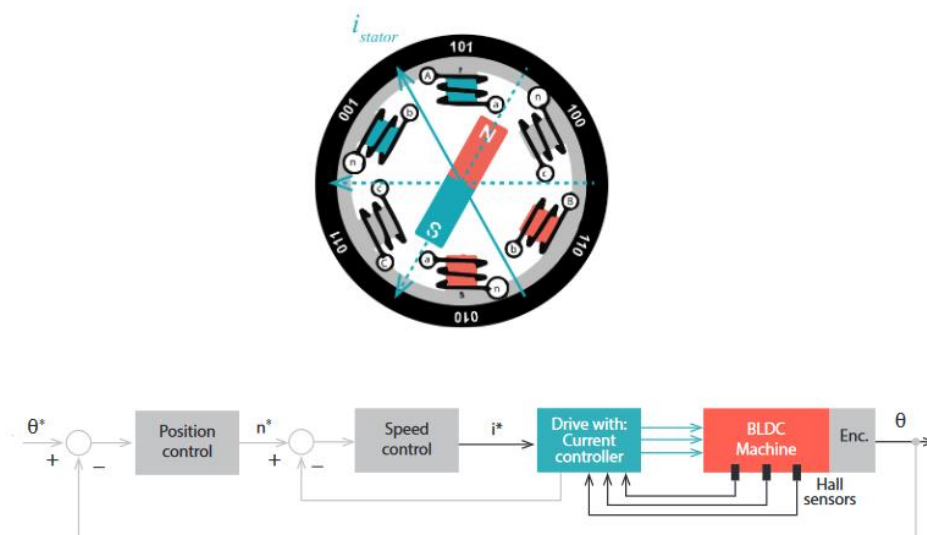
Fonte: Adaptado de New Energy and Fuel (2010).

Basicamente, esse é um bom resumo dos motores PMAC. Todavia, distingue-se rapidamente as duas subdivisões encontradas no mercado, BLDC e PMSM. Via de regra, eles possuem um *design* igual, porém são controlados de formas diferentes (VELEV, 2014).

No caso dos motores BLDC, o rotor é equipado com ímãs permanentes e a posição de campo do estator varia discretamente para gerar o torque. Em consequência da variação discreta, tem-se uma curva de corrente ótima retangular (motor é operado com correntes contínuas retangulares) e, pelos enrolamentos concentrados, a força eletromotriz é trapezoidal. Isso representa uma vantagem em velocidades altas e com operação contínua como compressores, bombas e sistemas de ventilação (DARAMMELAERE, 2016).

Entretanto, um *feedback* de posição é necessário para determinar a comutação ótima da corrente e isso, neste caso, é normalmente feito com um sensor de efeito Hall, que é simples e barato. Portanto, os requisitos para controle deste tipo de motor são fáceis e de baixo custo. Para um controle de posição e de velocidade em baixas rotações, um *feedback* de posição com mais acurácia é necessário (DARAMMELAERE, 2016).

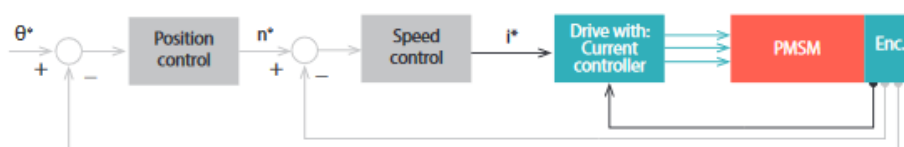
Figura 28 – Posição dos ímãs e sistema de controle dos motores BLDC



Fonte: Darammelaere (2016).

Quando alimentação é em corrente alternada e a posição dos ímãs no estator no BLDC é adaptada de forma com que a força eletromotriz se configure de forma senoidal, um motor PMSM é obtido. Dessa maneira, o torque é gerado de forma ótima e sem *ripple*<sup>4</sup> caso a curva da corrente siga o padrão senoidal da força eletromotriz inversa. A construção e os métodos de controle resultam em máquinas com excelente performance e eficiências que chegam a 97%. Por outro lado, esses fatores elevam os preços quando comparados aos BLDC (DARAMMELAERE, 2016).

Figura 29 – Sistema de controle dos motores PMSM.



Fonte: Darammelaere (2016).

Darammelaera (2016) faz diversas comparações quantitativas entre os motores de ímã permanente (BLDC e PMSM) e os motores DC com escovas, que podem ser vistas na Tabela 5.

<sup>4</sup> *Ripples* são componentes eletromagnéticos de torque oscilatório que podem surgir devido a iteração dos ímãs com outros componentes do sistema.

Ressalta-se que foram utilizados 70 motores para análise e os valores abaixo vão de 1 a 4, sendo 4 o melhor.

Tabela 5 – Comparação quantitativa entre os motores BLDC, PMSM e DC escovado

<b>Crítérios</b>	<b>BLDC</b>	<b>PMSM</b>	<b>DC com escovas</b>
<b>Velocidade nominal [rpm/W]</b>	4	2,5	2,5
<b>Torque nominal [<math>T_{nom}/mm^3</math>]</b>	2	3	1
<b>Densidade de potência [W/mm<sup>3</sup>]</b>	2	4	1
<b>Aceleração máxima [rad/s<sup>2</sup>/W]</b>	4	3	-
<b>Capacidade de sobrecarga [<math>T_{nom}/T_{máx}/W</math>]</b>	2,5	2,4	4
<b>Preço</b>	2	1	3

Fonte: Adaptado de Darammelaere (2016).

Em suma, as principais vantagens dos motores de imã permanente são:

- Maior eficiência quando comparado aos motores de indução;
- Baixo volume e peso;
- Disponível para altas potências.

As principais desvantagens são:

- Alto custo de aquisição;
- Diminuição da eficiência para altas velocidades.

### 2.3.3 Bateria

Energia elétrica, apesar de ser uma forma conveniente de distribuir e usar energia, não pode ser armazenada em grande escala. Por essa razão, quase toda energia produzida em usinas de energia elétrica é consumida instantaneamente. No entanto, diversas tecnologias de armazenamento de energia em pequena escala estão atualmente disponíveis para diversas finalidades, podendo armazenar energia na forma elétrica, mecânica, química ou magnética (PATEL, 2012). A Tabela 6 as compara em termos de duração de armazenamento e a densidade energética.

Tabela 6 – Características de formas de armazenamento de energia

<b>Tecnologia de Armazenamento</b>	<b>Forma de armazenamento de energia</b>	<b>Típica duração do armazenamento</b>	<b>Densidade Energética (kWh/kg)</b>
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).

As baterias armazenam energia na forma eletroquímica para uma variedade de aplicações industriais e em produtos de consumo. A conversão entre energia elétrica e química, e vice-versa, tem usualmente uma eficiência de cerca de 85%. Pode-se classificá-las em dois principais tipos:

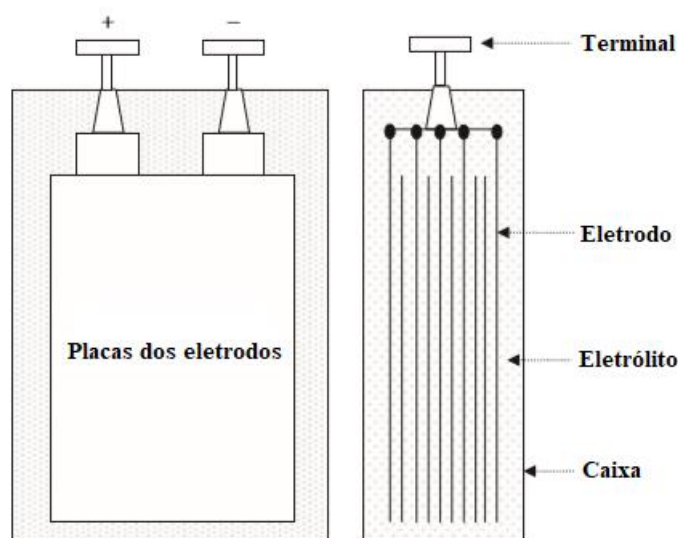
1. Baterias primárias: convertem energia química para energia elétrica, na qual o processo de reação eletroquímica é irreversível e a bateria após descarga total é descartada. Possuem alta densidade energética, tanto gravimétrica (Wh/kg) quanto volumétrica (Wh/litro). Por esse motivo, sua principal aplicação é quando se precisa de alta densidade de energia para um único uso (PATEL, 2012);
2. Baterias secundárias: são conhecidas como baterias recarregáveis e, portanto, o processo de reação eletroquímica é reversível. Após descarga, podem ser recarregadas com uma injeção de corrente contínua de fonte externa. Quando está carregando, transforma energia elétrica em energia química. Quando está descarregando, modo reverso, converte a energia química em energia elétrica. Em ambos os processos, cerca de 15% da energia é convertida em calor, o qual é dissipado para o meio. Portanto, a eficiência total de carregar e descarregar é de  $0,85 \times 0,85$ , ou seja, de 70 a 75%, dependendo da eletroquímica (PATEL, 2012).

As baterias secundárias, ou recarregáveis, são utilizadas em plantas industriais e navios para diversos fins como: fonte reserva de energia para casos de emergência, circuitos de controle, fornecimento da energia de partida para geradores primários. Para redes de energia elétrica,

baterias de porte maior são utilizadas no armazenamento de energia para parques eólicos e solares; melhorar confiabilidade da transmissão de energia elétrica; ou até em programas para reduzir emissões, promover o uso mais eficiente de energia e melhorar a qualidade do meio ambiente (PATEL, 2012).

A construção interna da típica célula de uma bateria eletroquímica (primária ou recarregável) consiste em placas de eletrodos positivos e negativos separados por um isolante e envoltos por um eletrólito químico. Os dois grupos de placas de eletrodo são conectados em duas saídas externas, ou terminais, montadas na caixa da bateria (PATEL, 2012). A Figura 30 ilustra esta configuração.

Figura 30 – Configuração típica de uma célula de bateria



Fonte: Adaptado de Patel (2012).

A célula armazena energia eletroquímica com baixo potencial elétrico, tipicamente entre 1,2 e 3,6 V, dependendo dos materiais usados na sua composição. A capacidade de retenção de energia da célula é denominada por C, a qual é medida em amperes-hora que a célula pode fornecer. Ela depende linearmente da área das placas dos eletrodos. Por outro lado, a tensão da célula, denominada por V, depende unicamente da eletroquímica (PATEL, 2012).

Uma bateria é formada por várias dessas células eletroquímicas conectadas em uma combinação série-paralela para obter a tensão e corrente desejadas para aplicação. Voltagens maiores exigem um número maior de células em série, enquanto correntes maiores exigem células

em paralelo. As células combinadas são classificadas em termos da tensão média durante a descarga e a capacidade de amperes-hora que pode ser fornecido antes que a tensão caia para um determinado limite. O produto desses parâmetros ( $Ah * V$ ) forma a capacidade energética da bateria em watt-hora (Wh), ou seja, o quanto de energia a bateria na condição cheia pode fornecer a cada hora (PATEL, 2012).

Diversas tecnologias de baterias recarregáveis foram desenvolvidas e já estão disponíveis para a indústria e para o consumidor final. Nesse sentido, novas eletroquímicas também estão em desenvolvimento para aplicações como veículos elétricos. Segundo Patel (2012), as principais composições utilizadas atualmente são:

- Chumbo-ácido (Pb-ácido);
- Níquel-cádmio (NiCd);
- Níquel-hidreto metálico (NiMH);
- Lítio-íon (Li-ion);
- Lítio-polímero (Li-poly);
- Baterias de sódio.

A tensão média durante a descarga depende da composição eletroquímica. Para cada um dos tipos descritos acima, é listado esse valor de tensão na Tabela 7, assim como a típica aplicação. Ressalta-se que o lítio metálico é altamente instável, especialmente durante o carregamento, diminuindo a segurança de operação e convergindo para o uso dos íons de lítio.

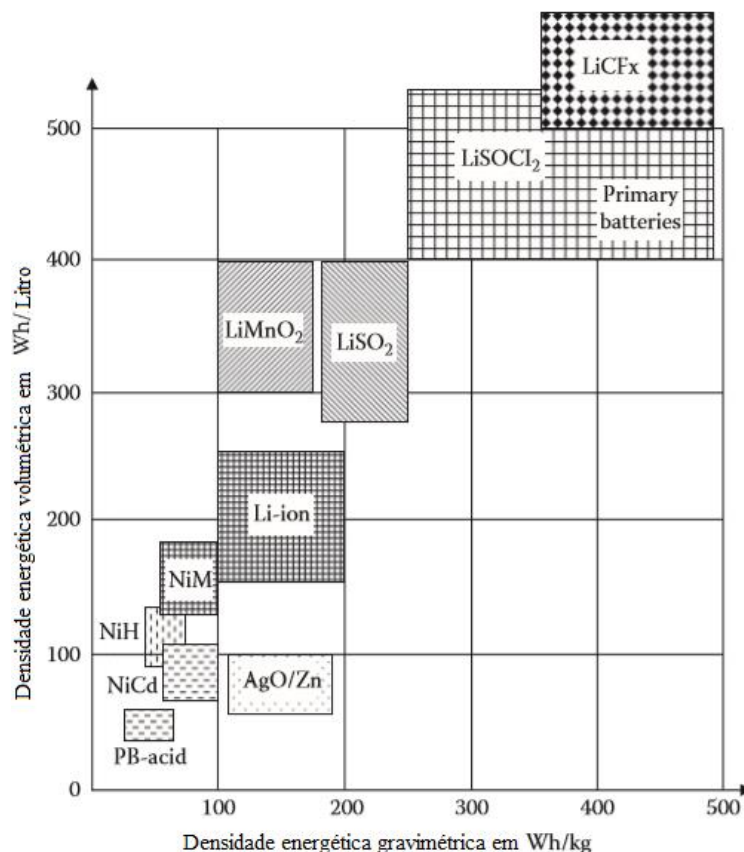
Tabela 7 – Tensão da célula e suas aplicações para eletroquímica

<b>Eletroquímica</b>	<b>Aplicação Típica</b>	<b>Voltagem da Célula</b>	<b>Observações</b>
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
Lítio-Polímero	Celulares, Naves Espaciais	3	Contém Lítio Metálico

Fonte: Adaptado de Patel (2012).

A densidade energética de cada uma das opções é comparada na Figura 31, onde a capacidade energética em Wh dividida pelo peso (kg) ou volume (litro) da eletroquímica pode ser observada.

Figura 31 – Densidade energética volumétrica e gravimétrica para cada eletroquímica



Fonte: Adaptado de Patel (2012).

Observa-se que as baterias de lítio possuem maior densidade de energia, salvo as baterias primárias, de forma acentuada quando comparada aos outros materiais. Elas são seguidas pelas baterias de níquel e as baterias de chumbo, bem abaixo no gráfico.

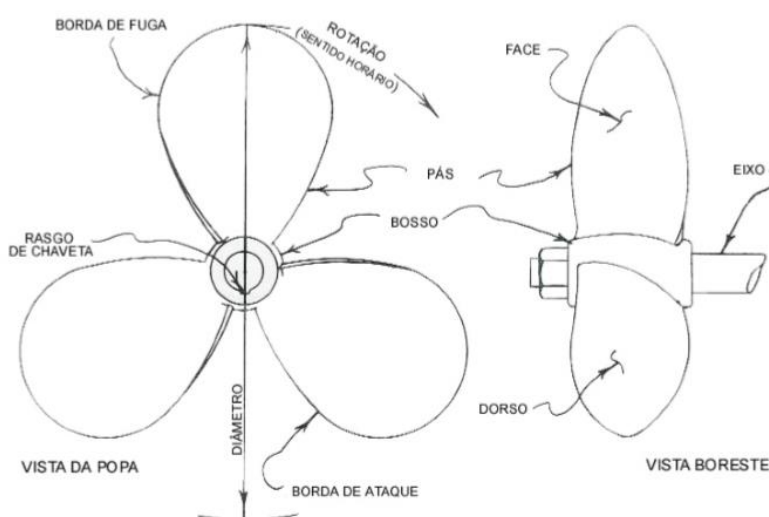
A seleção do tipo de eletroquímica depende de uma série de fatores como: custo, volume, peso, eficiência, segurança de serviço, aplicação, entre outros. Dessa forma, a maneira como a eletroquímica é selecionada e dimensionada será melhor discutida nos capítulos a seguir.

### 2.3.4 Propulsor

O principal tipo de propulsor utilizado na engenharia naval e no tipo de motor proposto é o hélice de passo fixo. Sua simplicidade, custo de aquisição e baixos custos de manutenção em relação aos outros tipos justificam essa escolha. Seu dimensionamento é dependente de uma série de fatores geométricos do próprio propulsor e os requisitos de projeto em questão.

Em suma, o hélice é constituído de um bossô no qual é fixado um certo número de pás e este conjunto, ao girar, gera o empuxo necessário para mover o navio. A pá pode ser entendida como um conjunto de fólhos torcidos partindo do bossô. A Figura 32 mostra a geometria de um hélice de 3 pás com a identificação de suas principais partes (MORISHITA, 2007).

Figura 32 – Características geométricas de um hélice de 3 pás



Fonte: Morishita (2007).

Onde,

**Bosso:** também chamado de cubo, é a base das pás do propulsor, normalmente um disco rígido, central e vazado para que o eixo possa ser encaixado;

**Rasgo de chaveta:** É um prisma esbelto colocado ao longo do eixo do propulsor, o qual transmite o torque do eixo para o propulsor;

**Borda de ataque:** bordas onde a pá do hélice “corta” a água;



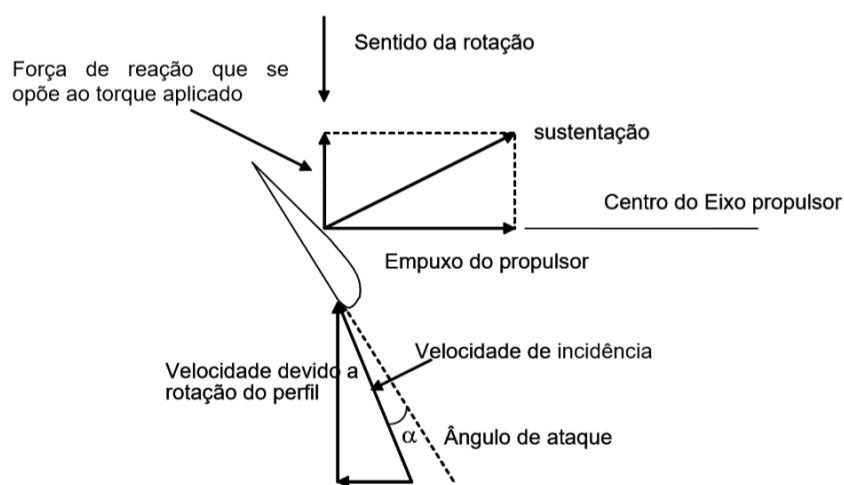
**Borda de fuga:** bordas por onde a água deixa a pá;

**Face da pá:** superfície vista de popa a proa e é ela que “empurra” a água quando a embarcação avança para frente, sendo uma zona de alta pressão;

**Dorso:** face vista de proa para popa e é a face de baixa pressão.

A abordagem mais simples de compreender o funcionamento do hélice é considerar que uma seção de uma pá é um fólio sujeito ao escoamento de fluido incidindo com um determinado ângulo de ataque, conforme é mostrado na Figura 33. Com isto, tem-se uma força de sustentação, que é perpendicular à direção do escoamento. A força de sustentação pode ser decomposta no sentido do eixo longitudinal e isto dá o empuxo do hélice. A outra parcela, perpendicular ao empuxo é responsável pelo torque. Integrando-se estas forças ao longo da área de cada pá e multiplicando pelo número de pás obtém-se o empuxo e o torque do hélice (MORISHITA, 2007).

Figura 33 – Conceitos de funcionamento do hélice



Fonte: Morishita (2007).

Exatamente como as partes de um propulsor, suas dimensões influenciam na eficiência propulsiva encontrada no final de um projeto (LOPES, 2003). Segue abaixo uma breve lista dos principais parâmetros geométricos dos hélices.

**a) Diâmetro (D):** é o diâmetro do círculo que envolve o hélice. É a definição geométrica mais importante do propulsor e deve-se tentar projetar o hélice com o maior diâmetro possível, respeitando os limites da popa, para tentar obter a maior eficiência possível.

**b) Passo (P):** o passo do hélice é o deslocamento linear do propulsor após uma revolução em torno do seu eixo.

**c) Número de pás (Z):** A maioria dos hélices possuem entre 2 a 7 pás. Este número depende, dentre os fatores, do empuxo requerido, do diâmetro permissível e do nível de vibração.

**d) Área do disco do hélice ( $A_0$ ):** é a área do círculo cujo diâmetro é o do hélice.

**e) Área expandida ( $A_E$ ):** é a soma da área expandida de cada pá do hélice.

Revisadas as principais características do hélice, procura-se estimar seu desempenho de maneira prática, com intuito de visualizar sua interação com a água. Estes ensaios são normalmente feitos em laboratórios, onde o hélice é deslocado a uma velocidade  $V_a$  no fluido em repouso, sem a presença do casco. Eles são, por isso, chamados de ensaios de água aberta.

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, Figura 34 (TRINDADE, 2012). O empuxo (T) e o Torque (Q) determinados por um hélice propulsor depende das seguintes variáveis:

- $V_a$  = velocidade de avanço;
- $n$  = velocidade de rotação;
- $\rho$  = massa específica do fluido;
- $\vartheta$  = viscosidade cinemática do fluido.

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

- $J = \frac{V_a}{nD}$  = coeficiente de avanço;
- $Re = \frac{nD^2}{\vartheta}$  = número de Reynolds.

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

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} = \text{coeficiente de força propulsiva} \quad (11)$$

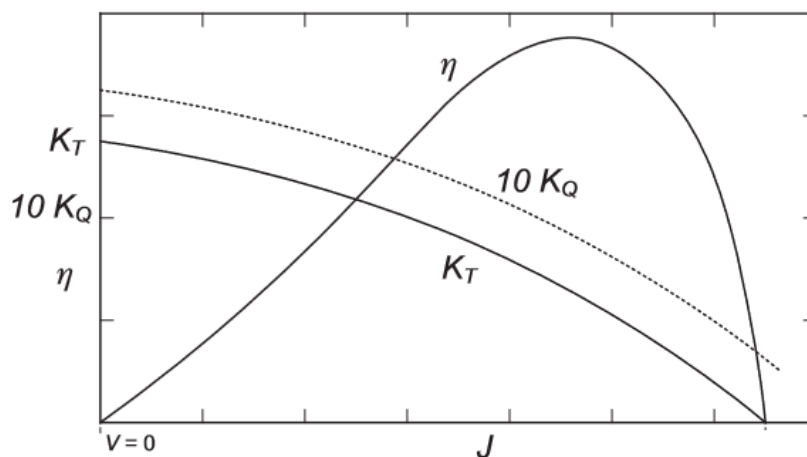
$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} = \text{coeficiente de torque} \quad (12)$$

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:

$$\eta_0 = \frac{P_E}{P_D} = \frac{V_a T}{2\pi n Q} = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (13)$$

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 34 – Diagrama de águas livres de um propulsor



Fonte: Molland (2011).

