

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

DIEFERSON FLORI MASSAROTTO

FERRAMENTA PARA SELEÇÃO DO SISTEMA PROPULSIVO DE UM SUBMARINO
CONVENCIONAL

Joinville
2019

DIEFERSON FLORI MASSAROTTO

FERRAMENTA PARA SELEÇÃO DO SISTEMA PROPULSIVO DE UM SUBMARINO
CONVENCIONAL

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

Orientador: Prof. Dr.Thiago Pontin Tancredi

Joinville
2019

RESUMO

O correto dimensionamento do sistema propulsivo de um submarino é um procedimento que envolve diversas variáveis interdependentes e, portanto, um processo complexo e custoso. Sendo o hélice o propulsor mais utilizado em submarinos, seu correto dimensionamento é vital para a eficiência do projeto final. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilia nos passos do projeto do sistema propulsivo de um submarino convencional, listando as principais variáveis e técnicas utilizadas nesse processo. O desenvolvimento tomará como base muitos dos conceitos apresentados e discutidos por Pereira(2016) onde o autor propõe um modelo de síntese que permite estimar, a partir das dimensões principais da embarcação e da velocidade requerida, as características do sistema, tais como resistência ao avanço, dimensões do hélice, número de células de baterias, arranjo do sistema propulsivo e a motorização. A ferramenta utiliza uma série de algoritmos baseados no projeto de propulsores da Série de Wageningen, também chamada de Série B. Tais algoritmos foram desenvolvidos fazendo se uso da linguagem Delphi, na qual foi implementada uma interface gráfica que aproxima o usuário da ferramenta. Usando técnicas de otimização, a ferramenta é capaz de determinar, para uma certa condição de velocidade de operação, as características de um hélice da Série B que atendam o critério de cavitação e forneçam maior eficiência. A ferramenta também permite estimar a potência necessária para o movimento da embarcação, além de incluir um catálogo de geradores diesel, baterias e motores elétricos para a seleção da planta elétrica do projeto. Ao longo do texto, são discutidas, dentro do possível, verificações do código desenvolvido. Como resultado final, apresenta-se uma ferramenta inicial, que no futuro poderá receber módulos numéricos para a estimativa de resistência ao avanço, projeto estrutural, cálculo de ruído da embarcação, bem como características do escoamento no propulsor.

Palavras-chave: Submarino. Série de Wageningen. Ferramenta Computacional. Instalação propulsora.

ABSTRACT

The correct sizing of a submarine's propulsive system is a procedure involving several interdependent variables and, therefore, it's a complex and costly process. Being the helix the most used propeller in submarines, its correct sizing is vital for the efficiency of the final project. In this context, this work presents the development of a computational tool that assists in the design steps of the propulsive system of a conventional submarine, listing the main variables and techniques used in this process. The development will take as base many of the concepts presented and discussed by Pereira (2016) where the author proposes a synthesis model that allows to estimate, from the main dimensions of the boat and the speed required, the characteristics of the system, such as power resistance, propeller dimensions, number of battery cells, propulsive system arrangement and motorization. The tool uses a series of algorithms based on the design of propellers of the Wageningen Series, also called Series B. These algorithms were developed using the Delphi language, in which a graphical interface was implemented that approximates the user of the tool. Using optimization techniques, the tool is able to determine, for a certain operating speed condition, the characteristics of a B-series propeller that meets the cavitation criterion and provides greater efficiency. The tool also allows estimating the power required for the movement of the vessel, in addition to including a catalog of diesel generators, batteries and electric motors for the selection of the electric plant of the project. Throughout the text, are discussed, to the possible, verifications of the developed code. As a final result, an initial tool is presented, which in the future may receive numerical modules for the estimation of drag resistance, structural design, vessel noise calculation, as well as propellant flow characteristics.

Keywords: Submarine. Wageningen Series. Computational tool. Propulsion system.

AGRADECIMENTOS

À minha amada mãe Elci Bohnen, por todo o suporte, amor e dedicação. Pela comida tão boa que sempre fez, pelos bolos, pelas fofuras de mãe e pelos conselhos de vida. Por possuir em teu abraço a fórmula para minimizar todos os problemas existentes no mundo.

Ao meu amado pai Valdir Massarotto, pelos conselhos de vida, pela visão romântica do mundo, por ser quem sempre me apoiou e forjou este homem.

À minha amada irmã Dienifer Suzana Massarotto, pelo apoio emocional, pelo seu exemplo de mulher e por ter paciência comigo (não deve ser nada fácil).

À minha avó Elvida Engler, pelo seu amor e pela dedicação aos netos.