Tendo isso em vista, para auxiliar no projeto do hélice e prever o seu desempenho, são utilizados diagramas de “séries sistemáticas” que são obtidas através de ensaios para determinadas famílias de propulsores que têm semelhança geométrica. Exemplos dessas séries sistemáticas são: B-Troost, Kaplan, Gawn, entre outras (MORISHITA, 2007).

Cada uma das séries possui uma aplicação recomendada, de acordo com a geometria e os próprios testes realizados. A Kaplan é utilizada para embarcações com tubulão que requerem alto torque, como rebocadores. Já a série B, por exemplo, é implementada para navios deslocantes.

No entanto, no caso de motores com alta rotação para o uso em barcos planantes, pouco se tem na literatura. O uso de hélices comerciais de motores de popa não é recomendado pois não

seriam específicos e otimizados para a aplicação em questão. Um exemplo disso é o fato de os motores possuírem a saída de exaustão no bosso, o que não se aplica ao motor elétrico e reduz drasticamente o diâmetro da pá (e conseqüentemente a eficiência).

Nesse caso, propõe-se o uso da metodologia de Wan (2014), na qual hélice foi projetado para aplicação semelhante. Nela, o projeto de um propulsor para motor de popa elétrico foi desenvolvido utilizando a teoria da linha sustentadora moderadamente carregada (*moderately-loaded lifting line theory*). Sua implementação é feita na ferramenta OpenProp, que é um código aberto na linguagem do Matlab® disponibilizado por Epps (2016).

O programa OpenProp é normalmente utilizado no *design* de hélices e turbinas em estágios conceituais e preliminares de projeto, que é o caso do presente trabalho. Revisa-se, portanto, a teoria na qual o programa é baseado.

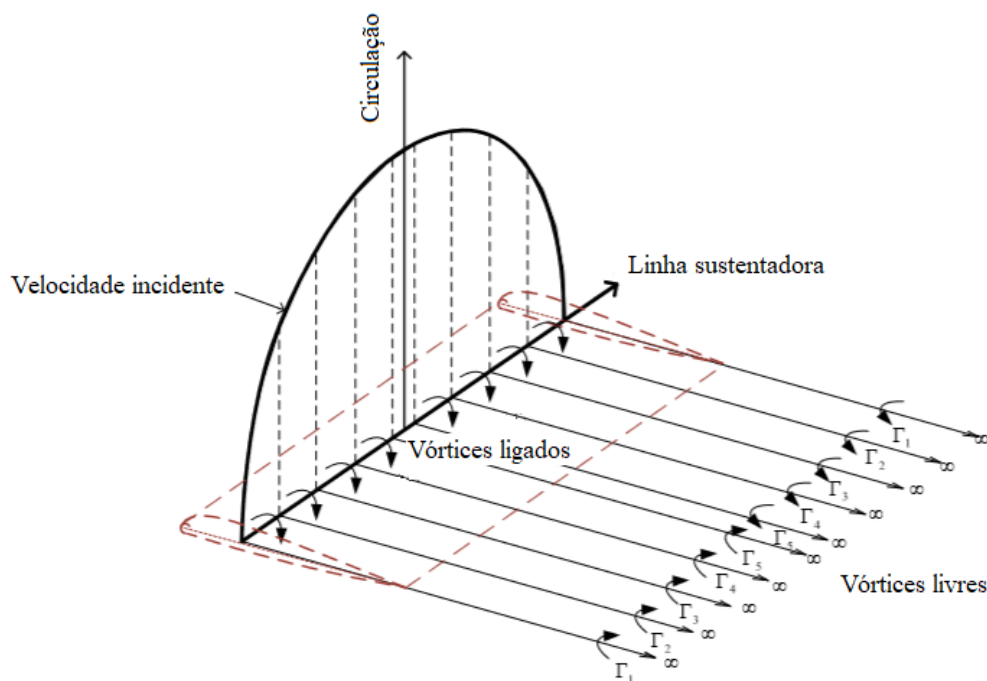
#### 2.3.4.1 Teoria da linha sustentadora moderadamente carregada

Esta seção tem como objetivo apresentar brevemente a Teoria da Linha Sustentadora aprimorada com uso do método *vortex lattice* para cálculo computacional das velocidades induzidas.

O hélice, pelo método, é representado como uma linha sustentadora, com os vórtices livres alinhados com o fluxo de velocidade local (isto é, a soma vetorial do fluxo livre com a velocidade induzida). As velocidades induzidas são computadas utilizando *vortex lattice* de forma a associar um filamento de vórtice (vórtice ligado) à circulação ( $\Gamma$ ) do hélice para posições discretas ao longo da pá. A circulação está diretamente relacionada com a força de sustentação e arrasto (EPPS, 2016).

A Figura 35 ilustra a ideia da teoria na forma linear, uma vez que os vórtices livres se caracterizam por manter seu padrão linear de fluxo.

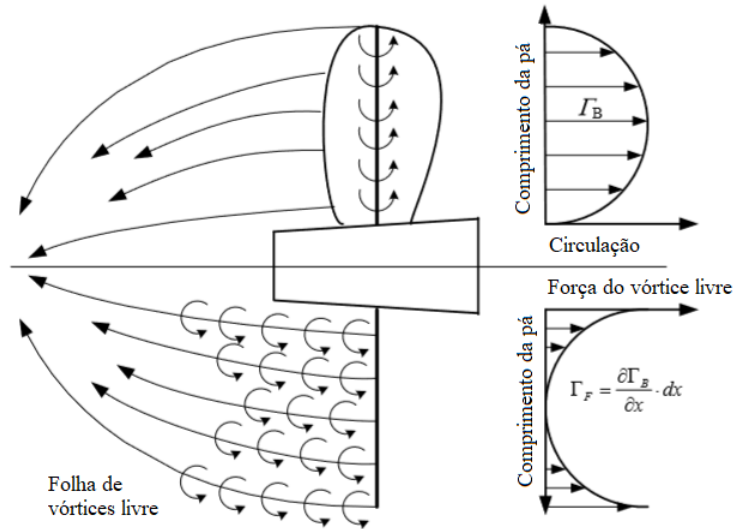
Figura 35 - Teoria da Sustentação de Prandtl linearizada



Fonte: Adaptado de Wan (2014).

Assim, a geometria é modelada discretamente, tendo seções 2D com suas respectivas propriedades para cada raio. As forças resultantes são obtidas integrando as propriedades das seções ao longo de todo diâmetro. O procedimento para otimização do hélice é feito de forma a determinar a distribuição de circulação ótima nesse espaço, a qual, por consequência, resulta na melhor eficiência do propulsor, dadas as condições de entrada da velocidade e as características geométricas do hélice (EPPS, 2016).

Figura 36 – Hélice em vista lateral de acordo com a teoria



Fonte: Adaptado de Wan (2014).

Sabendo da dependência das forças de sustentação e de arrasto (viscosas) com as posições no comprimento da pá ( $r$ ) do hélice e assumindo geometrias idênticas para cada pá, pode-se calcular o empuxo total e o torque da seguinte maneira:

$$\mathbf{T} = Z \int_{r_h}^R [F_i \cos(\beta_i) - F_v \sin(\beta_i)] dr (\mathbf{e}_a) \quad (14)$$

$$\mathbf{Q} = Z \int_{r_h}^R [F_i \cos(\beta_i) - F_v \sin(\beta_i)] r dr (-\mathbf{e}_a) \quad (15)$$

Onde,

$Z$  = número de pás;

$F_i$  = magnitude da força de sustentação;

$F_v$  = magnitude da força de arrasto viscosa;

$\beta_i$  = ângulo da resultante da velocidade de entrada;

$V^*$  = resultante da velocidade de entrada;

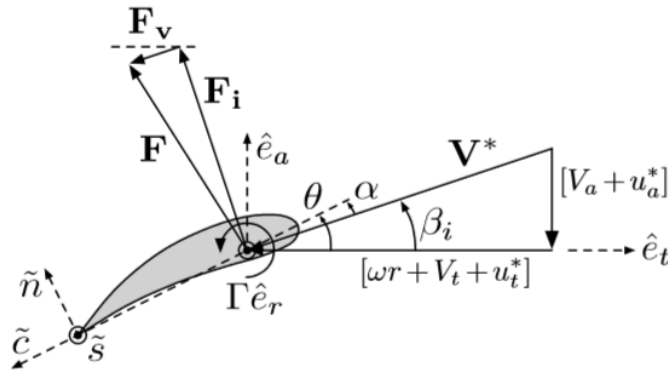
$\mathbf{e}_a$  = direção axial;

$r_h$  = raio do bossô do hélice;

$R$  = raio do hélice.

A Figura 37 apresenta as velocidades do propulsor e o diagrama de forças como vistos da ponta da raiz da pá nas direções tangencial e axial. As velocidades são relativas a seção estacionária da pá no raio “r”. As velocidades induzidas são representadas por  $u^*$  e o eixo gira com velocidade  $-wr\mathbf{e}_t$ .

Figura 37 – Diagrama de forças e velocidades do sistema



Fonte: Ebbs (2016).

Assim, as forças de sustentação e de arrasto podem ser calculadas:

$$F_i = \rho V^* \Gamma \quad (16)$$

$$F_v = 0.5 \rho (V^*)^2 C_D c \quad (17)$$

Onde,

$C_D$  = coeficiente de arrasto;

$c$  = corda da seção;

O coeficiente de arrasto pode ser obtido de acordo com o perfil hidrodinâmico da seção e número de Reynolds calculado com base no comprimento da corda. No código, ele é um dado de entrada. A circulação é obtida através do coeficiente de sustentação 2D:

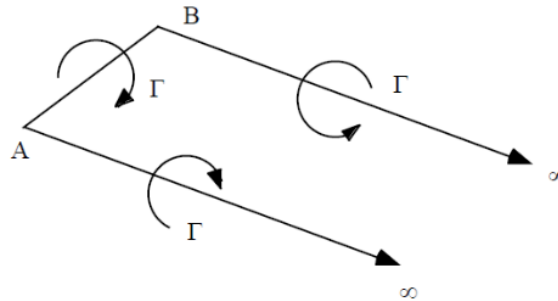
$$C_L = \frac{2\Gamma}{(V^*)c} \quad (18)$$

Ressalta-se aqui que, durante a rotina de otimização da circulação, a corda é escolhida de forma a restringir o coeficiente de sustentação para um valor máximo permitido  $C_{Lmax}$ , evitando separação da camada limite e, conseqüentemente, a cavitação na ponta do hélice. A velocidade resultante de entrada pode ser obtida resolvendo o triângulo de velocidades:

$$V^* = \sqrt{(V_a + u_a^*)^2 + (\omega r + V_r + u_t^*)^2} \quad (19)$$

As últimas incógnitas são as velocidades induzidas, as quais são calculadas via formulação do método *vortex lattice*. O hélice é seccionado em  $M$  painéis e as velocidades são computadas nos pontos radiais da linha de sustentação, somando as velocidades induzidas pelo pela singularidade do vórtice de ferradura (Figura 38):

Figura 38 – Associação do vórtice ligado e os vórtices livre



Fonte: Ribeiro (2009).

Devido a esse fenômeno, é possível obter a velocidade induzida em qualquer ponto e, assim, também sua soma nas direções axial e tangencial:

$$u_a^*(m) = \sum_{i=1}^M \ddot{u}_a^*(m, i) \Gamma(i) \quad (20)$$

$$u_t^*(m) = \sum_{i=1}^M \ddot{u}_t^*(m, i) \Gamma(i) \quad (21)$$

A implementação das velocidades induzidas no código é dada da seguinte forma:

$$\ddot{u}_a^*(m, i) = \sum_{i=1}^M \ddot{u}_a(m, i) - \ddot{u}_a(m, i + 1) \quad (22)$$

$$\ddot{u}_t^*(m, i) = \sum_{i=1}^M \ddot{u}_t(m, i) - \ddot{u}_t(m, i + 1) \quad (23)$$

Onde  $\ddot{u}_a^*(m, i)$  e  $\ddot{u}_t^*(m, i)$  são as velocidades axial e tangencial induzidas em ponto “r” por uma unidade de força do filamento de vórtice na pá com a direção do vetor da circulação aproximando a linha sustentadora por regra da mão direita (WRENCH, 1957).

Finalmente, o cálculo da eficiência total é dado por:

$$\eta = \frac{TV_\infty}{Q\omega} \quad (24)$$

Onde,



$V_{\infty}$  = velocidade do fluxo livre = velocidade de serviço;

$TV_{\infty}$  = potência efetiva gerada pelo propulsor;

$Q\omega$  = máxima potência que pode ser gerada pelo giro do eixo.

### 3 METODOLOGIA

Apresentada a fundamentação teórica para os processos e métodos utilizados no projeto do sistema propulsivo elétrico da embarcação 160F, será desenvolvida, neste capítulo, a metodologia para realizá-lo da maneira mais eficiente possível.

Por ser um produto ainda pouco disponível no mercado, foi feita a TRL (*Technology Readiness Levels* ou Níveis de Prontidão Tecnológica) para barcos elétricos de pequeno porte. É mais fácil, assim, delimitar os objetivos e limites deste trabalho, bem como planejar os passos a serem realizados futuramente.

Desenvolvido pela Agência Espacial Americana, estes níveis servem para medir a maturidade de uma determinada tecnologia. Cada projeto é avaliado em relação aos próprios parâmetros e recebe um nível específico de “prontidão tecnológica” com base no progresso dos trabalhos realizados. Normalmente são 9 níveis que constituem a TRL, sendo o último a comercialização do produto e os 3 primeiros relacionados ao projeto conceitual, principal âmbito da monografia.

Tabela 8 – Níveis de Prontidão Tecnológica do projeto

NÍVEL DE MATURIDADE							
TRL	DESCRIÇÃO	ATIVIDADE	OBJETO (FOCO)	INTEGRAÇÃO	ESCALA	AMBIENTE	BARCO ELÉTRICO
1	Princípios básicos observados	Levantamento bibliográfico	Comportamento, características e propriedades essenciais	NA	NA	NA	Estudo de mercado
2	Formulação de conceitos tecnológicos e de aplicação	Levantamento bibliográfico e simulações	Princípios físicos da aplicação	NA	NA	Desktop	Análise e validação da resistência ao avanço
3	Estabelecimento de função crítica de forma analítica e prova de conceito	Verificação das premissas do TRL 2	Funções críticas dos componentes individuais	Componentes individuais	NA	Desktop	Motor elétrico, banco de baterias e hélice propulsivo

4	Validação funcional dos componentes em ambiente de laboratório	Validação; Levantamento; Simulação.	Funcionalidades básicas da tecnologia; requisitos para aplicação final	Componentes integrados parcialmente	Laboratorial	Laboratorial	Integração eletrônica; desenvolvimento do modelo em escala
5	Validação das funções críticas dos componentes em ambientes relevantes	Validação	NA	Componentes integrados	Planta piloto ou similar	Relevante	Testes do modelo
6	Demonstração de funções críticas do protótipo em ambiente relevante	Simulação; Demonstração	Desempenho da tecnologia e viabilidade de fabricação	Protótipo	Planta demonstrativa ou similar	Operacional	Produção do protótipo piloto em escala demonstrativa e simulação
7	Demonstração de protótipo do sistema em ambiente operacional	Demonstração	Atingimento dos requisitos operacionais e especificações	Protótipo completamente integrado	Real	Operacional (condições de estresse)	Produção do protótipo piloto em escala real e avaliação do seu desempenho
8	Sistema qualificado e finalizado	Qualificação	NA	Produto ou processo final	NA	NA	Qualificação do produto final pelo órgão responsável
9	Sistema operando em todos aspectos de sua missão operacional	Comercialização	NA	Produto ou processo final	NA	Real	Comercialização

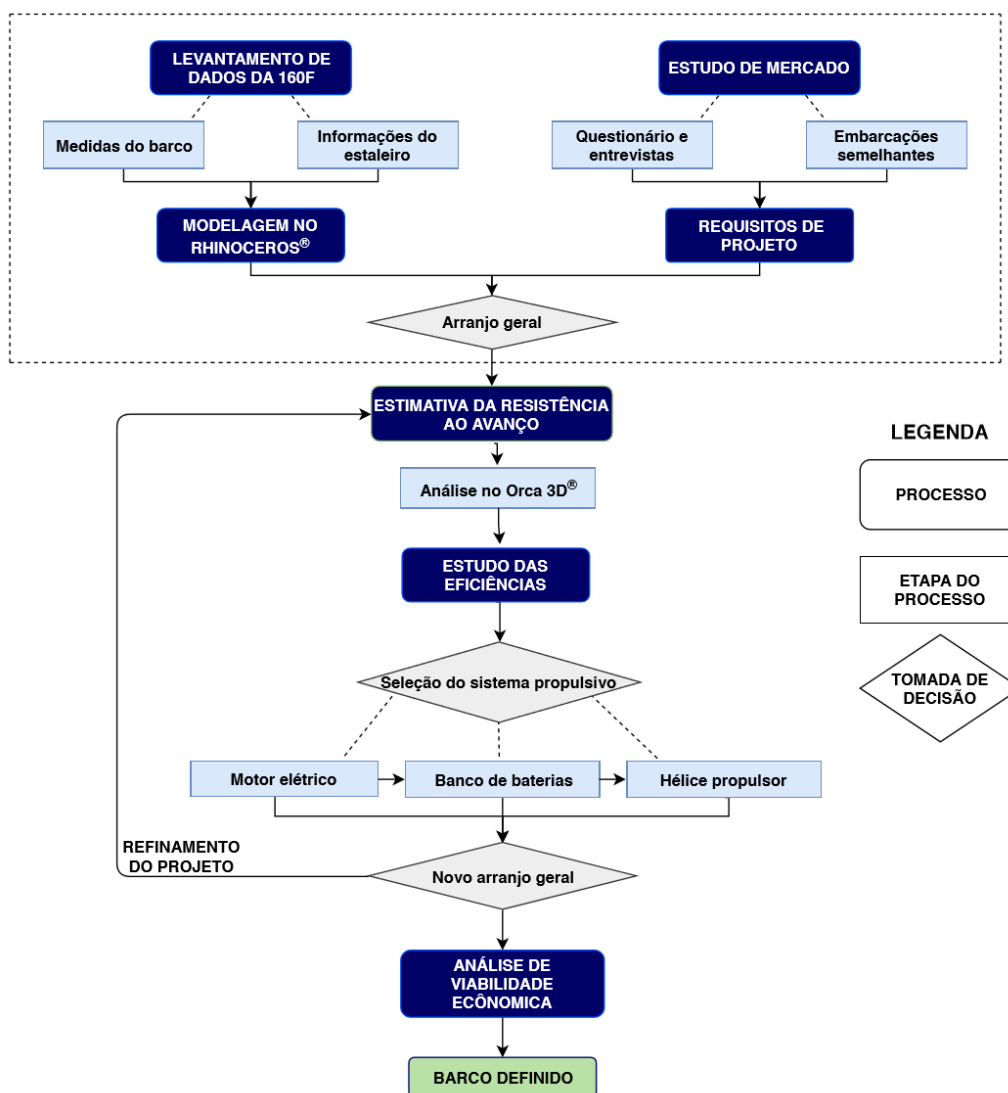
Fonte: Autor (2018).

Tendo isso em vista, um plano de projeto é montado com intuito de finalizar os 3 primeiros níveis de prontidão tecnológica para barcos elétricos de pequeno porte, utilizando a embarcação 160F como estudo de caso. E, a partir do quarto nível, onde o escopo passa a ser laboratorial, fica como sugestão para trabalhos futuros para interessados no ramo.

Propõe-se aqui um estudo semelhante ao apresentado por Martins (2017), onde, em seu trabalho, a conversão para o elétrico do sistema propulsivo de um veleiro à combustão foi realizada. Sua proposta envolveu uma sequência de projeto que se mostrou eficiente e proporcionou uma vasta revisão da literatura que, inclusive, já foi apresentada na fundamentação teórica. Aproveita-se, agora, como horizonte, para uso na metodologia do projeto conceitual da

presente monografia. Nesse contexto, o fluxograma, com o plano de projeto para o sistema propulsivo elétrico, é mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Fluxograma do projeto



Fonte: Autor (2018).

O primeiro passo do plano de projeto será tomar nota das principais dimensões do barco, assim como de algumas informações importantes que o estaleiro disponibilizou, como o peso de cada componente. Através desses dados, será possível fazer uma modelagem mais precisa do casco utilizando o programa Rhinoceros 5®. Em paralelo, será realizado um estudo de mercado através de entrevistas com os usuários deste tipo de barco e, também, um estudo de embarcações

semelhantes. Desta maneira, é possível avaliar os problemas enfrentados, planejar as respectivas soluções e traçar os requisitos de projeto de forma mais objetiva.

Com estas informações em mão, será desenhado o arranjo geral da embarcação, detalhada a planilha de pesos e centros e analisada a resistência ao avanço pelo método Savitsky, tanto por planilha em Excel quanto utilizando o programa Orca 3D®. Com o valor da resistência ao avanço e um estudo sobre as eficiências típicas deste tipo de sistema, os primeiros componentes do sistema propulsivo elétrico poderão ser selecionados.

Seguindo a lógica da espiral de projeto, define-se novamente um arranjo geral para o barco e refina-se o projeto, realizando uma nova análise de resistência ao avanço, agora com os novos valores encontrados. Posteriormente, uma análise de viabilidade econômica é feita para analisar a possibilidade do preço do sistema estar muito distante do que o mercado atual está disposto a pagar.

## **4 ESTUDO DE CASO**

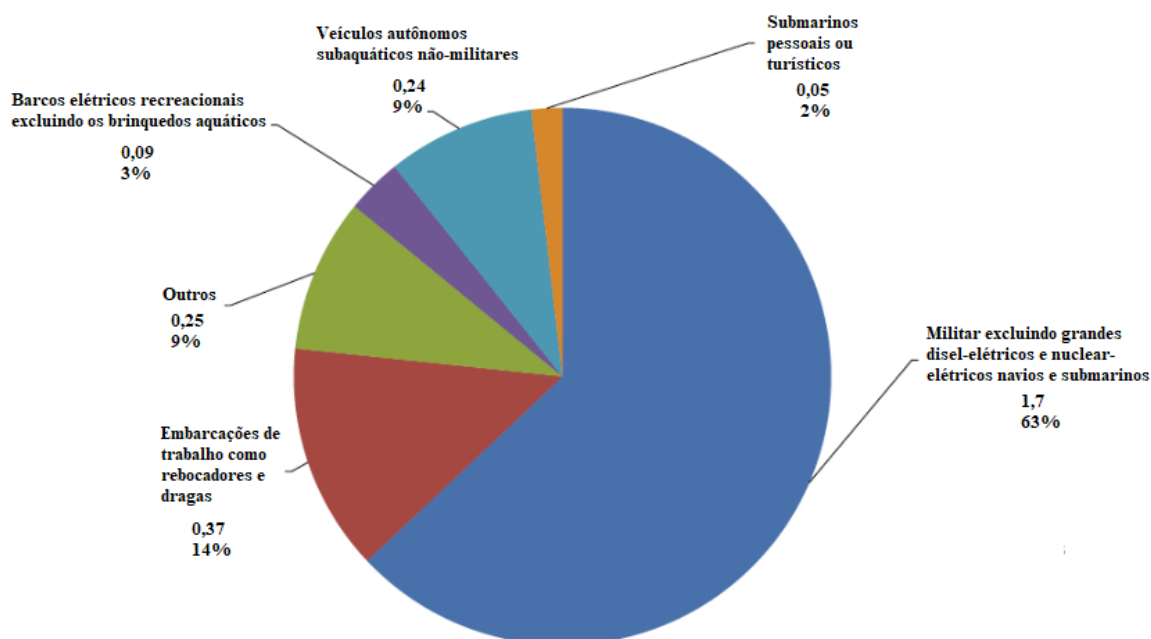
Neste capítulo, as etapas descritas na metodologia serão computadas, analisadas e apresentadas obedecendo os requisitos de projeto e a lógica iterativa proposta. Os primeiros passos realizados, feitos em paralelo, foram o estudo de mercado para obtenção dos principais requisitos e um levantamento de dados da embarcação 160F.

### **4.1 ESTUDO DE MERCADO**

Nesta etapa, analise-se o mercado para pequenas embarcações de pesca e recreio movidas a energia elétrica e faz-se uma coleta de dados sobre embarcações semelhantes. Os motores semelhantes e suas características já foram apresentados na Tabela 4 da seção 2.3.2.2.

Em primeiro plano, o cenário atual é contextualizado. Existem cerca de 100 fabricantes de veículos aquáticos elétricos e motores para essa aplicação em um mercado com uma forte tendência de crescimento. Segundo pesquisa realizada pelo IDTechEx (2017), o mercado de barcos elétricos e híbridos crescerá para valores de movimentação maiores de US\$20 bilhões até 2027, desconsiderando as aplicações militares. A ressalva da pesquisa é importante, pois grande parte desse desenvolvimento pode ser atribuído ao viés militar e bélico. A Figura 40 expõe a parcela de cada aplicação do setor náutico elétrico do ano de 2014 em porcentagem e bilhões de dólares.

Figura 40 – Parcelas de setores de veículos náuticos elétricos em 2014



Fonte: IDTechEx (2014).

A pesquisa ainda ressalta que a aplicação com crescimento mais íngreme é o uso de barcos elétricos recreacionais, seguido pelos veículos autônomos subaquáticos. Mais especificamente os barcos elétricos comerciais voltados para navegação interior, uma vez que diversas políticas de governo contra combustíveis fósseis amparam a estatística. Regiões chaves para essa mudança, como Alemanha e Índia, baniram o uso de motores de combustão interna em diversos rios e lagos, ou até o caso do lago Sun Moon no Taiwan, onde os operadores locais concordaram unanimemente em um uso energético mais limpo e quieto como o elétrico (IDTechEx, 2017).

O período de transição para troca completa da matriz energética tem sido curto, principalmente em países europeus. Um exemplo disso é a Holanda, onde a troca total deve ser efetuada até 2025 para todas embarcações utilizadas nos canais da cidade. Por outro lado, a Áustria já banuiu o uso de motores à combustão em todos os lagos do país. O levantamento feito por Burch e Gilchrist (2018), mostrado na Tabela 9, traz importantes cidades que respeitam a tendência de mudança, mostrando o anúncio da lei e sua respectiva entrada em rigor, escopo e aplicação.

Tabela 9 – Anúncio e entrada em rigor de leis para mudança de matriz energética

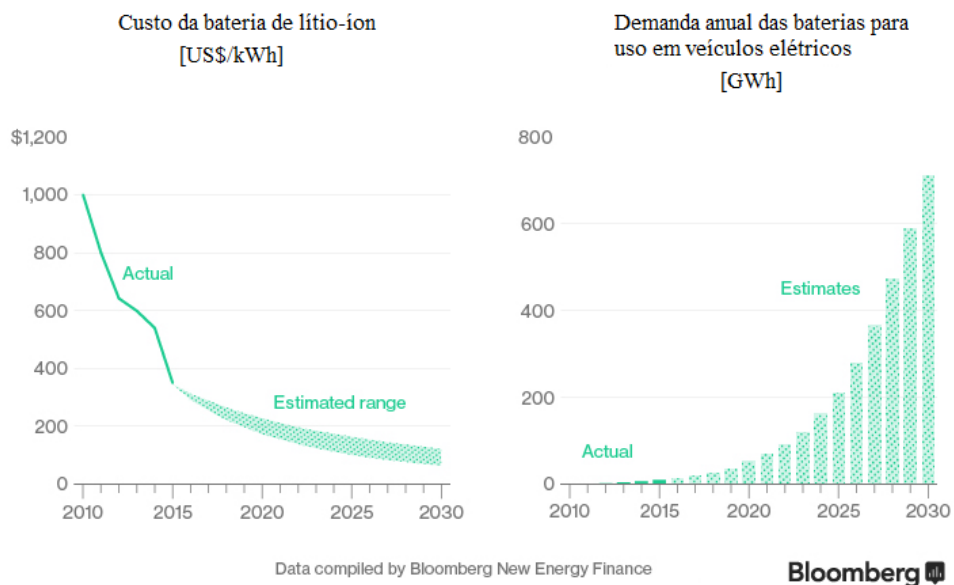
<b>Cidade</b>	<b>Anúncio</b>	<b>Entrada em rigor</b>	<b>Escopo</b>	<b>Aplicação</b>
Atenas	2016	2025	Diesel	Todos os veículos
Auckland	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Barcelona	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Bruxelas	2018	2025	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos
Cape Town	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Copenhagen	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Délhi	2014	Em andamento	Diesel	Todos os veículos
Hamburgo	2018	2018	Diesel	Todos os veículos
Heidelberg	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Londres	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Los Angeles	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Madrid	2016	2025	Diesel	Todos os veículos
Milão	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Cidade do México	2016	2025	Diesel	Todos os veículos
Oslo	2016	2019	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos
Oxford	2017	2020	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos
Paris	2016	2025	Diesel	Todos os veículos
Quito	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Roma	2018	2024	Diesel	Todos os veículos
Seattle	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025
Tóquio	2000	2003	Diesel	Todos os veículos
Vancouver	2017	2030	Gasolina ou Diesel	Todos os veículos e ônibus até 2025

Fonte: Burch e Gilchrist (2018).

Como direta consequência das novas leis, a demanda pelos itens que compõe o sistema propulsivo elétrico de embarcações tende a aumentar e o seu preço diminuir. Isso torna mais atraente diversos produtos que anteriormente eram inviáveis para as aplicações elétricas, como barcos de pequeno porte com motores elétricos de popa ou placas fotovoltaicas.

No caso dos motores de popa, onde os componentes com maior valor são o conjunto de baterias e o motor elétrico, tem-se uma alta redução de custo ao longo do tempo. Para ilustrar a ideia, o preço das baterias lítio-íon, principal eletroquímica utilizada para veículos elétricos, e a demanda do mercado até 2030 podem ser observadas nos gráficos da Figura 41, disponibilizados pela Bloomberg New Energy Finance (2016).

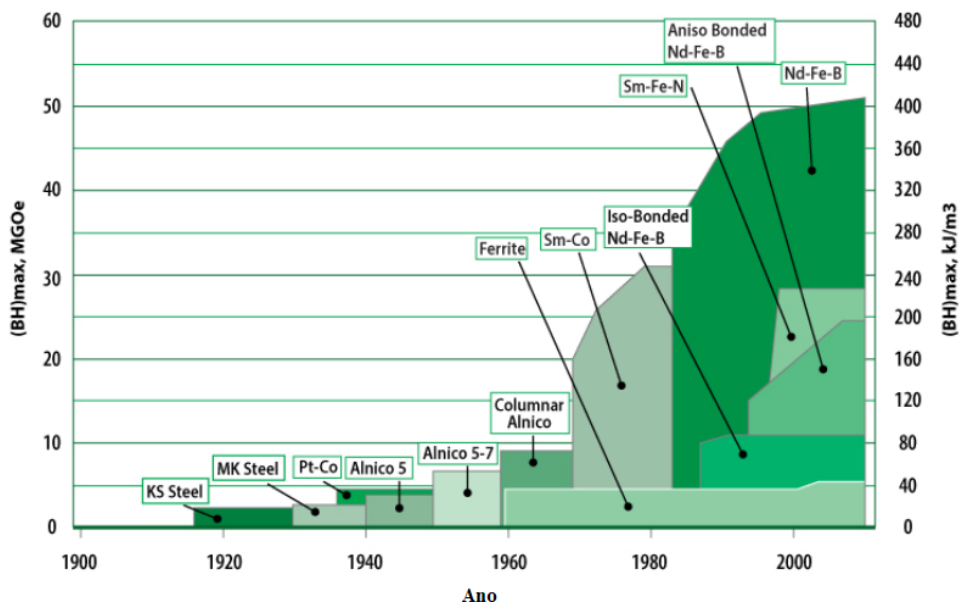
Figura 41 – Custo e demanda do mercado para baterias de lítio-íon



Fonte: Bloomberg New Energy Finance (2016).

Além disso, a alta demanda também influencia diretamente no escopo de estudo de instituições de ensino. Os ímãs permanentes, amplamente utilizados nos motores elétricos, são cada vez mais estudados e ainda têm muito a se desenvolver. Com a maior parte do enfoque da indústria voltado para os motores PMAC, como mencionado anteriormente na seção 2.3.2.2, tanto os custos dos motores quanto o peso devem diminuir. A Figura 42 registra a intensidade do campo magnético produzido pelo ímã permanente pelo seu volume desde sua descoberta e início de utilização, onde observa-se uma melhora significativa na qualidade dos motores.

Figura 42 – Intensidade do campo magnético pelo volume do imã ao longo dos anos



Fonte: Ormerod (2018).

Com os avanços tecnológicos e a diminuição dos custos, diversos sistemas se mostram mais viáveis do ponto de vista comercial. IDTechEx (2017) resume as novidades que os veículos elétricos no meio náutico podem trazer frente às mudanças de mercado:

- Melhor autonomia;
- Barcos para uso fluvial: estudo da fauna e flora sem perturbação de ruídos;
- Mais aceleração para os barcos de *wakeboard*;
- Uso militar sem “assinaturas” térmicas e acústicas para evitar atenção;
- Independência energética com uso de energia solar, ondulatória, dos ventos, etc.;
- Redução drástica de preços de aquisição e manutenção de embarcações recreacionais de pequeno porte;
- Menor poluição.

Do ponto de vista dos motores de popa elétricos, Tveitdal (2017) traz as principais vantagens e motivos que impulsionam a troca pelos motores à combustão:

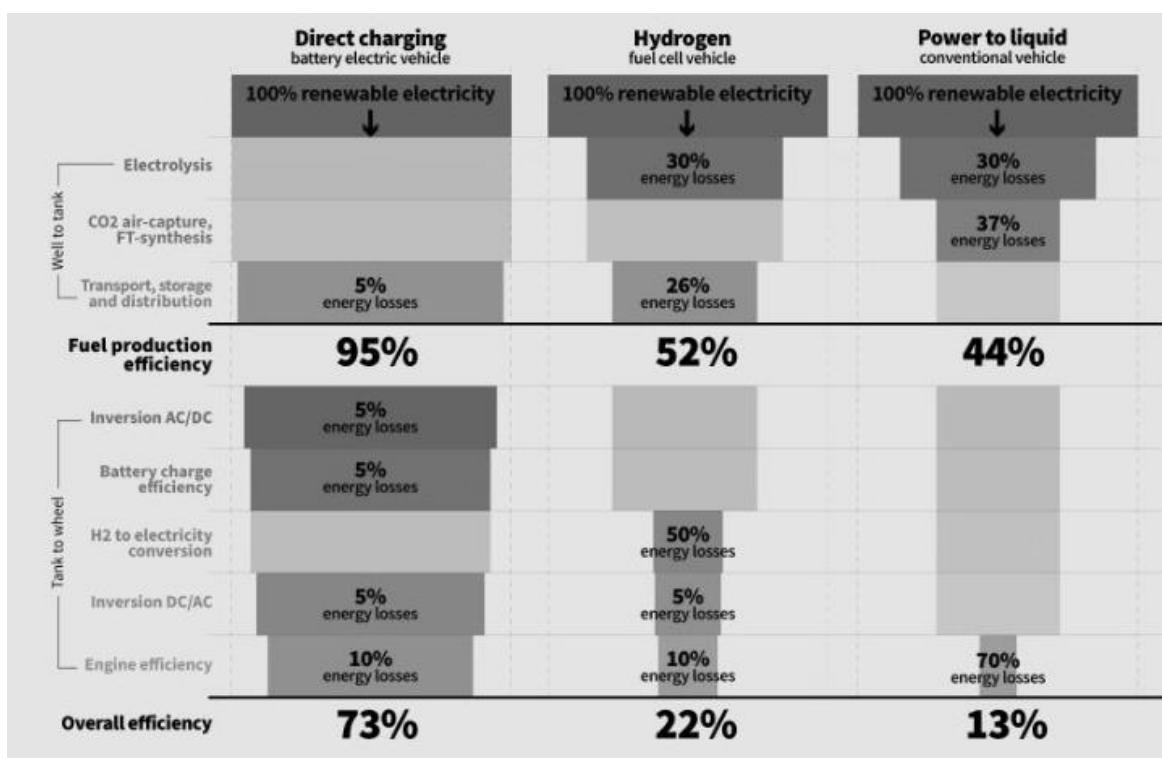
- Evita barulho e ruídos durante a navegação;



- Menos manutenções, uma vez que o motor não usa óleo, filtros e possui muito menos componentes;
- Menos peso pelo mesmo motivo de possuir menos componentes;
- Não utiliza combustível fóssil, trazendo economia a longo termo;
- Evita contaminação local, seja na forma de fumaça ou combustível;
- Armazenamento de baterias tem um risco de incêndio associado menor que armazenamento de gasolina ou diesel;
- Maiores eficiências energéticas.

Entre as principais vantagens apontadas, a mais notável é a diferença das eficiências energéticas entre os motores elétricos e os motores à combustão interna. A eficiência dos motores de combustão interna de pequeno porte varia em uma faixa de 15 a 22%, ao passo que, para os motores elétricos, há uma variação entre 85 e 95% (ParisTech, 2016). A Figura 43 ilustra a diferença entre a eficiência de carros elétricos, movidos à hidrogênio e à gasolina.

Figura 43 – Diferença de eficiência entre carros elétricos, à hidrogênio e à combustão



Fonte: Transport & Environment (2017).

Percebe-se que, no total, os elétricos saem na frente com uma eficiência de 73%, para 22% dos carros movidos à hidrogênio e apenas 13% dos motores à combustão, os quais têm suas maiores perdas no próprio motor (70%).

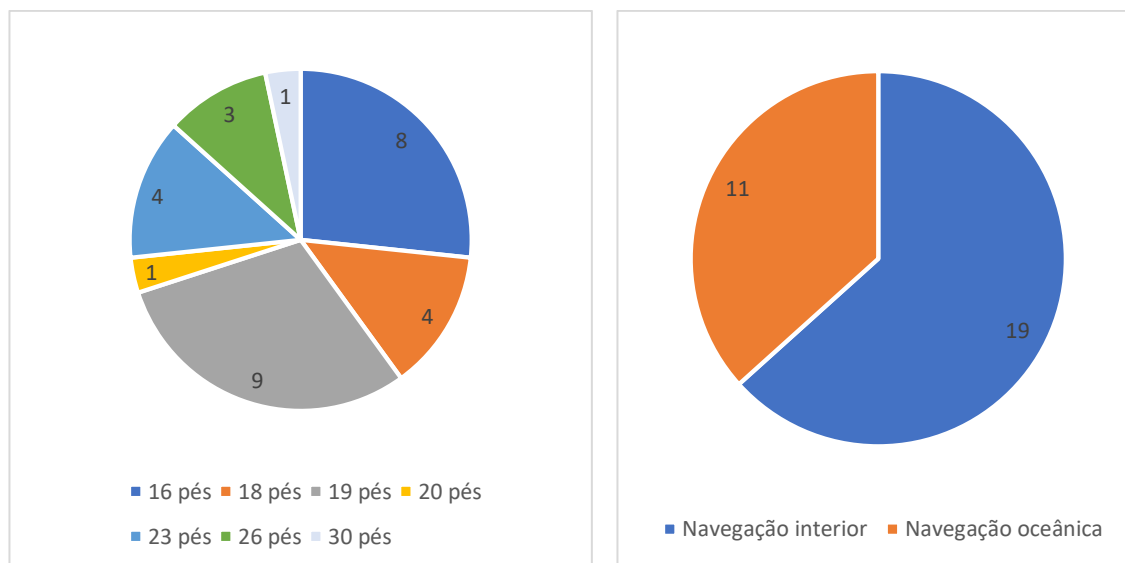
No entanto, apesar das vantagens apresentadas, há fatores que ainda podem não permitir ou atrasar a transição para os motores elétricos no meio náutico recreacional. Para Tveitdal (2017), além dos atuais altos custos de aquisição, barreiras de aceitação do próprio consumidor podem interferir no processo de adoção da nova tecnologia. O fato de nunca terem usado o produto e o medo da mudança interferem na decisão entre os dois tipos de motores.

Com intuito de entender melhor o mercado da região de Santa Catarina para uma plausível futura adoção dos barcos de recreio elétricos, propõe-se o uso de questionários e entrevistas com pescadores e interessados da região. O estudo tem viés qualitativo e informativo, uma vez que não foram realizados cálculos amostrais pela dificuldade em traçar o público-alvo para a tecnologia e por não contemplar diretamente o escopo da presente monografia.

Em primeiro plano, um formulário *online* foi escrito contendo perguntas abertas e fechadas. As perguntas abertas tinham como objetivo identificar: o tipo de embarcação; região em que costuma navegar; motor utilizado; tempo de pescaria; tempo de pescaria com motor ligado; velocidade que costuma navegar; e qual seria a velocidade mínima que navegaria. Já as fechadas, tinham a finalidade de quantificar a importância da velocidade e os problemas relacionados com os motores de popa à combustão: o quanto o barulho; a fumaça; e os gastos com manutenção e combustível incomodam.

No total, 30 pescadores amadores responderam o formulário. Sendo a grande maioria proprietários de barcos entre 16 e 19 pés (22 dos 30) e que costumam navegar em águas abrigadas, como na Lagoa da Conceição, Florianópolis e na Baía da Babitonga. São Francisco do Sul. Ressalva-se que as respostas abertas foram compiladas em planilha no Excel® pela falta de um padrão de resposta exigido.

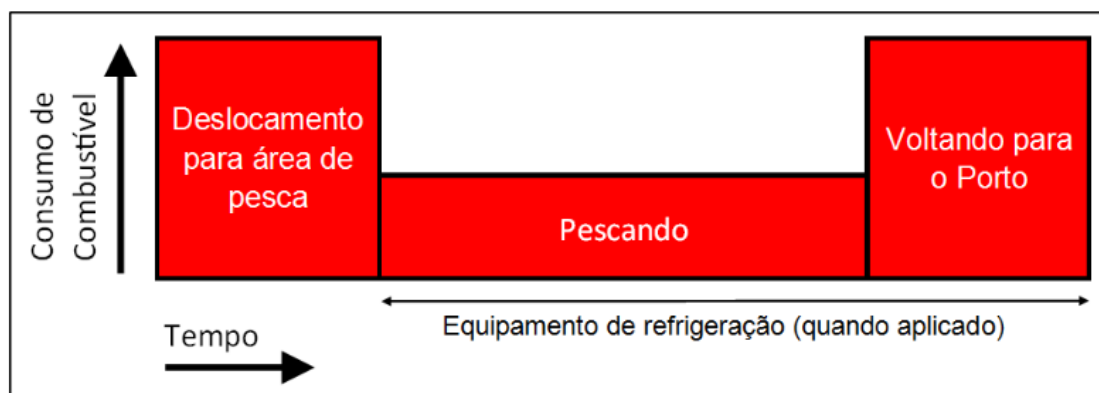
Figura 44 – Tamanho do barco e tipo de navegação do público



Fonte: Autor (2018).

Para entender melhor o uso do motor durante a pescaria, já que em navegação para pesca ele é teoricamente é menos requisitado, foi perguntado a duração média da pesca e qual parcela desse tempo o motor é acionado. A Figura 45 ilustra o consumo de combustível para pesca comercial pela forma de navegação, situação análoga ao da pesca esportiva.

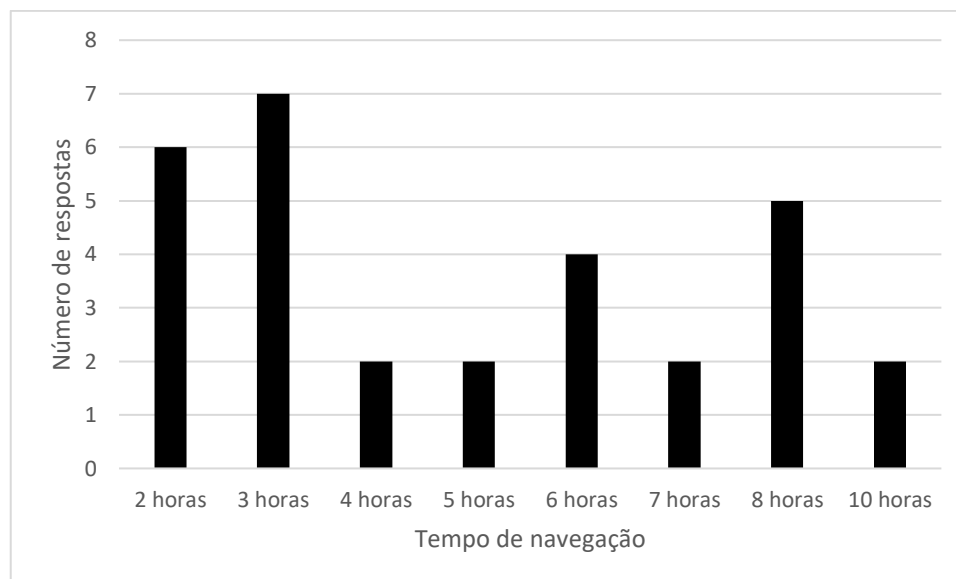
Figura 45 – Consumo de combustível durante a pesca pelo tempo da navegação



Fonte: Guesse (2016).