À meu orientador e amigo para a vida Thiago Tancredi Pontin, por seu tempo e apoio na confecção do presente trabalho.

Ao Classe A, onde a beleza do ser emana inteligência e doçura, leveza e ternura, na forma humana, entre os seres Valéria, Fernanda, Eduardo, Criliane, Elisa e Isabela.

À minha segunda família, o clube de xadrez de Chapecó, pela cultura, pelo abrigo mental e por toda a diversão.

Ao técnico Marco Barbosa, pelo treinamento intelectual e humano desenvolvido ao longo de minha vida.

À minha amada madrinha Augusta Bresolin, por todo o suporte, amor e exemplo de mulher.

Ao meu amado padrinho Nilton Góes, segundo pai. Pelos conselhos de vida, por todo o carinho, pela paciência, pelas cantorias e por me ensinar que a beleza da vida está estampada no sorriso de uma mulher.

Aos seres humanos que compartilharam moradia comigo durante a faculdade. Em especial, ao irmão que a faculdade me deu, Eduardo Rosa Viana.

Aos amigos neixos, erick, chapecó e corpinho, pelos trabalhos realizados e pelas festas que fizemos e faremos.

À todas as minhas futuras ex-namoradas, por que a vida ferve mais com vocês aqui.

À poesia vivida e à que ainda viverei.

E por último, mas de total relevância, à toda família Massarotto. Por toda a honra e todo o exemplo repassado. Este trabalho é pra vocês.

Engenharia Naval: Arte ou
Ciência?

Massarotto (2019)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O submersível de Van Drebbel (modelo 3D e réplica) - 1624.	17
Figura 2 – O Turtle de Bushnell - 1776	18
Figura 3 – O Nautilus de Fulton - 1800	18
Figura 4 – O Plongeur- 1863	19
Figura 5 – O Hunley- 1864	20
Figura 6 – O Holland- 1901	21
Figura 7 – O Narval- 1899	22
Figura 8 – Submarino de Esquadra	22
Figura 9 – O U-Boat Type XXI – 1943	23
Figura 10 – Cronologia de variação das formas e dimensões dos submarinos . .	24
Figura 11 – Fluxograma do projeto de um submarino convencional	25
Figura 12 – Geometria do casco externo	26
Figura 13 – Geometria do casco resistente	28
Figura 14 – Geometria do casco resistente	28
Figura 15 – Submarino submerso estável	30
Figura 16 – Submarino submerso instável	31
Figura 17 – Estabilidade do submarino sentado no fundo do oceano	31
Figura 18 – Estabilidade do submarino na superfície	32
Figura 19 – Vista isométrica da vela	34
Figura 20 – Propulsores contra-rotativos de um torpedo	36
Figura 21 – Passo hélice.	38
Figura 22 – Propulsor 7 pás de um submarino.	39
Figura 23 – Diagrama de águas abertas	40
Figura 24 – Diagrama de Burril	43
Figura 25 – Representação do escoamento ao longo do casco.	44
Figura 26 – Curvas de relação para o coeficiente de esteira.	45
Figura 27 – Curvas de relação para o coeficiente de redução da força propulsora. 45	
Figura 28 – Ilustração sobre a otimização de problemas com restrição	47
Figura 29 – Fonte: teleco (2019)- Adaptado.	48
Figura 30 – Tabela de dimensões de células levantada por Norman E. Bagshaw	49
Figura 31 – Tabela de desempenho típico de uma bateria	49
Figura 32 – Sistema de dutos de ventilação e conectores das células de bateria	51
Figura 33 – Arranjo das baterias	51