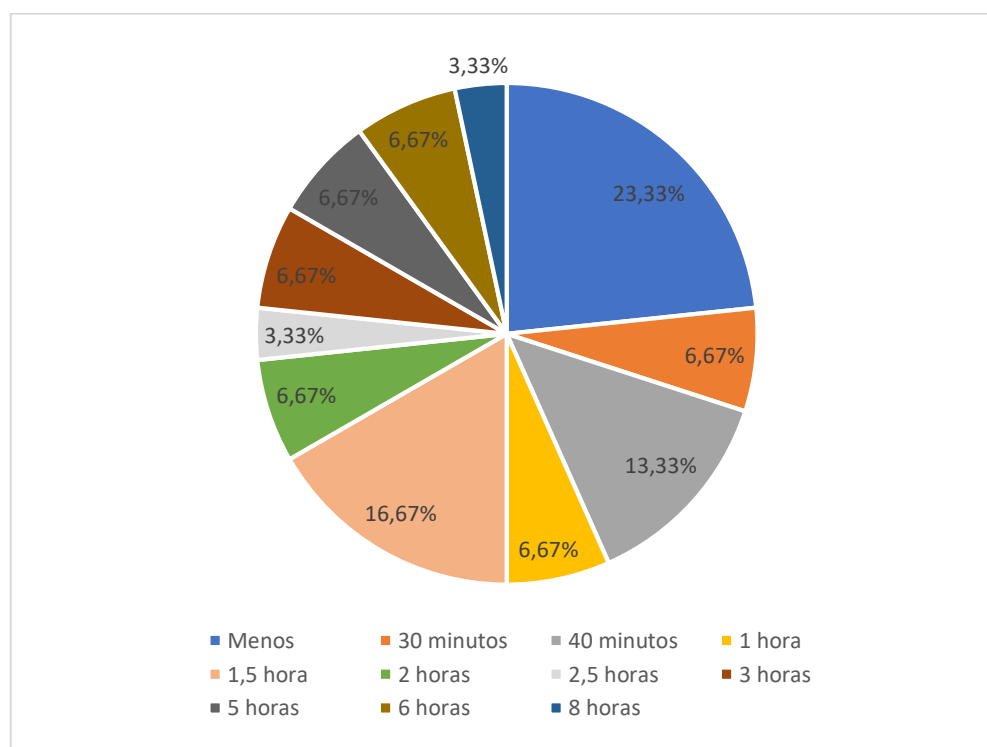
O tempo da pesca varia bastante com a modalidade praticada, a Figura 46 mostra essa alta variação, com soberania de durações menores que 3 horas. O tempo que o motor fica ligado durante a pesca pode ser observado na Figura 47.

Figura 46 – Tempo de duração das pescarias em águas abrigadas e oceânicas



Fonte: Autor (2018).

Figura 47 – Tempo médio que o motor é acionado durante a pesca esportiva

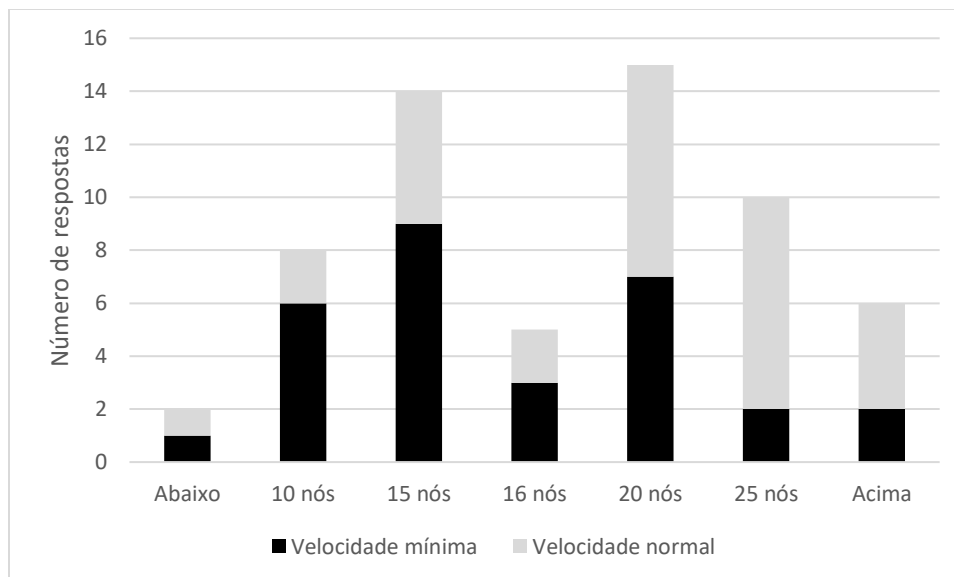


Fonte: Autor (2018).

Percebe-se que as maiores porcentagens entre os 30 pescadores são: menos de 30 minutos e 1,5 hora de navegação. Entre os que responderam menos de 30 minutos, muitos ressaltaram o uso do motor elétrico portátil durante a pesca (4 dos 7). Outro dado interessante é que exatos dois terços dos pescadores ficam com o motor ligado menos de 1 hora e meia, característico das pescas esportivas em águas abrigadas. A pesca oceânica, por outro lado, eleva os valores para até 8 horas, uma vez que as distâncias para chegar nos cardumes são muito maiores e, conseqüentemente, os barcos e motores também.

No quesito velocidade de navegação, o efeito é parecido. Foi perguntado qual velocidade navega e a qual velocidade navegaria para realizar o mesmo trajeto. A Figura 48 ilustra o cenário.

Figura 48 – Velocidades mínima e de serviço observadas no formulário



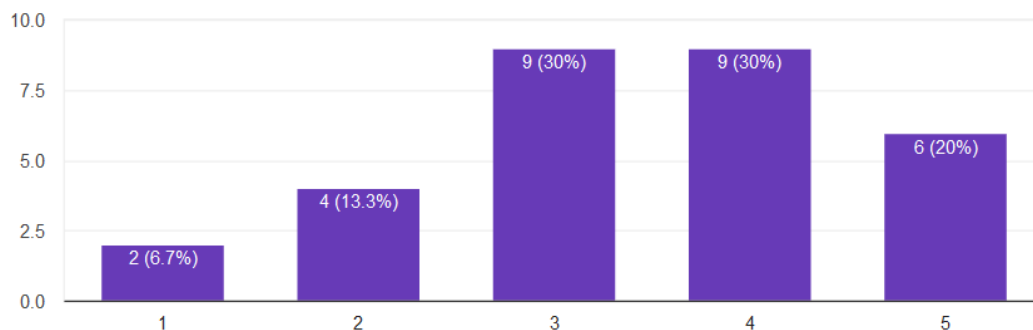
Fonte: Autor (2018).

O maior número de pescadores navega normalmente a uma velocidade de 20 e 25 nós (16 dos 30 igualmente distribuídas entre as respostas) e, a princípio, navegar a 15 nós não seria um problema. Nesse sentido, pergunta-se em forma fechada de resposta o quão importante é a velocidade para a pesca. Os resultados são vistos na Figura 49.

Figura 49 – Importância da velocidade para pesca

Na sua opinião, quão importante é a velocidade?

30 responses



Fonte: Autor (2018).

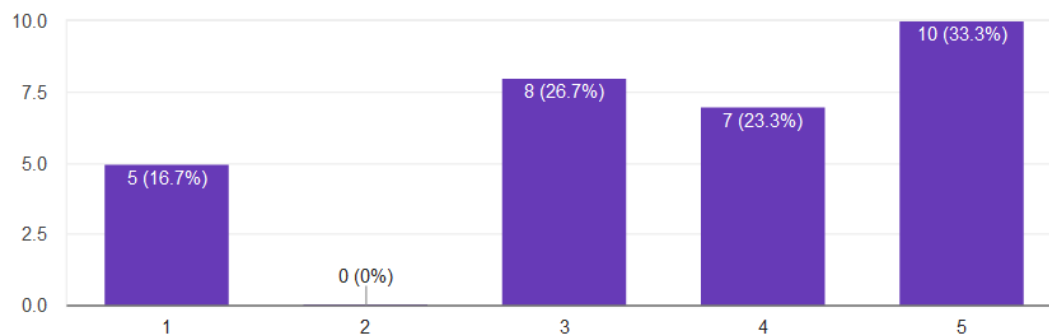
Nota-se uma boa distribuição nas respostas. Todavia, a velocidade de navegação é relativamente importante. Isso está atribuído ao fato de ela estar diretamente associada ao tempo de navegação. Onde o tempo de deslocamento ao destino final é mais curto, certamente a velocidade tem menos impacto para o tripulante, por isso os altos valores de indiferença (representados por 3) e uma tendência a se importarem (representados por 4).

As outras perguntas fechadas avaliaram o quanto o pescador se incomoda com os principais pontos onde o motor elétrico contribui positivamente. Em ordem: fumaça, barulho, gasto com manutenção e gasto com combustível. Elas foram concentradas em duas imagens (Figura 50 e Figura 51) e todas as respostas envolvem uma faixa entre 1 e 5, com 5 sendo “bastante incômodo” e 1 “nenhum incômodo”.

Figura 50 – O barulho e a fumaça dos motores de popa à combustão avaliados

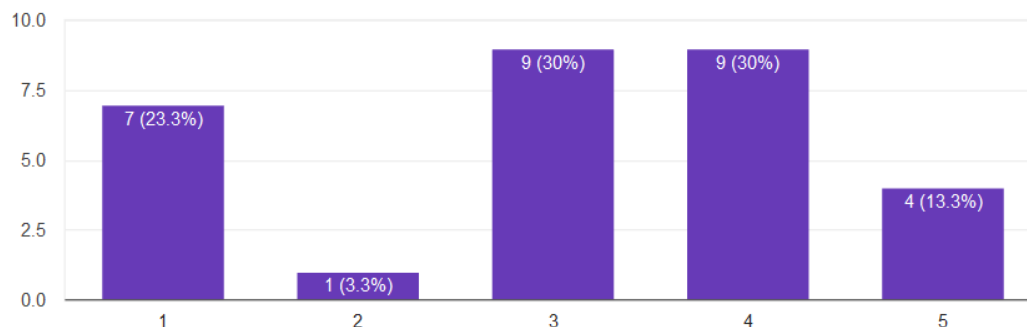
### O barulho do seu motor é um problema para você ou para pescaria?

30 responses



### A fumaça do seu motor é um problema para você ou para pescaria?

30 responses



Fonte: Autor (2018).

Para o problema do barulho, a resposta “bastante incômodo” teve um terço dos votos. O barulho é certamente um problema maior para pescas em navegação interior, onde o silêncio e a ausência de ruídos são de extrema importância para o esporte e para o conforto dos passageiros. De qualquer forma, apenas 5 das 30 respostas foram negativas, indicando que não é um problema. As outras seguiram a linha de incômodo com esse problema ou indiferença (26,7%).

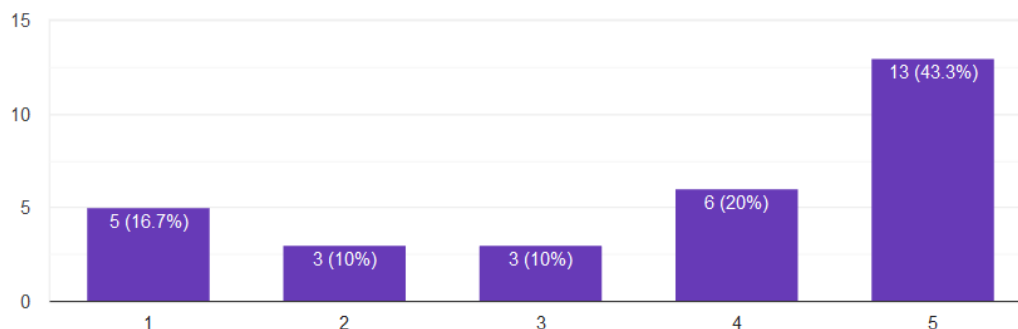
Por outro lado, as respostas para os problemas com fumaça da exaustão do motor tiveram um caráter de indiferença e algum incômodo, gerando um gráfico mais distribuído. Isso pode ser explicado pelo fato de os gases de exaustão dos motores à combustão acompanharem o sentido da esteira, ficando para trás durante a navegação. Também, para velocidades de pesca em barcos com

motores de popa menores, a geração de fumaça não é algo que limite a prática esportiva como o barulho.

Figura 51 – Problemas com gastos de manutenção e combustível na pesca esportiva

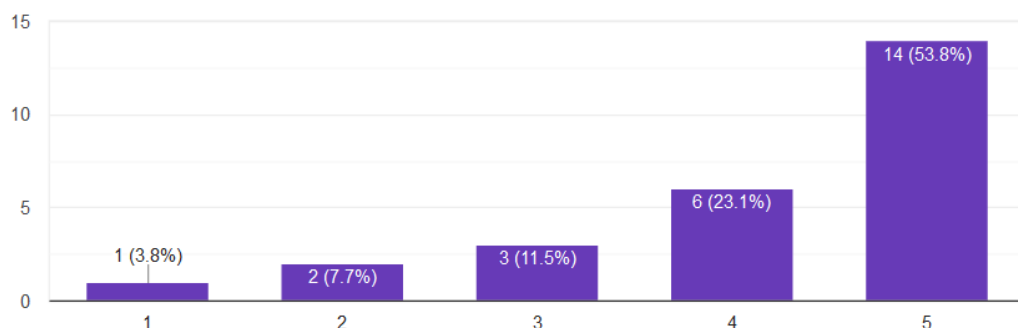
#### O gasto com a manutenção do seu motor é um problema para você?

30 responses



#### O gasto com combustível é um problema para você?

26 responses



Fonte: Autor (2018).

As respostas de gastos com manutenção e combustível para pesca foram unânimes e crescentes: há muito incômodo com esses tipos de despesas. Como visto na seção 2.3, os motores à combustão são compostos por uma infinidade de peças, o que impacta na manutenção desse tipo de equipamento. A despesa para mantê-los depende do proprietário, manutenções preventivas evitam danos a longo prazo, porém também há um custo intrínseco para esse tipo de cuidado. É possível observar uma insatisfação com as despesas, visto que 43,4% das respostas reportaram “bastante incômodo”.



Ela é ainda mais acentuada para os gastos com combustível, que são fixos para toda pescaria e sempre acompanham a saída para navegação. Como essa pergunta foi adicionada depois, ela possui 26 respostas, enfatizando ainda mais as 14 respostas negativas (53,8%). Vale lembrar que o motor elétrico não necessariamente sanaria o problema dos gastos com combustível, uma vez que também há uma despesa com energia elétrica. Todavia, para Tveitdal (2017), onde conduziu pesquisa parecida na Noruega, é notado uma falta de planejamento a longo prazo para a decisão de aquisição do motor.

Em outro plano, para aumentar o grau de validade das respostas, foram conduzidas 15 entrevistas com pescadores da região de Florianópolis.

Entrevistas são fundamentais quando se precisa ou deseja mapear práticas, crenças, valores e sistemas classificatórios de universos sociais específicos, mais ou menos bem delimitados, em que os conflitos e contradições não estejam claramente explicitados. Nesse caso, se forem bem realizadas, elas permitirão ao pesquisador fazer uma espécie de mergulho em profundidade, coletando indícios dos modos como cada um daqueles sujeitos percebe e significa sua realidade e levantando informações consistentes que lhe permitam descrever e compreender a lógica que preside as relações que se estabelecem no interior daquele grupo, o que, em geral, é mais difícil obter com outros instrumentos de coleta de dados (DUARTE, 2004).

No presente trabalho, propõe-se uma entrevista semiestruturada. Para Triviños (1987) a entrevista semiestruturada tem como característica questionamentos básicos que são apoiados em teorias e hipóteses que se relacionam ao tema da pesquisa. Dessa forma, as hipóteses formuladas a partir das perguntas são respondidas ao longo da entrevista. Neste caso, as hipóteses levantadas podem ser vistas na Figura 52.

Figura 52 – Hipóteses levantadas para as entrevistas, exemplos de resposta

**Hipóteses a serem validadas:**

- Velocidade é muito importante para pesca ( ) Verdade (X) Mentira ( ) Não deu para concluir;
- Incomoda-se com o gasto com combustível ( ) Verdade (X) Mentira ( ) Não deu para concluir;
- Atual motor exige muita manutenção ( ) Verdade (X) Mentira ( ) Não deu para concluir;
- Atual motor atrapalha a pesca (X) Verdade ( ) Mentira ( ) Não deu para concluir;
- Confia em motores elétricos (X) Verdade ( ) Mentira ( ) Não deu para concluir;
- Substituiria o motor elétrico se viável (X) Verdade ( ) Mentira ( ) Não deu para concluir.

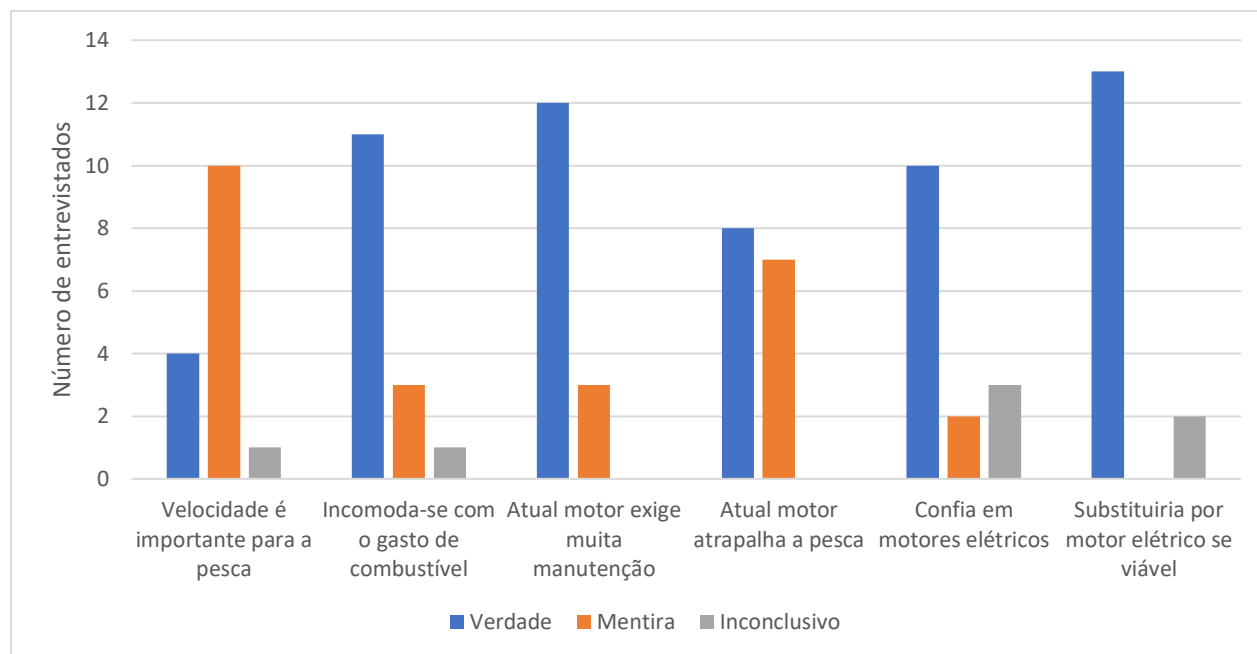
Fonte: Autor (2018).

As seguintes perguntas foram realizadas, com intuito de validar as premissas:

1. Desde quando pesca? Para onde costuma navegar? Com quantas pessoas? Normalmente, por quanto tempo?
2. Como é a rotina para ir pescar? Onde costuma atracar? A qual velocidade costuma navegar? Velocidade é uma questão importante?
3. Qual modalidade de pesca é usualmente feita? Quais equipamentos de pesca são levados? Qual a quantidade e que tipo de peixe pesca?
4. Qual o atual motor do barco? Quanto gasta mensalmente com a manutenção dele? Já teve problema com o motor?
5. Quanto gasta com combustível? Quantos litros são usados em cada saída com o barco? Como se sente com os custos no geral? Costuma controlar isso?
6. Barulho do motor atrapalha a pesca? Que outros problemas atrapalham? Até que ponto estaria disposto a solucionar cada um desses problemas?
7. O que vem em mente quando o assunto é motores elétricos? Algum tipo de problema associado? Já teve um?
8. Uma limitação no tempo de navegação seria um problema? Confiaria em um motor elétrico em substituição ao a gasolina? Caso ambos sejam oferecidos no mercado com o mesmo preço, optaria por qual?
9. Teria interesse em um serviço que fizesse esse tipo de troca?
10. O barco é utilizado para outro fim que não seja o da pescaria? Nessas ocasiões, o que costuma levar a bordo? O barco acomoda com facilidade?

A ideia da pesquisa é deixar o entrevistado à vontade para fazer qualquer tipo de comentário construtivo para validação das hipóteses e possibilitar eventuais melhoras. A intenção da entrevista é deixada clara no início: analisar o cenário de aceitação dos motores elétricos para embarcações de pesca de pequeno porte. De modo geral, os resultados foram observados foram compilados no gráfico mostrado na Figura 53.

Figura 53 – Resultados das hipóteses para as 15 entrevistas



Fonte: Autor (2018).

A primeira informação relevante retirada das entrevistas foi que a modalidade de pesca influenciou muito nas respostas. Navegação em águas abrigadas e oceânicas são completamente diferentes em questão de tipo de barco, motor, duração da pesca e tipo de peixe pescado, influenciando diretamente no viés da entrevista.

A pesca em lagoa dura menos de 3 horas, usa-se muito menos o motor de popa, o silêncio e ausência de ruídos é essencial, barcos de alumínio são amplamente usados. A pesca oceânica pode durar um dia inteiro, o principal peixe é o robalo e utiliza-se barcos de maior porte dotados, usualmente, com dois motores. A diferença entre os equipamentos de pesca também é abissal.

De modo geral, todos os participantes possuem opiniões muito semelhantes perante a questão da troca da matriz energética no meio náutico. É quase unânime a preferência pelos motores elétricos, porém a inviabilidade econômica é a principal barreira encontrada. Outro ponto levantado com frequência foi a falta de conhecimento de fabricantes de motores de popa elétricos de porte maior, mesmo quando 100% dos entrevistados usam ou já usaram o motor elétrico portátil para manobrar o barco e navegar com menos ruído.

Foi observado que a grande maioria dos pescadores se incomodam com os gastos de combustível e reclamam da manutenção do motor. Porém, foi difícil de responder com precisão perguntas quantitativas de gastos, mostrando que raramente é feito um controle de despesas com os atuais motores. Isso é refletido no que já foi observado por Tveitdal (2017): os potenciais consumidores de motores elétricos não enxergam suas vantagens a longo prazo.

De qualquer forma, a confiança nos motores elétricos é dependente da duração das baterias que o fornecem energia. Mesmo às vezes não compreendendo o funcionamento do motor, muitos dizem já confirmar pelo fenômeno de substituição já observado no setor automobilístico. Isso indica que outros setores podem ajudar a decisão de pessoas dispostas a usar novas tecnologias (*early adopters*), que são peças-chave para qualquer produto novo no mercado.

Outro fator onde unanimidade foi vista é a atual troca pelo motor elétrico mesmo por preços diferentes. Ressalta-se que é complicado quantificar o quanto a mais ou a menos deve ser colocado para influenciar a decisão. Porém, de forma superficial, o potencial da troca do motor é grande, o que é diferente do potencial da compra de um novo.

Em outra linha, lista-se algumas observações das entrevistas que chamaram a atenção:

- Proprietários de barcos de menor porte tendem a criar um apego maior com a embarcação;
- Todos os entrevistados usam ou já usaram o motor elétrico portátil;
- Troca do atual motor de popa por um elétrico é a mais interessante forma de inserção no mercado;
- Foi amplamente recomendado o mesmo estudo para região norte, onde há rios e lagos em abundância, em conjunto com regras ambientais rígidas;
- Conjunto de baterias deve ser facilmente removível, junto com o motor elétrico.

Em outro contexto, para uso na próxima etapa do projeto, analisa-se as principais embarcações semelhantes comercializadas no Brasil. Os parâmetros estudados podem ser observados abaixo na Tabela 10.

Tabela 10 – Embarcações semelhantes

Modelo	Estaleiro	Material	Comprimento [m]	Boca [m]	Calado [m]	Pontal [m]	Peso [kg]	Potência mínima [HP]
160F	Secboats	Fibra	5,00	1,62	0,20	0,60	180	15
ZG 500	Zeta	Fibra	5,00	1,50	0,15	0,67	140	30
Balli 500	Karmarine	Fibra	5,00	1,25	0,25	0,50	120	25
Star 15	Karmarine	Fibra	4,50	1,50	0,10	0,50	120	15
A-530	Artsol	Fibra	5,30	1,50	0,30	0,60	120	15
Dumar 499	Dumar Wellcraft	Fibra	5,00	1,53	0,30	0,50	180	25
Fishing 150	Sea Crest	Fibra	4,50	1,70	0,35	-	220	15
BRAVO 500	TWS Barcos	Fibra	5,00	1,35	0,32	0,68	130	20
Classic 160	Pantanautica	Fibra	4,95	1,75	0,20	0,72	180	15
TR 16	Krause Boats	Fibra	4,95	1,64	0,20	0,56	170	30
Panga 15' Large	Estaleiro Panga	Fibra	4,70	1,70	0,12	-	250	25
Fly Fish 170	Bras Boats	Fibra	5,00	2,24	0,24	1,13	400	75
Pescador 485	Fibramar	Fibra	4,85	2,10	0,35	0,60	-	25
480P	Ocker	Fibra	4,80	1,40	0,10	0,50	110	25
Marajó 17'	Levefort	Alumínio	5,30	1,80	0,10	0,70	326	50
Quest 165	Metalglass	Alumínio	4,95	1,80	0,20	0,62	200	50
Amazon 145	Uai náutica	Alumínio	4,50	1,54	0,17	0,57	112	25

Fonte: Autor (2018).

## 4.2 EMBARCAÇÃO ESCOLHIDA

A embarcação escolhida para análise foi disponibilizada pelo Estaleiro Secboats, da cidade de Palhoça, em Santa Catarina, e consiste em um barco de pesca de pequeno porte (16 pés), Figura 54. Suas principais características foram levantadas em campo pelo autor e seguem abaixo:

- Comprimento total = 5,00 metros;
- Comprimento entre perpendiculares = 4,40 metros;
- Boca moldada = 1,30 metro;
- Boca máxima = 1,62 metros;
- Pontal moldado = 0,50 metro;
- Pontal = 0,60 metro;
- Borda-livre leve = 0,50 metro;
- Deslocamento leve = 180 kg;

- Propulsão recomendada pelo estaleiro = motores de popa entre 15 e 40 HP;
- Material do casco = fibra de vidro.

Figura 54 – Embarcação 160F do estaleiro Secboats



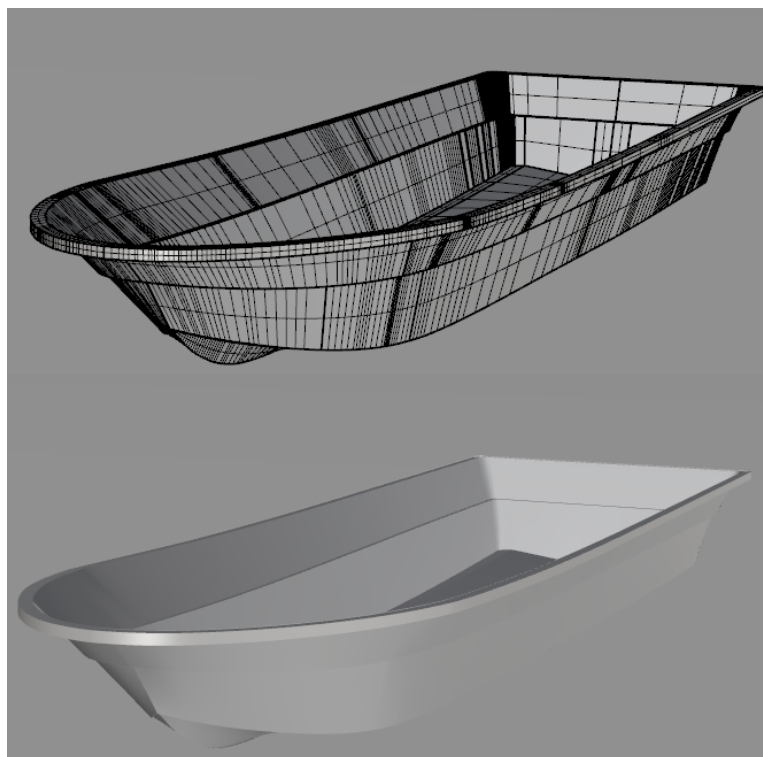
Fonte: Autor (2018).

Nota-se que sua forma é peculiar das embarcações destinadas a navegação em águas abrigadas, como lagoas e rios. Isso se deve ao fato de o fundo ser quase chato, com ângulo de *deadrise* baixo (uma média de 9 graus) ao longo do comprimento.

Outros detalhes do casco foram obtidos no estaleiro. A variação do ângulo de *deadrise* ao longo do comprimento foi estimada medindo por estações de meio em meio metro. As linhas de *strake* e a borda superior foram mensuradas com trena e apenas reproduzidas no desenho.

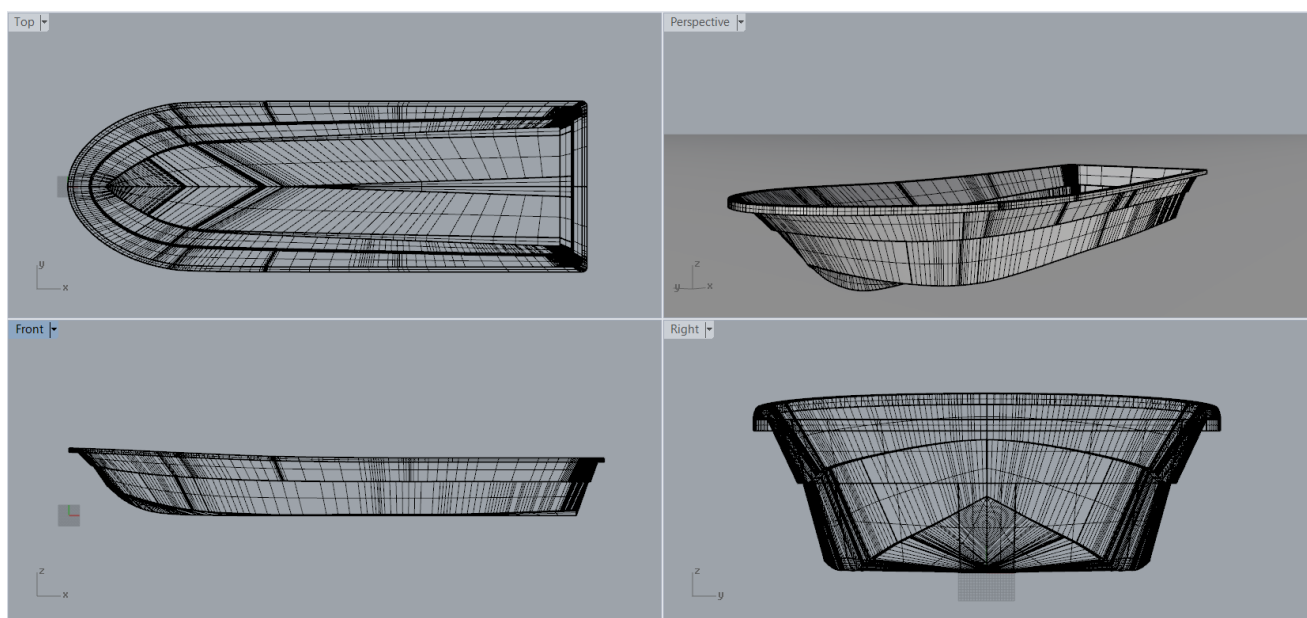
Com essas informações em mãos, é possível modelar a embarcação auxiliado por um programa computacional de design. Como a resistência ao avanço será computada utilizando a extensão Orca 3D®, programa disponível no Centro de Tecnologia de Joinville da UFSC, optou-se pelo Rhinoceros® para a modelagem de casco. A Figuras 55 e a Figura 56 mostram o modelo final utilizado no trabalho.

Figura 55 – Embarcação 160F modelada no Rhinoceros®



Fonte: Autor (2018).

Figura 56 – Vistas dispostas no programa Rhinoceros® da embarcação modelada



Fonte: Autor (2018).

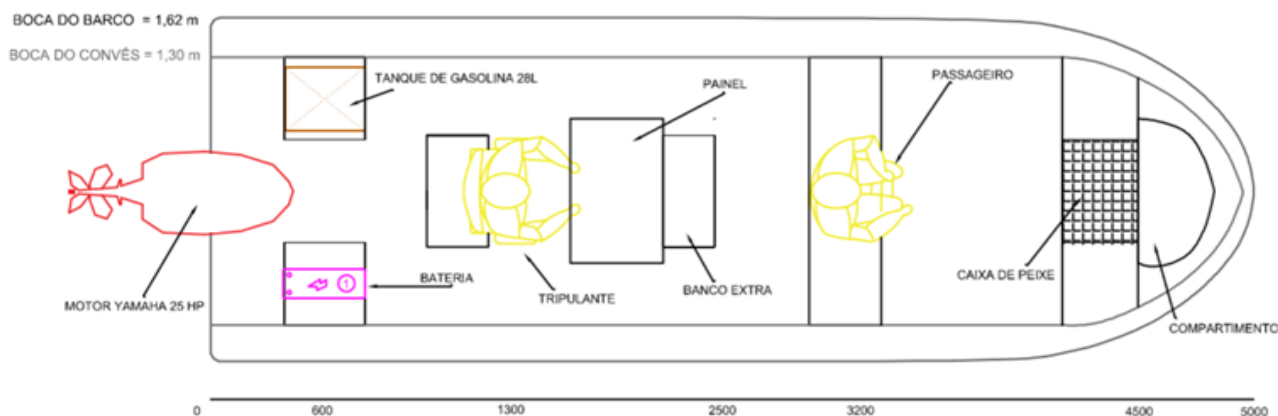
### 4.3 ARRANJO GERAL

O principal motivo de se estudar o arranjo geral de uma embarcação é computar as coordenadas do centro de gravidade, uma vez que os valores são de extrema importância para o comportamento e resistência do barco. Nesse sentido, uma estimativa deles deve ser considerada para a primeira análise.

Pelo seu tamanho e espaço interno, o arranjo da embarcação 160F é relativamente simples de ser estabelecido. Com informações coletadas com proprietários do barco por meio de questionários, os principais itens levados para navegação foram alocados no plano 2-D visto na Figura 57.

O motor selecionado advém do estudo de embarcações semelhantes. Como os estaleiros divulgam uma potência recomendada, a potência média de 25 HP foi usada para primeira estimativa, a qual corresponde aproximadamente à média das potências obtidas da planilha.

Figura 57 – Arranjo proposto usualmente visto para o barco 160F



Fonte: Autor (2018).

Com o valor recomendado da potência do motor, deve-se encontrar um motor análogo na versão elétrica, dado que a distribuição de peso do conjunto propulsivo de cada um varia bastante e não seria coerente considerar o motor à combustão, mesmo que em primeira análise.

Em teoria, essa mudança consistiria apenas em fazer a conversão de HP para kW (unidade de potência normalmente utilizada para sistemas elétricos) e selecionar um motor elétrico disponível no mercado. Porém, de acordo com dados das principais fabricantes de motores elétricos no meio náutico, Torqeedo e Oceanvolt, a conversão não deve ser feita desta forma por



causa da diferença entre as curvas de torque e as maiores eficiências do sistema elétrico. É recomendado, assim, que cada quilowatt do motor elétrico corresponda a três cavalos do motor à gasolina (TORQEEDO, 2017). Sendo assim, os 25 cavalos equivalem à 8,33 kW – e não à 17,86 kW como usualmente convém. O motor Cruise 10.0R do catálogo da Torqueedo foi selecionado juntamente com duas baterias Power 48-5000 de 5000 Wh.

Figura 58 – Motor de popa elétrico e o conjunto de baterias propostos



Fonte: Torqueedo (2018).

A planilha de pesos e centros pôde assim ser computada, substituindo o motor à combustão, a sua bateria e o seu tanque de combustível pelo sistema elétrico selecionado. A Tabela 11 mostra os componentes do primeiro arranjo geral.

Tabela 11 – Pesos e centros para esta etapa do projeto

Itens a bordo	Massa [kg]	Posição X [mm]	Posição Y [mm]	Posição Z [mm]
Casco	145,00	2256,54	0	264
Convés	35,00	2256,54	0	280
Painel & Banco	20,00	2050,00	0	500
Motor Torqueedo	62,50	200,00	0	400
Bateria 1	36,50	600,00	-400	250
Tripulante	80,00	1350,00	0	700
Passageiro	80,00	3200,00	0	450

<b>Bateria 2</b>	36,50	600,00	400	150
<b>Caixa de peixe</b>	10,00	4300,00	0	150
<b>Compartimento</b>	5,00	4700,00	0	300
<b>Total</b>	<b>510,50</b>	-	-	-

Fonte: Autor (2018).

O casco e convés tiveram seus centros de gravidade estimados na modelagem pelo comando *VolumeCentroid* do Rhinoceros®, supondo-se uma uniformidade na distribuição do material. As dimensões do painel e bancos foram medidas na própria embarcação. Os outros componentes são estimados de acordo com as entrevistas, como o número de passageiros e o que é levado para a pesca. Os valores do centro de gravidade longitudinal, vertical e transversal, calculados pelos momentos gerados pelos braços de cada item, são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Coordenadas do centro de gravidade

<b>LCG</b>	1704,17	mm
<b>TCG</b>	0,00	mm
<b>VCG</b>	377,33	mm

Fonte: Autor (2018).

Com uma primeira estimativa do centro de gravidade, é possível fazer a simulação da resistência ao avanço.

#### 4.4 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

O programa Orca 3D® foi utilizado para o cálculo de resistência ao avanço. No modo de predição pelo método de Savitsky modificado para cascos de planeio, a estimativa difere-se do tradicional método nos seguintes quesitos (HelpOrca3D,2018):

- Mudança do centro de gravidade e do ângulo de inclinação do eixo propulsor a cada mudança do ângulo de trim;
- Consideração das linhas de *strake*<sup>5</sup>;
- Consideração da variação do ângulo de *deadrise* ao longo do comprimento do barco;

---

<sup>5</sup> O *strake* é um chapeamento no exterior do casco que se estende de popa à proa. Muito utilizado em barcos de madeira, também é encontrado em embarcações de fibra para aprimorar a estrutura e a estabilidade dinâmica.

- Análise para velocidades de pré-planeio de acordo com as correções feitas por Blount e Fox (1976).

Além disso, o Orca 3D® padroniza algumas características de modelagem para os cálculos de seu algoritmo interno terem validade. Portanto, algumas mudanças foram feitas respeitando esses requisitos, os quais são:

- Orientação do modelo precisa estar apontada no sentido da água;
- Modelagem da parte inferior deve considerar apenas até a boca entre quinas;
- Modelagem deve conter apenas a metade bombordo ou boreste do casco;
- Linha de centro deve estar no 0 do *grid* da coordenada transversal;
- Linha de base deve estar no 0 do *grid* da coordenada vertical.

Além da modelagem, a Figura 59 mostra os dados de entrada que precisam ser previamente estudados para começar a simulação.

Figura 59 – Dados de entrada da extensão Orca3D®

The image shows a software dialog box for Orca3D with the following sections and values:

- Mass and Geometry:**
  - Weight: 510.500 kgf
  - LCG (from origin): 1.750 m
  - VCG (from origin): 0.377 m
  - Propeller LCE (from origin): 0.000 m
  - Propeller VCE (from origin): -0.200 m
  - Shaft angle to baseline: 13.600 deg
- Speeds:**
  - Minimum Speed: 1 kt
  - Maximum Speed: 35 kt
  - Speed Increment: 0.5 kt
  - Design Speed: 15 kt
- Margins and Efficiencies:**
  - Resistance Design Margin: 0 %
  - Propulsive Efficiency: 100 %

Additional options include a checkbox for "Also Write Output To CSV File" (checked) with the filename "SavitskyAnalysis.csv", and buttons for "Calculate", "Close", and "Export".

Fonte: Orca3D (2018).

O peso, LCG e VCG foram calculados com a tabela de pesos e centros. O centro de esforço do hélice longitudinal (LCE) e vertical (VCE) foram obtidos do catálogo do motor selecionado, apenas como referência. Para o ângulo do eixo, que é o ângulo de aplicação do empuxo gerado pelo hélice, foi utilizado o valor de 13,6 graus, o qual representa a inclinação do espelho de popa onde o motor é montado.

As velocidades máxima e mínima foram escolhidas apenas para se obter uma faixa de valores segura para a análise. A velocidade de serviço é trazida do estudo de mercado como uma velocidade aceitável de deslocamento para pescaria ou passeios no geral.

A margem de design da resistência foi deixada como 1, uma vez que a embarcação navegará em águas calmas. A eficiência propulsiva será explanada na seleção do motor, onde todas as perdas de potência do sistema serão estimadas. A Tabela 13 e as Figuras 60, 61 e 62 mostram os resultados obtidos.