Figura 34 – Metodologia aplicada neste trabalho	54
Figura 35 – Fluxograma do projeto do sistema propulsivo de um submarino . . .	58
Figura 36 – Aba - Dimensões principais	59
Figura 37 – Submarino em perspectiva	60
Figura 38 – Aba - Dimensões da vela	60
Figura 39 – Planificação da embarcação a partir da matriz de pontos- Eixo [x,y]	61
Figura 40 – Planificação da embarcação a partir da matriz de pontos - Eixo [x,z]	61
Figura 41 – Planificação da embarcação a partir da matriz de pontos - Eixo [y,z]	61
Figura 42 – Resistência ao avanço	62
Figura 43 – Diagrama de Águas Livres - Diagrama de Burril	63
Figura 44 – Tela de arranjo da ferramenta	65
Figura 45 – Arranjo janela 3D	66
Figura 46 – Geometria do casco resistente	67
Figura 47 – Curva da linha do casco geradas no software	68
Figura 48 – Verificação do hélice	69
Figura 49 – Composição da resistência da embarcação	77
Figura 50 – Capacidade de uma bateria qualquer	80
Figura 51 – Meia reação de descarga de uma bateria chumbo ácida	81
Figura 52 – Representação de uma bateria chumbo ácida cortada	82
Figura 53 – Ação do hélice	84
Figura 54 – Diferença de pressão e de velocidade do escoamento sobre a asa .	85
Figura 55 – Linhas de referência.	86
Figura 56 – Submarino com 9 geradores a bordo	89
Figura 57 – Submarino com 2 geradores a bordo	90
Figura 58 – Arranjo de 3 geradores	91
Figura 59 – Projeto de melhoria gráfica dos mísseis	92
Figura 60 – Relação Viscosidade cinemática e Temperatura	93
Figura 61 – Compensação para corpo de revolução	94
Figura 62 – Coeficientes dos polinômios da série de Wageningen	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis e parâmetros de entrada para geometria do casco	27
Tabela 2 – Dados do modelo	30
Tabela 3 – Limites da Série de Wageningen	41
Tabela 4 – Dados do modelo	58
Tabela 5 – Eficiências e autonomia	63
Tabela 6 – Comparação da altura das balizas geradas na ferramenta com a literatura (a vante e a ré)	67
Tabela 7 – Valores intermediários do cálculo da força propulsiva	69
Tabela 8 – Características dos exemplos modelados	70
Tabela 9 – Dados simulados retirados do software	70
Tabela 10 – Variação do número de células de bateria para velocidade de patrulha em diferentes autonomias	71
Tabela 11 – Conjunto de Geradores Diesel Caterpillar	83
Tabela 12 – Conjunto de Geradores Diesel Wartsila	83
Tabela 13 – Motor Elétrico Principal	87

LISTA DE SIGLAS

η_h	eficiência do propulsor
ν	viscosidade cinemática
ρ	densidade de água
A_E	área expandida do hélice
A_p	área projetada do hélice
C_{wsa}	coeficiente prismático de área a ré
C_{wsf}	coeficiente prismático de área a vante
g	aceleração gravitacional
I_{cel}	corrente gerada por célula de bateria
k_{21}	diferença entre diâmetro externo e D^*
k_{22}	diferença entre D externo e o diâmetro externo
L_a	comprimento do casco hidrodinâmico a ré
L_{cil}	comprimento assumido do trecho cilíndrico do casco resistente
L_{cra}	comprimento do casco resistente a ré
L_{crf}	comprimento do casco resistente a vante
L_f	comprimento do casco hidrodinâmico a vante
L_{pmb}	comprimento do corpo médio paralelo do casco
n_a	fator de forma AR
n_f	fator de forma AV
Pot_{cel}	potência gerada por célula de bateria
V_{cel}	tensão gerada por célula de bateria
y_a	altura da meia baliza da seção de ré

y_f	altura da meia baliza da seção de vante
y_{pmb}	altura da meia baliza do corpo médio paralelo
D	diâmetro do submarino
K2	fator de área molhada
L	comprimento do submarino
LCG	Distância do centro de gravidade ao longo da longitudinal
Lpmb	Coprimento do corpo médio paralelo
MEP	motor elétrico principal
n	rotação do propulsor
P/D	passo sobre diâmetro
Q	torque
SSK	classe de submarino projetado para batalha anti-submarina
T	empuxo

SUMÁRIO

	LISTA DE TABELAS	
	Lista de Tabelas	
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.1.1	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	SUBMARINOS: CONTEXTO HISTÓRICO	16
2.1.1	OS PROJETOS PRECURSORES DOS SUBMARINOS MODERNOS	20
2.2	A ABORDAGEM DE PROJETO DE SUBMARINOS CONVENCIONAIS	23
2.3	Geometria do casco	26
2.4	Estabilidade	29
2.5	RESISTÊNCIA AO AVANÇO	33
2.6	Propulsor	35
2.6.1	HÉLICE	37
2.6.1.1	DIAGRAMA DE ÁGUAS LIVRES	39
2.6.1.2	SÉRIES SISTEMÁTICAS	40
2.6.1.3	SÉRIE DE WAGENINGEN	41
2.6.1.4	CRITÉRIO DE CAVITAÇÃO	42
2.6.2	INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE	44
2.7	OTIMIZAÇÃO	46
2.8	BATERIAS	47
2.8.1	BATERIAS - CHUMBO ÁCIDA	50
2.8.2	ARRANJO DO SISTEMA ELÉTRICO	50
2.9	GERADOR DIESEL	52
2.10	MOTOR ELÉTRICO	52
2.11	TRABALHOS RELEVANTES	53
3	METODOLOGIA	54
4	DESENVOLVIMENTO	57
4.1	Geometria do casco	57
4.2	RESISTÊNCIA AO AVANÇO	62
4.3	DIAGRAMA de ÁGUAS LIVRES e CURVAS DE BURRIL	62
4.4	SISTEMA ELÉTRICO	63