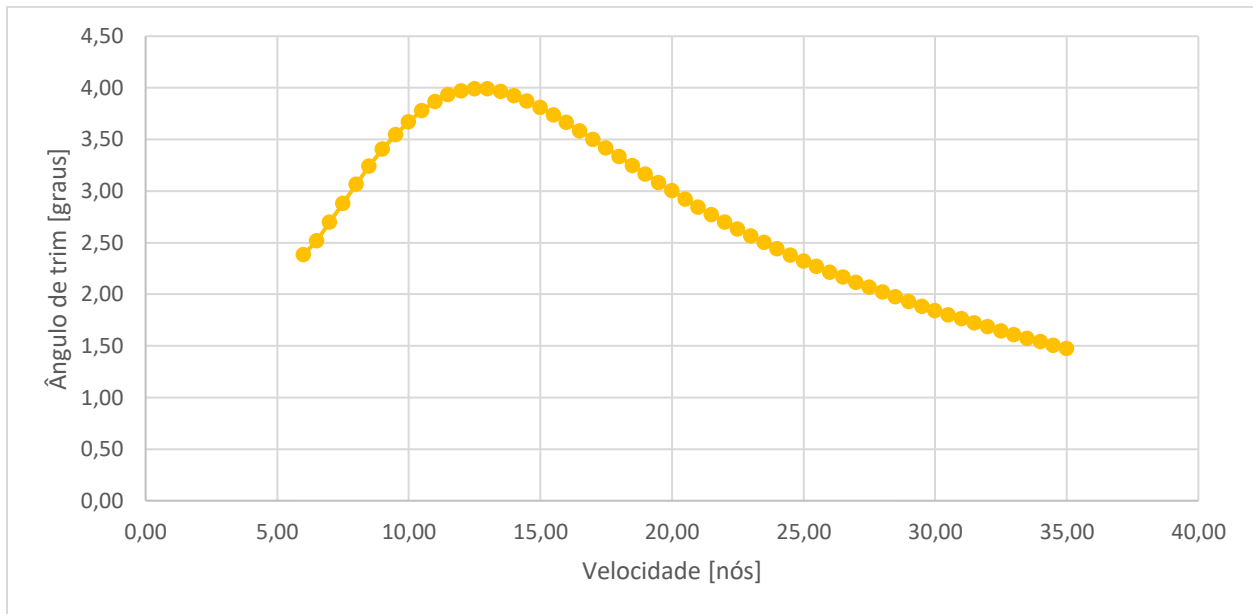
Tabela 13 – Resultados da simulação de resistência ao avanço

V [nós]	Ângulo de trim [graus]	Resistência [N]	Potência Efetiva [kW]
6,00	2,39	480,23	1,48
6,50	2,52	519,30	1,74
7,00	2,70	538,62	1,94
7,50	2,88	551,27	2,13
8,00	3,07	560,07	2,31
8,50	3,24	569,39	2,49
9,00	3,41	578,56	2,68
9,50	3,55	591,30	2,89
10,00	3,67	603,31	3,10
10,50	3,78	613,72	3,32
11,00	3,87	623,21	3,53
11,50	3,93	631,20	3,73
12,00	3,97	637,79	3,94
12,50	3,99	642,97	4,13
13,00	3,99	647,05	4,33
13,50	3,97	651,06	4,52
14,00	3,93	654,73	4,72
14,50	3,87	658,37	4,91
<b>15,00</b>	<b>3,81</b>	<b>662,14</b>	<b>5,11</b>
15,50	3,74	666,14	5,31

<b>V</b> <b>[nós]</b>	<b>Ângulo</b> <b>de trim</b> <b>[graus]</b>	<b>Resistência</b> <b>[N]</b>	<b>Potência</b> <b>Efetiva</b> <b>[kW]</b>
16,00	3,66	670,69	5,52
16,50	3,58	675,68	5,74
17,00	3,50	681,21	5,96
17,50	3,42	687,98	6,19
18,00	3,33	695,00	6,44
18,50	3,25	702,62	6,69
19,00	3,16	711,02	6,95
19,50	3,08	720,29	7,23
20,00	3,00	730,28	7,51
20,50	2,92	740,82	7,81
21,00	2,85	752,16	8,13
21,50	2,77	764,33	8,45
22,00	2,70	777,22	8,80
22,50	2,63	790,80	9,15
23,00	2,57	805,07	9,53
23,50	2,50	820,05	9,91
24,00	2,44	835,52	10,32
24,50	2,38	851,70	10,73
25,00	2,32	868,82	11,17
25,50	2,27	886,65	11,63
26,00	2,22	905,11	12,11
26,50	2,17	924,18	12,60
27,00	2,12	943,84	13,11
27,50	2,07	964,65	13,65
28,00	2,02	986,73	14,21
28,50	1,97	1009,41	14,80
29,00	1,93	1032,69	15,41
29,50	1,89	1056,57	16,03
30,00	1,84	1081,16	16,69
30,50	1,80	1106,59	17,36
31,00	1,76	1132,63	18,06
31,50	1,72	1159,14	18,78
32,00	1,69	1186,44	19,53
32,50	1,65	1214,31	20,30
33,00	1,61	1243,09	21,10
33,50	1,57	1272,45	21,93
34,00	1,54	1302,39	22,78
34,50	1,51	1332,98	23,66
35,00	1,47	1364,46	24,57

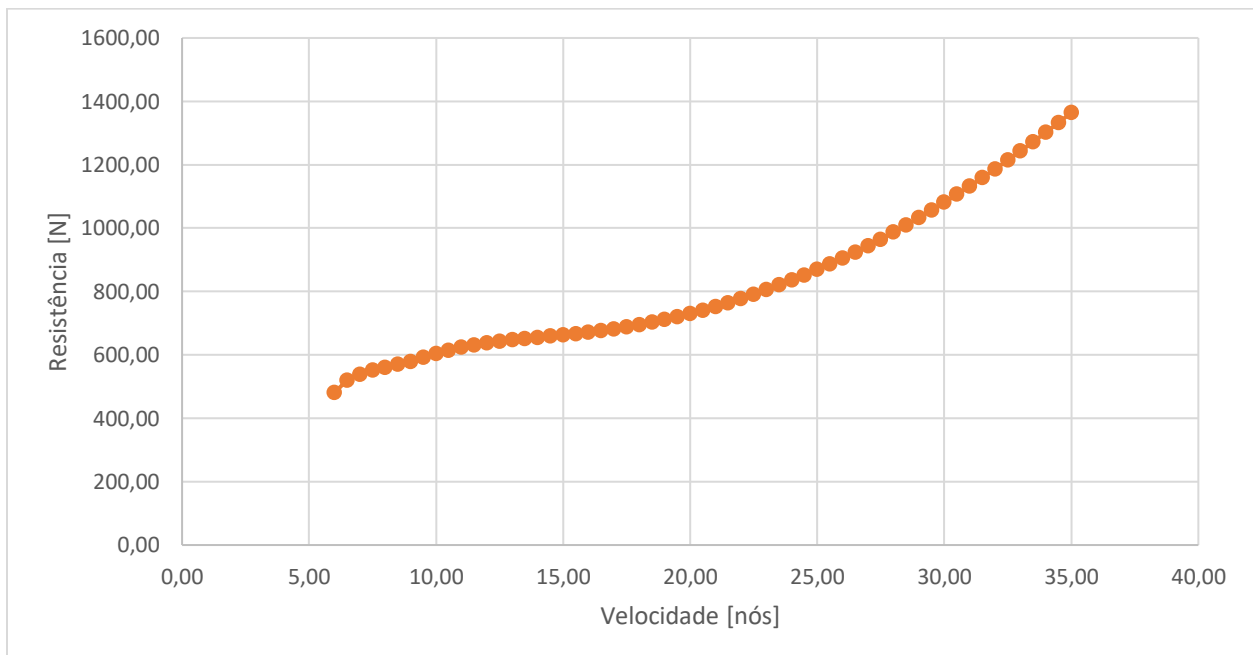
Fonte: Autor (2018).

Figura 60 – Ângulo de trim pela velocidade em nós



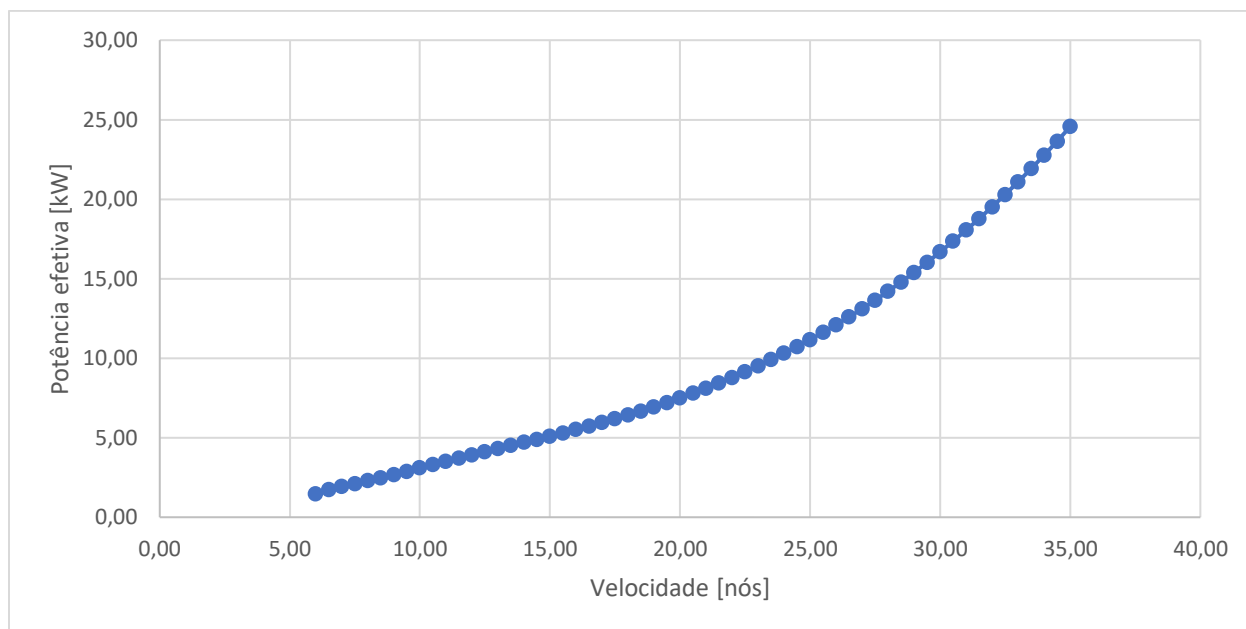
Fonte: Autor (2018).

Figura 61 – Resistência ao avanço pela velocidade



Fonte: Autor (2018).

Figura 62 – Gráfico da potência efetiva pela velocidade



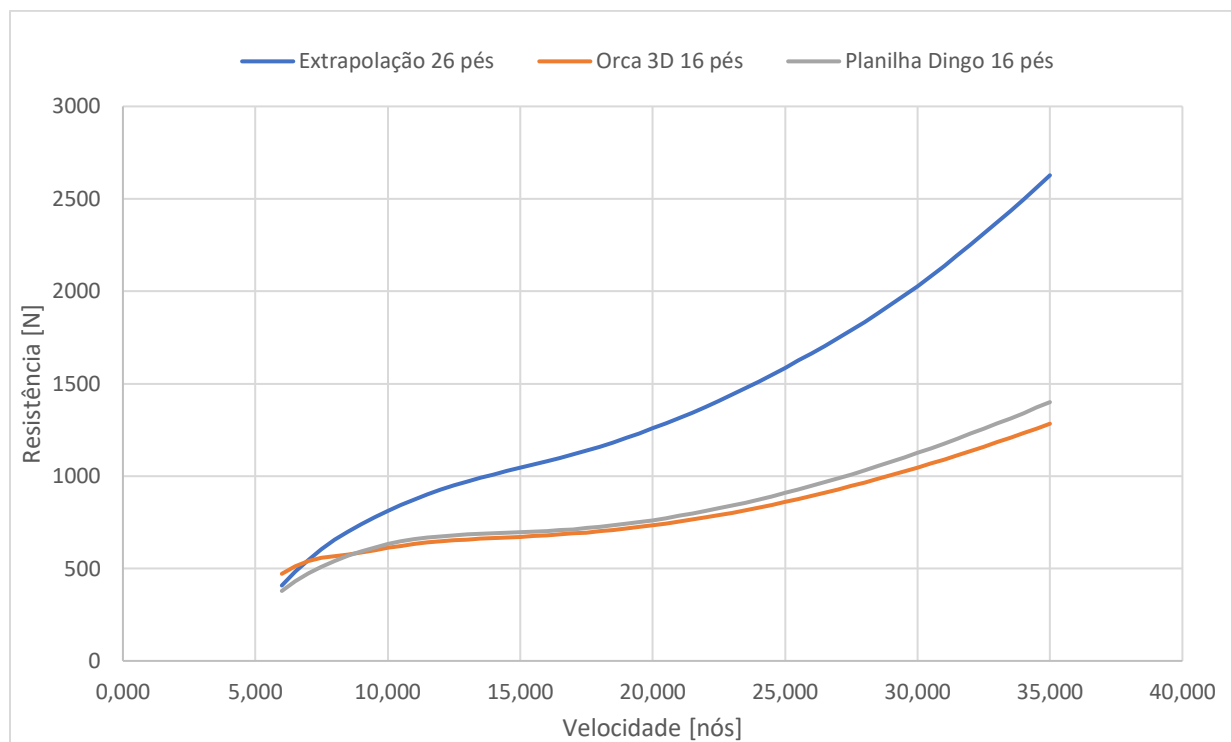
Fonte: Autor (2018).

Segundo própria análise gerada após a simulação pelo programa, a modelagem e resultados estavam de acordo com os requisitos impostos. Pelo gráfico de resistência, nota-se que a embarcação permanece na região de pré-planeio em uma estreita faixa de velocidades. Com intuito de validar o resultado foram feitas as seguintes propostas:

- Extrapolação geométrica do casco para 26 pés, no caso de o casco ser pequeno e estar beirando o limite inferior de aplicação do método de Savitsky;
- Utilização da planilha de Dingo (validada por Marin, 2015) para cálculo da resistência ao avanço.

Os resultados para a resistência podem ser vistos na Figura 63.

Figura 63 – Comparação entre os gráficos de resistência



Fonte: Autor (2018).

Percebe-se que os gráficos mantêm características parecidas. Uma potência efetiva de 5,11 kW para velocidade de serviço (15 nós) pode ser observada. 40% de eficiência representa 17 HP que o motor precisa fornecer ao barco para alcançar essa velocidade, o que faz sentido do ponto de vista experimental.

No entanto, isso não explica o fato de o barco quase não transitar na região de pré-planeio. Ressalta-se que a simulação no Orca 3D considera apenas números de Froude volumétricos acima de 1, encontrando-se em um range de 1,015 a 6,459 para a presente análise.

Ainda no gráfico da resistência, pode-se observar a tendência da curva a se manter no padrão de pré-planeio (uma curva com caráter logarítmico) quando se aproxima de zero para baixas velocidades. Uma possível explicação é o método não cobrir a área de pré-planeio por inteiro e o barco possuir um ângulo de *deadrise* muito baixo, tendo um fundo de casco quase chato, que o faz planar com maior facilidade – mais um conjunto de fatores, como ângulo do empuxo e posição inicial do LCG.



Desta forma, os próximos passos a serem seguidos são: seleção do motor elétrico, dimensionamento do banco de baterias, estudo do hélice de propulsão e a segunda volta na espiral, onde o sistema escolhido será apreciado.

#### 4.5 SELEÇÃO DO MOTOR

O principal atributo observado para selecionar o motor é a potência fornecida. O motor deve ser capaz de fornecer valores de potência condizentes com a potência efetiva calculada na resistência ao avanço da embarcação 160F. Deve-se atentar, ainda, às perdas de potência típicas em motores de popa elétricos.

Primeiramente, o tipo de motor elétrico (entre as opções apresentadas na seção 2.3.2) deve ser estudado. Para isso, sugere-se o uso do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), muito comum para tomada de decisões, que é um processo de escolha baseado na teoria da análise hierárquica de Saaty (1991).

O AHP envolve uma estruturação de multicritérios de escolha em uma hierarquia. O método avalia a importância relativa desses critérios, compara alternativas para cada critério, e determina um *ranking* total das alternativas (DSS, 2006). Neste caso, as alternativas de motores elétricos são os de indução, de corrente contínua com escovas e os de ímã permanente PMSM e BLDC. Já os critérios de avaliação são custo, peso, eficiência, rotação nominal, tensão nominal e potência entregue.

Para o desenvolvimento do método, foi utilizada a planilha disponibilizada por Bernard (2016). Nela, de acordo com o recomendado por Saaty (1991), uma escala de 1/9 a 9 é utilizada para definir a relevância de cada critério perante ao projeto e de cada alternativa perante o critério. A Tabela 14 ilustra como a matriz é formada, comparando os critérios entre si. Os seguintes pesos foram dados aos critérios estabelecidos:

- 9 – Peso (kg/kW);
- 8 – Custo (R\$/kW);
- 7 – Rotação nominal (rpm);
- 5 – Eficiência (%);
- 4 – Tensão (V).

O peso é o fator mais importante na análise, uma vez que ele estará diretamente associado à potência do próprio motor, contribuindo proporcionalmente de forma significativa à resistência ao avanço do leve barco em questão. O custo também foi considerado com peso alto na escala, uma vez que há uma variação considerável de preços entre os tipos de motores. A rotação nominal impacta a confiabilidade do sistema de transmissão, quanto mais baixa ela for, mais simples o sistema será. A eficiência energética do motor foi considerada com peso 5, pois todos os motores apresentam bom desempenho nesta faixa de potência. A tensão está relacionada com a segurança a bordo, quanto menor ela for, mais segura será a manutenção e manuseio dos eletrônicos a bordo. No entanto, a corrente de descarga das baterias pode ser manejada e um sistema bem vedado impediria possíveis acidentes. Assim, a tensão representa o menor peso dos critérios.

Tabela 14 – Matriz de comparação dos critérios para o método AHP

<b>Crítérios</b>	<b>Custo</b>	<b>Peso</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Rotação</b>	<b>Tensão</b>
<b>Custo</b>	1	1/2	4	2	5
<b>Peso</b>	2	1	5	3	6
<b>Eficiência</b>	1/4	1/5	1	1/3	2
<b>Rotação</b>	1/2	1/3	3	1	4
<b>Tensão</b>	1/5	1/6	1/2	1/4	1

Fonte: Autor (2018).

Seleciona-se opções disponíveis no mercado com potências nominais menores que 12kW para cada tipo de motor, com intuito de se fazer uma comparação quantitativa mais justa entre eles. Depois de uma análise algébrica, os resultados são apresentados na forma percentual, com o maior valor indicando melhor desempenho em relação ao projeto. Os resultados podem ser vistos abaixo na Tabela 15. Ressalva-se que a linha do resultado representa a soma da pontuação de cada critério para a respectiva alternativa.

Tabela 15 – Resultado do método AHP para seleção do motor elétrico

<b>Crítérios</b>	<b>Pesos</b>	<b>Indução</b>	<b>PMSM</b>	<b>BLDC</b>	<b>DC com escovas</b>
<b>Custo [R\$/W]</b>	0,2720	0,0465	0,0201	0,1281	0,0772
<b>Peso [kg/W]</b>	0,4240	0,1136	0,0564	0,2366	0,0178
<b>Eficiência [%]</b>	0,0780	0,0097	0,0438	0,0211	0,0034
<b>Rotação nominal [rpm]</b>	0,1750	0,0693	0,0693	0,0065	0,0298
<b>Tensão [V]</b>	0,0510	0,0068	0,0021	0,0285	0,0137
<b>Resultado normalizado</b>	<b>1,0000</b>	<b>0,2459</b>	<b>0,1918</b>	<b>0,4208</b>	<b>0,1419</b>

Fonte: Autor (2018).

O motor BLDC de ímã permanente foi o que se apresentou mais interessante para o projeto. Isso se deve ao fato de ele apresentar as excelentes propriedades que os motores sem escovas proporcionam, como peso e eficiência, por um preço mais acessível que o PMSM. Além disso, apesar de não ser prioridade no projeto, a baixa tensão nominal também merece ser mencionada, conferindo maior segurança a bordo. A desvantagem da escolha é a alta rotação, que deverá ser compensada com um eficiente sistema de transmissão.

Com o tipo de motor selecionado, estima-se a potência que ele deverá fornecer. Para esta etapa de projeto, como ainda há pouco definido que contribua para valores precisos de perda de potência, utiliza-se como referência a literatura e o que é oferecido no mercado. Em suma, serão consideradas as seguintes eficiências: do próprio motor; do controlador do motor; da transmissão do tipo rabetá; e do hélice propulsor.

Os motores BLDC apresentam algumas perdas durante seu funcionamento, as principais são: perdas Joule (térmicas), perdas de Foucault por correntes parasitas (*eddy-current losses*) e as perdas por histerese, que são provocadas pelo atraso entre a indução e campo magnético intrínseco de materiais ferromagnéticos. O controlador do motor também deve ser considerado para a estimativa de perda. Ramos (2010) sintetiza as eficiências normalmente vistas em motores utilizados para veículos elétricos, porém considera os motores PMSM para análise, os quais são pouco mais eficientes que os BLDC.

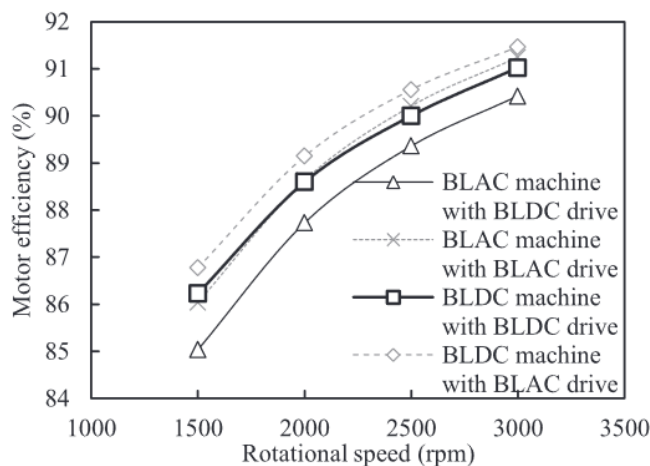
Tabela 16 – Eficiências de eficiências entre os tipos de motor e seus controladores

Tipo de motor	Eficiência [%]		
	Motor	Controlador	Total
Corrente contínua	80	98	78
Indução	90	93	84
Ímã permanente	97	93	90
Relutância comutado	94	90	85

Fonte: Adaptado de Ramos (2010).

Akatsu (2012) compara as eficiências dos motores BLDC e PMSM com seus respectivos controladores, como pode ser visto na Figura 64.

Figura 64 – Eficiência do motor e controlador para motores de imã permanente



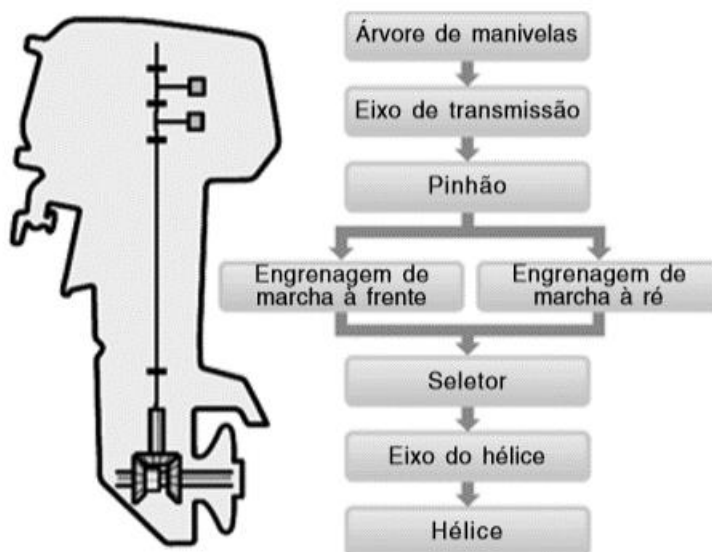
Fonte: Akatsu (2012).

Considera-se os valores da curva com indicadores quadrados (motor BLDC com controlador BLDC), ou seja, entre 86 e 91%.

Para a transmissão do tipo rabetada, seguindo o princípio de funcionamento dos sistemas de transmissão vistos nos motores de popa à combustão, os componentes são: eixo de transmissão, eixo do hélice e um sistema de câmbio que conecta ambos.

O sistema de câmbio nada mais é que um conjunto de engrenagens com um pinhão e um seletor. Ele possui duas funções essenciais para os motores de popa: redução da rotação para amplificação do torque repassado do eixo de transmissão ao eixo do hélice; e a escolha da direção de giro do eixo do hélice, permitindo que o barco vá para frente ou para trás em relação ao motor. A Figura 65 apresenta as partes desse sistema.

Figura 65 – Transmissão típica dos motores de popa



Fonte: Adaptado de Yamaha (2008).

Para o caso de um sistema elétrico, onde o controlador do motor tem como função o ajuste do sentido de rotação, é coerente considerar apenas as perdas dos eixos e da redução. Nessa linha, esse arranjo seria essencialmente como os tradicionais sistemas de transmissão marítimos. Por esse motivo, utilizou-se os valores de eficiência apresentados por Oliveira (2013). Segundo o autor, a eficiência de transmissão mecânica encontrada em sistemas elétricos fica na faixa entre 95 e 98%.

O projeto do hélice propulsor é, em termos de eficiência energética, o quesito mais sensível para a análise. No entanto, para a presente aplicação, é o que menos se encontra na literatura. Segundo Kristensen (2013), a eficiência de hélices projetados varia entre uma faixa de 55 a 70%, podendo subir ainda mais se otimizados. Portanto, os valores mínimos, médios e máximos das estimativas de potência podem ser vistos na Tabela 17.

Tabela 17 – Eficiências estimadas de cada etapa

<b>Eficiências</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>
<b>Motor e controlador</b>	0,86	0,885	0,91
<b>Transmissão</b>	0,95	0,965	0,98
<b>Hélice</b>	0,55	0,625	0,70
<b><math>\eta_{total}</math></b>	<b>0,45</b>	<b>0,53</b>	<b>0,67</b>

Fonte: Autor (2018).

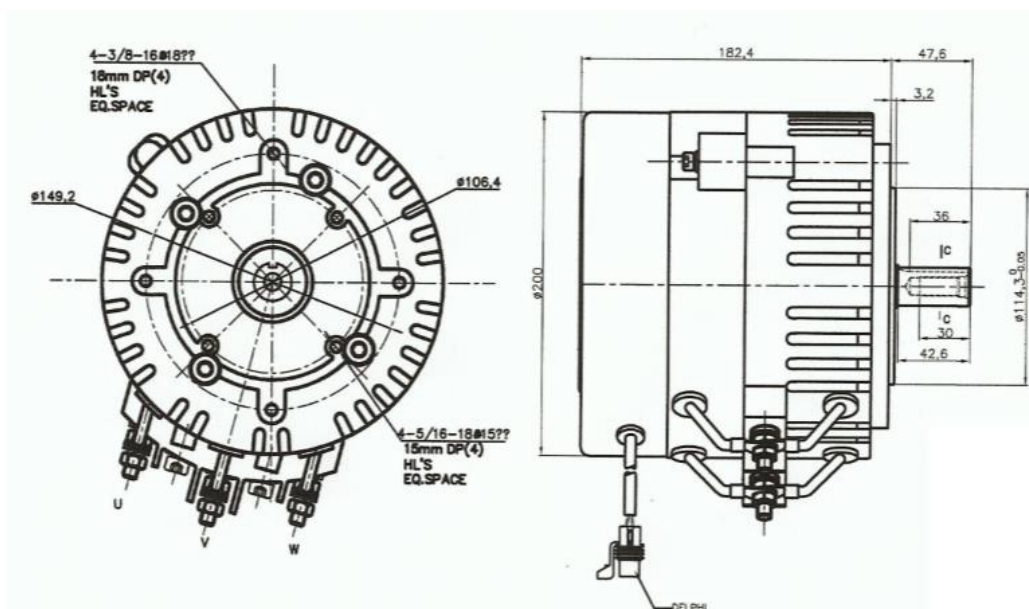
Com esses valores em mão, pode-se selecionar um motor que suprirá a demanda energética do projeto. Assume-se o valor mínimo de eficiência e o multiplica pela potência efetiva obtida na resistência ao avanço. Tem-se um total de 11,37 kW. O motor BLDC ME0913 da marca americana Mars Electric, com linha especializada em motores para veículos elétricos, é escolhido. Suas características podem ser observadas na Tabela 18 e suas dimensões na Figura 66.

Tabela 18 – Principais características do motor selecionado: Mars BLDC ME0913

Marca	Mars Electric LLC
Modelo	BLDC 0913
Arrefecimento	Ar
Controlador	3 sensores Hall
Potência de saída	12 kW
Eficiência	92%
Rotação	5000 rpm
Tensão	72 V
Peso	11,34 kg
Dimensão (diâmetro x comprimento)	230 x 200 mm

Fonte: Autor (2018)

Figura 66 – Dimensões do motor selecionado



Fonte: Mars Electric LLC

#### 4.6 SELEÇÃO DO CONJUNTO DE BATERIAS

Segundo Patel (2012), a seleção do conjunto de baterias para aplicação em sistema elétrico deve seguir os seguintes passos:

1. Selecionar a eletroquímica que melhor se enquadre nos requisitos do projeto;
2. Determinar o número de células em série para suprir a tensão do sistema;
3. Determinar a descarga em Ah requerida para alimentar a carga (corrente da carga x duração);
4. Determinar a extremidade de descarga para o número requerido de duração de ciclo c/d;
5. Determinar a capacidade Ah da bateria dividindo a Ah de descarga necessária para alimentar a carga pela máxima profundidade de descarga (divisão do item 3 pelo item 4);
6. Determinar as taxas de carga e descarga e as medidas de proteção contra sobrecarga e sobre descarga;
7. Determinar as temperaturas que o sistema alcança para dimensionar o arrefecimento necessário;
8. Determinar a ventilação necessária para o local de armazenamento das baterias.

Nesta etapa do projeto, o dimensionamento do banco de baterias limita-se aos três primeiros passos: seleção da eletroquímica da bateria; determinação da quantidade de células em série para suprir a tensão do motor selecionado; determinação do Ah requerido para alimentar a carga. Os passos 4 e 5 são de responsabilidade do fabricante da própria bateria. Os passos 7 e 8 devem ser analisados em partes do projeto com grau de detalhamento maior.

Para a escolha da eletroquímica da bateria, o método AHP utilizado na seleção do motor é também implementado aqui.

Foram analisadas as seguintes composições de materiais: chumbo-ácido, níquel-cádmio, níquel-metal hidreto e lítio-íon. As baterias de sódio não foram consideradas pelo fato de ainda não serem comercializadas. Entre as opções de baterias de lítio, como lítio-polímero e lítio-ferro, pelo fato de possuírem características semelhantes, foi decidido analisar apenas a opção de lítio-íon, por ser mais acessível comercialmente e financeiramente.

Os critérios que foram avaliados foram: custo (R\$/kWh), densidade energética (Wh/kg), número de ciclos, autodescarga mensal (%), corrente de carga ( $C$ ), efeito memória e riscos ambientais. Para a obtenção de dados e comparação entre as alternativas, produtos disponíveis no mercado foram analisados.

Os pesos para cada critério foram atribuídos de acordo com os requisitos de projeto. Na escala de 1 a 9, sendo 9 o mais relevante, os seguintes valores foram dados subjetivamente:

- 9 – Densidade energética (Wh/kg);
- 7 – Custo (R\$/kWh);
- 6 – Número de ciclos;
- 5 – Efeito memória;
- 4 – Autodescarga mensal (%);
- 2 – Corrente de carga ( $C$ );
- 2 – Riscos ambientais.

A densidade de energia foi considerada como mais importante pelo fato de o peso das baterias contribuírem significativamente para o arrasto da embarcação e, conseqüentemente, para a dimensão do sistema propulsivo. O custo também tem alta relevância por interesse do armador e até por uma possível comercialização do sistema. O número de ciclos, o efeito memória e a autodescarga mensal estão diretamente associados com a vida útil do banco de baterias. A corrente de carga nominal está relacionada com velocidade de carregamento e foi dado um peso baixo por causa da aplicação das baterias na pesca (uso diário, permitindo recarga por longo período). A Tabela 19 mostra a matriz de comparação entre os critérios.

Tabela 19 – Matriz de comparação entre os critérios observados

<b>Critérios</b>	<b>Custo</b>	<b>Densidade de energia</b>	<b>Número de ciclos</b>	<b>Autodescarga</b>	<b>Corrente de carga</b>	<b>Efeito memória</b>	<b>Risco ambiental</b>
<b>Custo</b>	1	1/3	2	4	6	3	6
<b>Densidade de energia</b>	3	1	4	6	8	5	8
<b>Número de ciclos</b>	1/2	1/4	1	3	5	2	5
<b>Autodescarga</b>	1/4	1/6	1/3	1	3	1/2	3
<b>Corrente de carga</b>	1/6	1/8	1/5	1/3	1	1/4	1
<b>Efeito memória</b>	1/3	1/5	1/2	2	4	1	4
<b>Riscos ambientais</b>	1/6	1/8	1/5	1/3	1	1/4	1

Fonte: Autor (2018).



Obtido da tabela do método AHP, o resultado normalizado em forma percentual pode ser visto na Tabela 20. Ele representa a soma dos valores obtidos para cada alternativa.

Tabela 20 - Resultado do método AHP para seleção da eletroquímica da bateria

<b>Crítérios</b>	<b>Pesos</b>	<b>Chumbo-ácido</b>	<b>NiCd</b>	<b>NiMh</b>	<b>Lítio-íon</b>
<b>Custo [R\$/kWh]</b>	0,2140	0,1228	0,0094	0,0193	0,0623
<b>Densidade energética [Wh/kg]</b>	0,4060	0,0268	0,0609	0,0974	0,2209
<b>Número de ciclos [-]</b>	0,1470	0,0098	0,0711	0,0278	0,0381
<b>Autodescarga mensal [%]</b>	0,0680	0,0335	0,0092	0,0043	0,0210
<b>Corrente de carga [C]</b>	0,0320	0,0018	0,0125	0,0051	0,0125
<b>Efeito memória [-]</b>	0,1000	0,0276	0,0047	0,0102	0,0576
<b>Riscos ambientais [-]</b>	0,0320	0,0184	0,0014	0,0084	0,0037
<b>Resultado normalizado [%]</b>	1,0000	<b>0,2408</b>	<b>0,1693</b>	<b>0,1725</b>	<b>0,4161</b>

Fonte: Autor (2018).

De acordo com o resultado apresentado, a composição eletroquímica de lítio-íon é a mais indicada para a presente etapa de projeto. Isso se deve ao fato de sua densidade de energia ser muito maior que as outras opções, fator de extrema importância no projeto, sem se distanciar nos outros quesitos. Sua desvantagem no custo será estudada adiante.

A bateria selecionada para o projeto foi a Sanyo UR18650 de lítio-íon, já comercializada no Brasil no valor médio de R\$20. Ressalta-se que a mesma bateria pode ser encontrada por US\$0,95 no exterior, porém sem as taxas de importação e transporte. Suas características podem ser vistas na Tabela 21.

Tabela 21 - Características da bateria selecionada

Eletroquímica	Lítio-íon
Marca da bateria	Sanyo
Modelo	18650
Capacidade de carga	2500 mAh
Tensão da bateria	3,7 V
Extremidade de descarga	2,75 V
Número de ciclos	1000
Peso	45 g
Dimensões (diâmetro x altura)	18 x 65 mm

Fonte: Autor (2018).

Portanto, para suprir a demanda do motor e uma navegação de 2 horas na velocidade de serviço (1,5 hora mais 30 minutos de reserva, provenientes do formulário), é necessário o

fornecimento de 24 kWh de energia. Pelas especificações da bateria, serão necessárias 2595 células de bateria, demonstrado na equação abaixo. Isso representa um peso de aproximadamente 120 kg, o qual podem ser distribuídos pelo casco em pacotes de bateria.

$$N_{células} = \frac{P_{necessária} * t_{navegação}}{T_{bateria} * C_{bateria}} = \frac{12 \text{ kW} * 2 \text{ h}}{3,7 \text{ V} * 2,5 \text{ Ah}} = 2594,6 = 2595 \text{ células}$$

#### 4.7 SELEÇÃO DO PROPULSOR

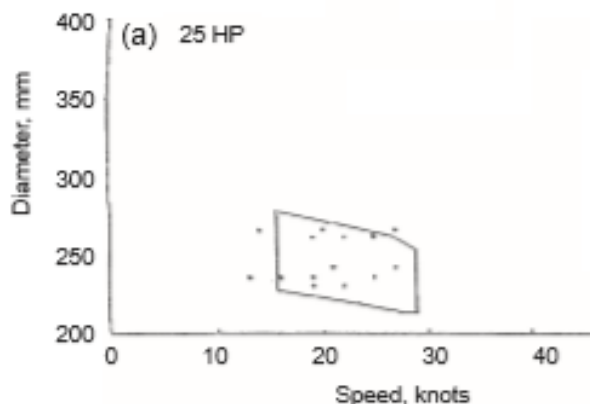
Como mencionado na seção 2.3.4, a metodologia de Wan (2014) será seguida para obtenção de um hélice que cumpra com os requisitos do projeto conceitual. Com o uso da ferramenta OpenProp, o primeiro passo é determinar os parâmetros geométricos da pá que otimizem a circulação nas seções radiais a partir dos dados de entrada do problema, os quais são apresentados abaixo com sua respectiva faixa de valores.

- Número de pás – 3;
- Rotação do hélice [rpm] – entre 1000 e 3000 rpm;
- Diâmetro do hélice [m] – entre 0,2 e 0,3 metro;
- Diâmetro do bosso [m] – 0,05 metro;
- Empuxo [N] – 662,14 N;
- Velocidade de avanço [m/s] – 4,63 m/s;
- Densidade do fluido [kg/ m<sup>3</sup>] – 1025,9 kg/ m<sup>3</sup>;
- Número de painéis radiais – 20;
- Número de painéis de corda – 20;

O número de pás vem dos motores semelhantes e é um número muito comum em motores de popa. A rotação é iterada entre a faixa de valores do motor, com intuito de selecionar o sistema de transmissão. A faixa do diâmetro do hélice também vem de motores semelhantes, como visto na Figura 67. O diâmetro do bosso é considerado como 5 centímetros, ou um quinto do diâmetro médio iterado, valor utilizado em hélices de motores de popa elétricos da Torqeedo. O empuxo necessário é retirado da análise de resistência. Para o cálculo da velocidade de avanço que chega no hélice, é utilizado um *wake fraction* ( $w_t$ ) de 0,4, comum para embarcações planantes segundo Molland (2011). Portanto, como a velocidade de serviço é 15 nós (7,72 m/s), tem-se uma velocidade de avanço de 4,63 m/s. A densidade do fluido é a densidade da água salgada. O número

de painéis é deixado fixo pelo programa, mas representa a quantidade de vórtices em que o hélice é discretizado.

Figura 67 – Diâmetros em motores de popa de 25 HP



Fonte: Latorre (1998).

O hélice de resposta da iteração no programa OpenProp possui as características mostradas na Tabela 22.

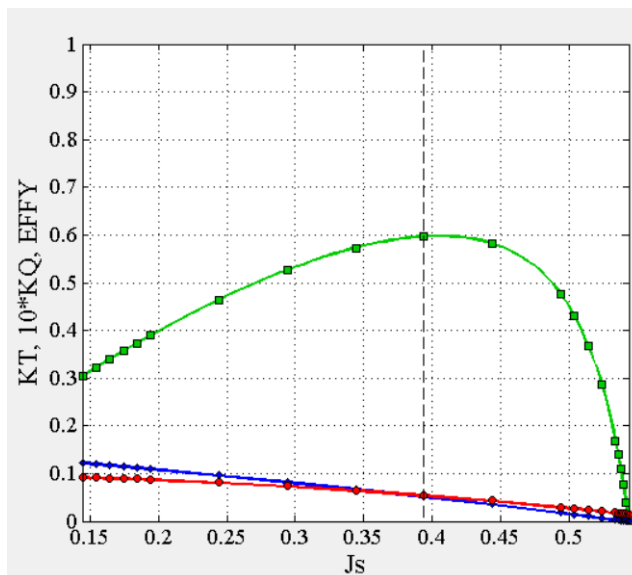
Tabela 22 – Características do hélice dimensionado no programa OpenProp

Número de pás	3
Rotação do hélice	2350 rpm
Diâmetro do hélice	0,3 m
Diâmetro do bosso	0,05 m
Empuxo gerado	662,14 N
Eficiência	59,69%
Torque gerado	20,88 Nm

Fonte: Autor (2018).

Uma eficiência máxima de 59,69% foi encontrada e uma rotação ótima de 2350 rpm, condizente com o visto em motores de popa semelhantes. Um sistema de transmissão 1:2,13 é necessário. Para a análise, o código considera a distribuição de espessuras NACA 65010, também utilizado por Wan (2014). A curva de performance pode ser vista na Figura 68.

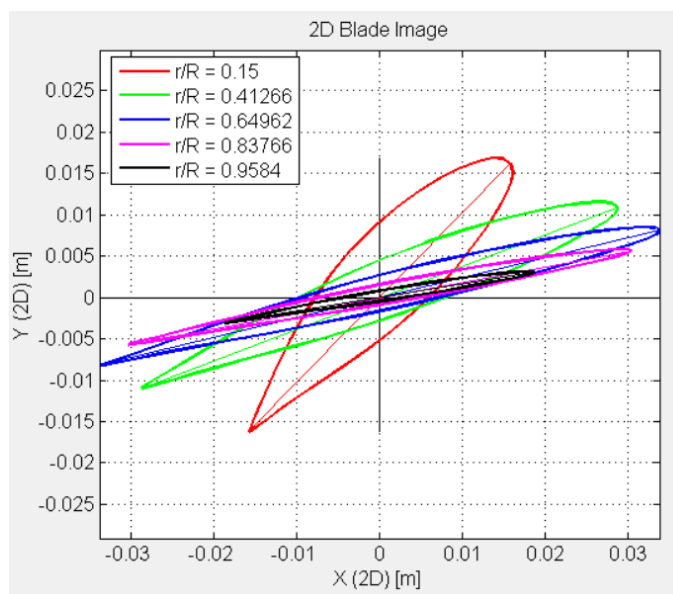
Figura 68 – Curva de performance do hélice para as condições de entrada



Fonte: Autor (2018).

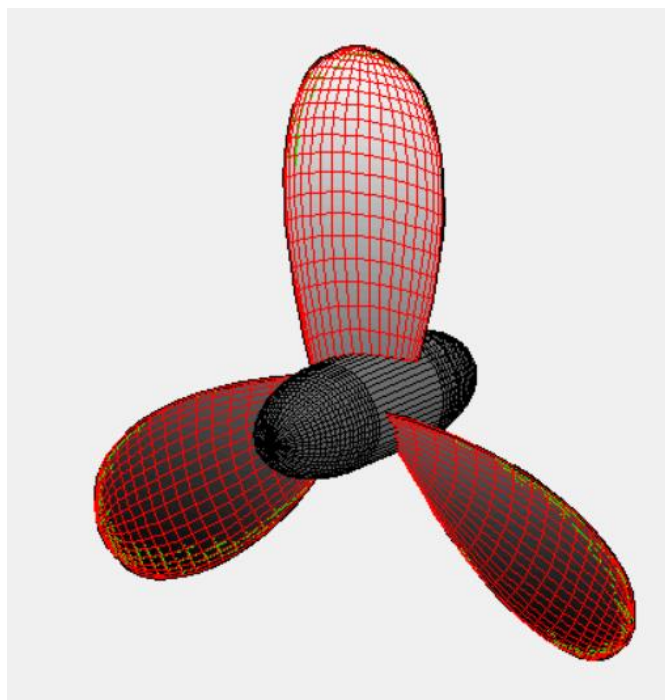
As Figuras 69 e 70 mostram a geometria do hélice. A Figura 71 mostra a curva ótima de circulação. Lembra-se que a cavitação é evitada dentro do próprio código do programa, impedindo o descolamento da camada limite ao redor da ponta das pás, como evidenciado na fundamentação teórica.

Figura 69 – Seções do hélice para cada parcela radial



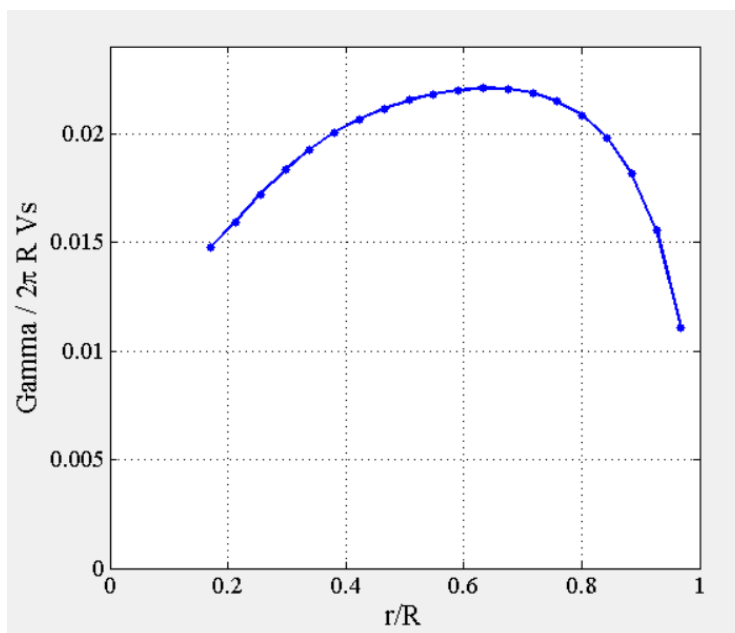
Fonte: Autor (2018).

Figura 70 – Vista 3D do hélice otimizado no OpenProp



Fonte: Autor (2018).

Figura 71 – Circulação ótima para cada seção radial do hélice



Fonte: Autor (2018).

Com uma primeira estimativa das principais características do hélice, pode-se começar o refinamento do projeto. Especificamente para a análise do propulsor, onde há melhoras que ainda podem ser propostas:

- Consideração da distribuição de *wake fraction* para cada painel radial;
- Possível consideração de ângulo de *skew* e *rake*;
- Exportação para programa de *design* com intuito de analisar o hélice em CFD, como proposto por Wan (2014);
- Análise estrutural.

#### 4.8 REFINAMENTO DO PROJETO

Esta etapa tem como objetivo melhorar o arranjo interno do barco de maneira a diminuir a resistência ao avanço total. Marin (2015) considerou que os principais fatores de influência na análise do método de Savitsky são: boca, calado (em função do deslocamento), centro de gravidade (LCG e VCG) e o ângulo de *deadrise*. Para o presente trabalho, como a boca, deslocamento e ângulo de *deadrise* já estão estabelecidos, considera-se uma variação das coordenadas do centro de gravidade para minimizar a resistência.

Os pesos de cada componente, após selecionado o sistema propulsivo por inteiro, podem ser visualizados na Tabela 23. Para a presente análise, itera-se o LCG para se obter a posição que resulte na menor resistência ao avanço. Como Orca3D® não faz separação de resistências de onda e fricção, a iteração é feita manualmente na própria interface do programa.

Tabela 23 – Lista de massas dos componentes do sistema propulsivo selecionado

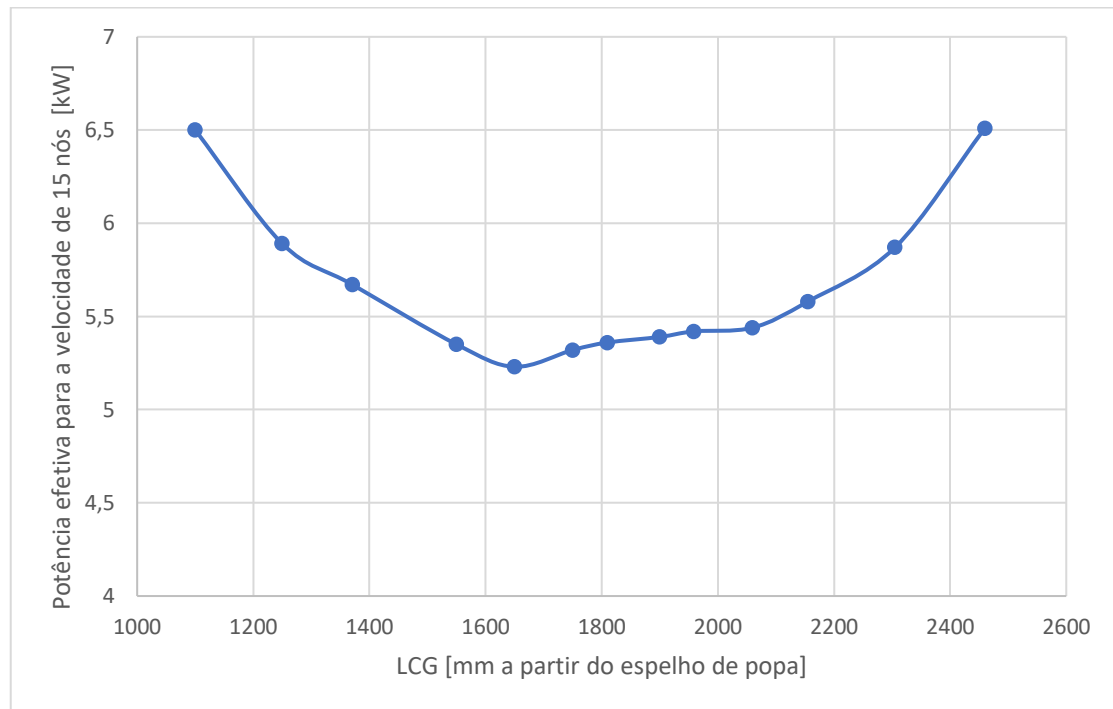
Item	Massa [kg]
Casco	145,00
Convés	35,00
Painel & Banco	20,00
Motor BLDC + Carcaça	30,00
Bateria 1 + Caixa	65,00
Tripulante	80,00
Passageiro	80,00
Bateria 2 + Caixa	65,00
Caixa de peixe	10,00
Compartimento	5,00

Total	535,00
-------	--------

Fonte: Autor (2018).

A Figura 72 mostra como a potência efetiva se comporta com a mudança do LCG, possibilitando um valor ótimo de aproximadamente 1650 mm do espelho de popa.

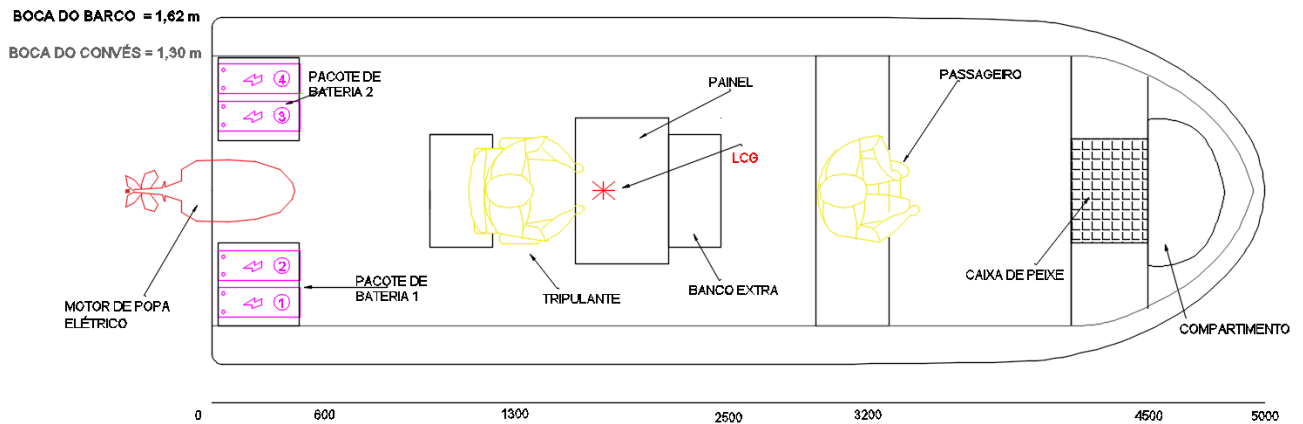
Figura 72 – Localização do LCG em relação a potência efetiva para  $V = 15$  nós



Fonte: Autor (2018).

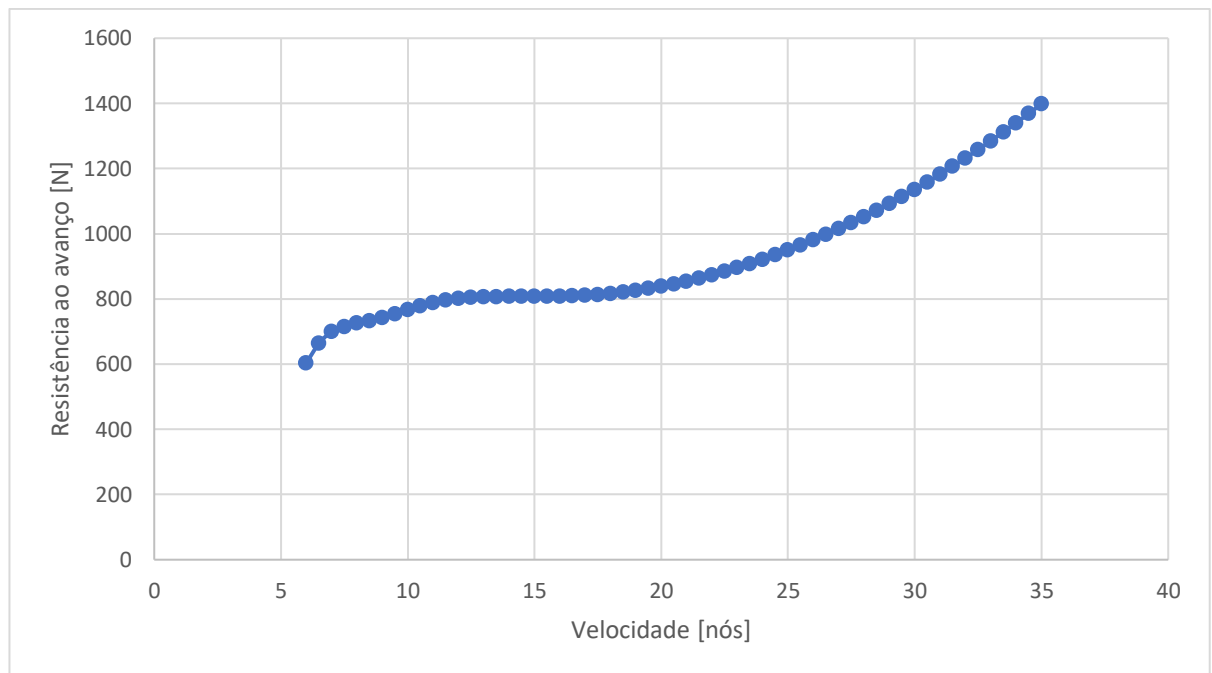
A menor potência efetiva é de 5,23 kW. Segundo própria planilha gerada pelo programa, não há problemas com *porpoising*. A configuração do arranjo final é feita de forma a respeitar o LCG estabelecido na análise. Desta maneira, os pacotes de baterias são postos mais a ré, perto do motor elétrico, o que também diminui a quantidade de fios despojados na embarcação. Por outro lado, a manutenção das baterias é dificultada, recomendando-se uma abertura do compartimento em posição diferente. A resistência pode ser observada na Figura 74.

Figura 73 – Arranjo geral da embarcação 160F



Fonte: Autor (2018).

Figura 74 – Comportamento da resistência para a nova configuração



Fonte: Autor (2018).

Como o atual sistema têm uma eficiência total de 52%:

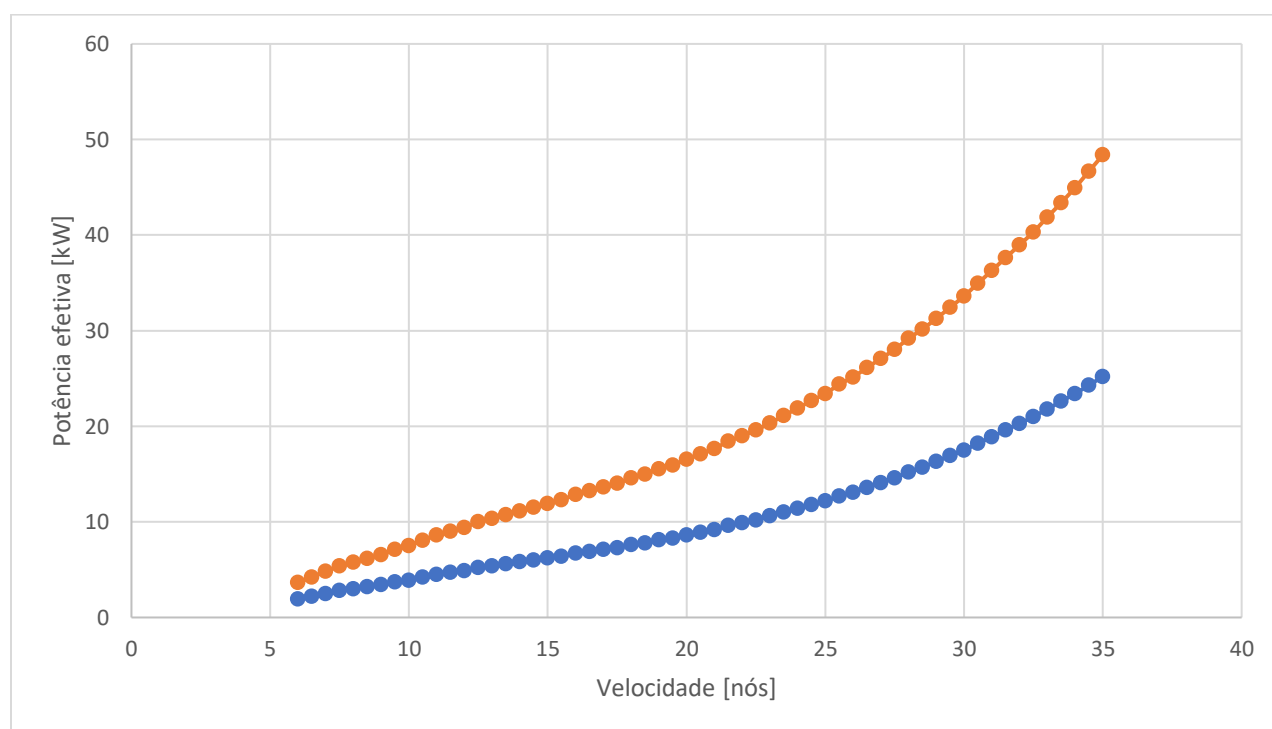
$$\eta_{total} = \eta_{motor} * \eta_{transmissão} * \eta_{hélice} = 0,92 * 0,95 * 0,595 = 0,52$$



Portanto, o sistema propulsivo suprirá a demanda energética de manter o barco em velocidades próximas de 15 nós, uma vez que consegue fornecer cerca de 6,2 kW, assumindo os 12 kW do motor.

Ao final, ainda se analisa caso o sistema propulsivo dimensionado suportaria a presença de mais um passageiro sentado no banco extra da embarcação. A configuração é dada de forma com que o LCG suba para 1,73 metro do espelho de popa e o VCG para 0,34 metro do plano de base. O gráfico da potência pode ser observado na Figura 75.

Figura 75 – Potência efetiva e fornecida com a presença de um terceiro passageiro



Fonte: Autor (2018).

Uma potência de 11,9 kW é necessária para a velocidade de 15 nós, portanto o sistema propulsivo dimensionado suprirá essa demanda com sua potência de entrada de 12 kW.

Ressalta-se, também, que um estudo de viabilidade econômica não foi efetuado, uma vez que apenas o atual conjunto de baterias o tornaria quase inviável comercialmente. No entanto, seleciona-se os componentes do sistema propulsivo entendendo a tendência do mercado, o aumento da demanda e a diminuição dos custos de aquisição do que foi selecionado.

## 4.9 CONCLUSÃO

Com as tendências de mercado apontando para a troca da matriz energética para a eletrificação, propõe-se o projeto conceitual de um sistema propulsivo elétrico para um barco de pequeno porte, voltado para a pesca em águas abrigadas.

Um estudo de mercado para analisar as principais tendências dos componentes desse tipo de sistema foi realizado. Ele incluiu uma breve análise via questionários e entrevistas da posição dos pescadores da região de Florianópolis e São Francisco do Sul frente às mudanças. Um levantamento de embarcações semelhantes e motores de popa elétricos também foi realizado.

Em paralelo, o casco foi modelado em programa de *design* e, com informações obtidas do estudo de mercado, foi possível delimitar os dados de entrada para uma análise de resistência ao avanço pelo método de Savitsky modificado. Como o casco possui um fundo quase chato, característico de navegação em águas abrigadas, as análises foram reavaliadas em planilhas alternativas para validar os resultados, uma vez que as curvas de resistência estavam fora do padrão usual.

Com os valores da potência necessária para impulsionar o barco na velocidade desejada, pôde-se dimensionar o motor, conjunto de baterias e o hélice propulsor. Ressalta-se a escolha do tipo de motor (BLDC) e a eletroquímica da bateria (lítio-íon) via método AHP, de acordo com os requisitos de projeto. O hélice foi dimensionado para essa etapa de projeto conceitual pelo programa OpenProp. A rotação ótima obtida foi de 2350 rpm, requerendo um sistema de transmissão com redução de 1:2,13.

Em seguida, o centro de gravidade longitudinal da embarcação foi iterado para obtenção da melhor posição dos pacotes de baterias, minimizando a resistência ao avanço. Com esse valor em mãos, pôde-se pôr o sistema dimensionado em xeque, analisando se ele supriria a demanda energética do arranjo ótimo e, também, caso um passageiro a mais navegasse.

Dessa maneira, na ordem dos objetivos específicos:

- O atual mercado de motores elétricos no meio náutico foi estudado, mostrando-se um cenário frutífero, porém em desenvolvimento;
- O casco da embarcação 160F foi modelado e testado na extensão Orca3D® para análise da resistência ao avanço. As curvas obtidas e o comportamento do barco

tiveram características de embarcação para navegação em águas abrigadas, como esperado.

- Um motor, conjunto de baterias e um hélice propulsor foram dimensionados e selecionados em caráter conceitual. Desta forma, recomenda-se ainda um refino de projeto para trabalhos futuros;
- A posição do banco de baterias foi otimizada, de forma a minimizar a resistência ao avanço. O sistema propulsivo supriu a demanda energética para o arranjo proposto e com um tripulante a mais.

Os próximos passos para o projeto vêm dos Níveis de Prontidão Tecnológica dos barcos elétricos de pequeno porte, mostrados na metodologia. Nesse contexto, seguem os passos futuros do projeto:

- Segunda volta completa na espiral: reanálise do conjunto de baterias e do hélice;
- Consideração dos efeitos de esteiras para cada seção radial na análise do propulsor;
- Possível análise em CFD da embarcação ou teste em escala real para revalidação dos resultados;
- Em paralelo, estudo de mercado via formulário com amostragem maior;
- Estudo de viabilidade de integração eletrônica dos componentes;
- Análise estrutural e acústica do sistema;
- *Design* de produto da carcaça do motor.

## REFERÊNCIAS

ABUD, Camila. Setor de pesca esportiva já movimenta R\$ 1 bi. **Diário Comércio Indústria & Serviços**. 01 set. 2014. Disponível em < <https://www.dci.com.br/servicos/setor-de-pesca-esportiva-ja-movimenta-r-1-bi-1.427382>>. Acesso em: 14 out. 2018.

AKATSU, K.; MIYAMASU, M. **Efficiency Comparison between Brushless DC Motor and Brushless AC Motor Considering Driving Method and Machine Design**. IEEJ, Vol. 2. No. 1 p79-86. 2012.

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.

Autoesporte. Venda de carros eletrificados bate recorde em 2017. **France Presse**. 30 mai. 2018. Disponível em < <https://g1.globo.com/carros/noticia/venda-de-carros-eletrificados-bate-recorde-no-mundo-em-2017.ghtml>>. Acesso em: 20 out. 2018.

BASNET, R. **Wireless Control Mechanism for a Trolling Motor**. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2013.

BERTRAM, V. **Practical Ship Hydrodynamics**. Butterworth-Heinemann. Grã Bretanha, 2000.

Blount D.L. and Fox, D.L., **Small-Craft Power Prediction**, SNAME Marine Technology, 1976.

BURCH, I.; GILCHRIST, J. **Survey of Global Activity to Phase Out Internal Combustion Engine Vehicles**. 2018. Disponível em: < <https://climateprotection.org/wp-content/uploads/2018/10/Survey-on-Global-Activities-to-Phase-Out-ICE-Vehicles-FINAL-Oct-3-2018.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

DERAMMELAERE, S; HAEMERS, M.; DE VIAENE, J.; VERBELEN, F.; STOCKMAN, K. **A Quantitative Comparison between BLDC, PMSM, Brushed DC and Stepping Motors Technologies**. Department of Industrial System and Product Design, Ghent University campus Kortrijk, Belgium, 2016.

EPPS, B.; KIMBALL, R. W.; STANWAY.; M. J. **OpenProp: An Open-Source Design Tool for Propellers and Turbines**. 2009. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, EUA.

Formación Para La Industria 4.0. **Motores Síncronos**. Disponível em: <<https://automatismoindustrial.com/motores/motores-sincronos/>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

FREITAS, G. V. C. **Eficiência Energética em Motor de Indução Trifásico através do Uso de Inversor de Frequência PWM**. Trabalho de Conclusão de Curso. UNIJUI, 2013.

GUESSE, L. C. **Desempenho Propulsivo de Embarcações de Pesca: Estudo Aplicado à Melhoria das Embarcações do Espírito Santo**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Engenharia Naval e Oceânica. 2016.

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, 2018.

IDTECHEX. **Electric Boats and Ships 2017-2027: a Market Report**. 2017. Disponível em: <https://www.idtechex.com/research/reports/electric-boats-and-ships-2017-2027-000509.asp?viewopt=desc>. Acesso em: 16 nov. 2018.

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.

LAMB, T. **Ship Design and Construction**. 2003. Vol. I, The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

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

LATORRE, R. **Design Study for Outboard Propeller with Spoiler**. University of New Orleans, Ocean Engineering, 1999.

MANZINI, E. J. **Entrevista Semi-Estruturada: Análise de Objetivos e de Roteiros**. Programa de Pós-Graduação em Educação, Unesp, Marília.

MARIN, G. **Estudo Paramétrico de Resistência ao Avanço: Análise Método de Savitsky**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

MARTINS, G. S. M. **Conversão do sistema de propulsão a combustão para elétrico em uma embarcação do tipo veleiro**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

MATHEOU, H. **Brushed or Brushless**. 24 jul. 2018. Disponível em: <https://www.trollingmotors.com.au/blogs/news/brushed-vs-brushless>. Acesso em: 05 nov. 2018.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion**. University of Southampton. Cambridge University Press. Cambridge, 2011.

MORISHITA, H. M.; BRINATI, L. H. **Instalações Propulsoras e Sistema Auxiliares**. Material de apoio ao curso oferecido na Universidade de Pernambuco – UPE. 2007.

NAKANISHI, H. C. **Modelo computacional para avaliação do desempenho hidrodinâmico de embarcações de planeio em águas calmas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/D.3.2016.tde-11072016-155508. Acesso em: 05 out 2018.

New Energy and Fuel. **The Best Electric Vehicle Motor**. 9 fev. 2010. Disponível em: <https://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2010/02/09/the-best-electric-vehicle-motor/>. Acesso em: 24 out. 2018.

OLIVEIRA, Maurício Aguilar Nepomuceno de. **Análise da Viabilidade de Embarcações Solares para Transporte de Passageiros**. 2013. 177 f. Dissertação de 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](http://www.oceanica.ufrj.br/intranet/teses/2013_Mestrando_Mauricio_Aguilar_Nepomuceno_de_Oliveira.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2018.

ORMEROD, J. **Permanent Magnet Material Options**. Magnet Application Inc. Disponível em: <http://www.magnetapplications.com/content/upload/files/Presentation%20-%20Magnetics%202018.pdf>.

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

RAMOS, T. M. S. **Sistema de Tracção de um VEC (Veículo Elétrico de Competição)**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2010.

RANDALL, T. **Here's How Electric Cars Will Cause the Next Oil Crisis**. 25 fev. 2016. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/features/2016-ev-oil-crisis/>. Acesso em: 17 nov. 2018.

RIBEIRO, H. J. C. **Equilíbrio Dinâmico de Cascos Planadores**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

SAATY, T.L. **Método de Análise Hierárquica**. Tradução e Revisão por Wainer da Silveira e Silva. São Paulo. Ed. McGraw-Hill 1991a.

SANTOS, O. W. P. **Comparação entre Motor de Indução e Motor de Imãs Permanentes**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

SAVITSKY, D. **Hydrodynamic Design of Planing Hulls**. Marine Technology, Vol. 1, No 1. New Jersey, 1964.

TORQEEDO. **Electric Boating 2018**. Torqueedo Brochure, 2018. Disponível em: <https://media.torqueedo.com/catalogs/torqueedo-catalog-2018-en.pdf>. Acesso em: 23 out. 2018.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de Máquinas Marítimas**. ENIDH, 2012.

TVEITDAL, T. **Market Barriers Towards Electric Boats**. Noruega, Oslo, 2017. Disponível em: [https://www.ntnu.edu/documents/139799/1279149990/33+Article+Final\\_trulstv\\_fors%C3%B8k\\_2017-12-07-17-25-18\\_TPD4505+Truls+Tveitdal.pdf/4523bd20-1024-4179-8dde-878d847a7e29](https://www.ntnu.edu/documents/139799/1279149990/33+Article+Final_trulstv_fors%C3%B8k_2017-12-07-17-25-18_TPD4505+Truls+Tveitdal.pdf/4523bd20-1024-4179-8dde-878d847a7e29)>. Acesso em: 13 set. 2018.

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

WAN, X. **Propeller Design, Modeling and Performance Simulation for an Electric Outboard**. 2014. Dissertação de Mestrado - The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China.

WOODFORD, C. **Outboard Motors**. 9 fev. 2018. Disponível em: <  
<https://www.explainthatstuff.com/outboardmotors.html>>. Acesso em: 01 nov. 2018.