4.5	ARRANJO	65
4.6	VERIFICAÇÃO DA FERRAMENTA	66
4.6.1	Geometria do casco	66
4.6.2	Resistência	69
4.6.3	Seleção do propulsor	69
4.6.4	Exemplos de aplicação da ferramenta desenvolvida	70
5	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICES	76
A	PARCELAS DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO	77
B	FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS	79
C	BATERIA CHUMBO ÁCIDA	81
D	GERADORES	83
E	FUNCIONAMENTO DO HÉLICE	84
F	CARACTERÍSTICAS DO HÉLICE	86
G	MOTORES ELÉTRICOS	87
H	MODELOS DO CASCO GERADOS PELO SOFTWARE	88
I	TRABALHOS FUTUROS FUTURAS	92
ANEXOS	92
A	TABELA DE VISCOSIDADE CINEMÁTICA	93
B	COEFICIENTES DE FORMA	94
C	COEFICIENTES SÉRIE B	95

1 INTRODUÇÃO

No último século, os conceitos e métodos empregados nas operações navais tem evoluído vertiginosamente. O constante avanço da informática tornou possível desenvolver ferramentas computacionais que, visando o auxílio de projetos, tem se tornado um mecanismo de suma importância na hora do planejamento. Tais tecnologias influenciam a formulação das táticas e estratégias do Poder Naval, tanto em tempos de guerra quanto em cenários de paz.

A Estratégia Nacional de Defesa do Brasil (BRASIL, 2008) prioriza como tarefa estratégica a negação do uso do mar¹. Nesse contexto, o documento é direto em respeito à importância de submarinos para assegurar a conquista dos objetivos traçados:

Para assegurar o objetivo de negação do uso mar, o Brasil contará com uma força naval submarina de envergadura, composta de submarinos convencionais e de submarinos de propulsão nuclear. Brasil manterá e desenvolverá sua capacidade de projetar e de fabricar tanto submarinos de propulsão convencional como de propulsão nuclear.

Dentre os empreendimentos de engenharia, o projeto de submarinos posiciona-se entre os mais desafiadores em termos de complexibilidade.

Um submarino é por definição, uma embarcação projetada para operar na maior parte do tempo em ambiente submerso. Para que seja possível operar nessas condições, ele possui um banco de baterias que armazena a energia que será utilizada quando submerso.

O projeto de propulsão de um submarino é incumbido de prover a força propulsiva destinada a fazer com que a velocidade de operação pretendida seja alcançada (TONACIO, 2014). Assim sendo, seu correto planejamento e dimensionamento é crucial para que a planta propulsora seja capaz de entregar a força com a uma maior eficiência e o menor nível de ruído possível.

Inicialmente a pesquisa desenvolvida está focada em submarinos com propulsão convencional, ou seja, do tipo diesel elétrica. No entanto, nada impede que no futuro, novos módulos sejam desenvolvidos visando o projeto de embarcações com propulsão do tipo nuclear.

O tipo de propulsor escolhido para este trabalho foi o hélice², por ser um

¹ Normalmente, distinguem-se em três as tarefas estratégicas do Poder Naval de uma nação: a negação do uso do mar, o controle de área marítima e a projeção de poder.

² Em Engenharia Naval, o termo hélice é tradicionalmente usado no gênero masculino, por referir-se "ao propulsor do tipo hélice".

sistema amplamente usado em embarcações submarinas. O dimensionamento desse sistema não é tarefa simples, uma vez que deve atender a requisitos de projeto tais como: eficiência, desempenho e critério de cavitação.

Atualmente, o método mais empregado no projeto de propulsores é o das séries sistemáticas, que consiste em obter parâmetros geométricos que descrevem o propulsor e, a partir de diagramas adimensionais obtidos por ensaio experimental, determinar seu desempenho (JACKSON, 1992). Tal método é eficiente, mas não garante a melhor escolha, pois depende da experiência de projetistas e engenheiros para que possam ser determinados os parâmetros que representam a solução com melhor desempenho para um determinado submarino, a uma dada velocidade de serviço.

Os autores, a partir de experiência acadêmica e de pesquisa, consideram que os programas existentes no mercado, além de custosos, possuem uma interface gráfica de difícil utilização, ou não são de fácil integração com outras ferramentas utilizadas no projeto naval. Com o intuito de diminuir esses problemas, acredita-se que a utilização da plataforma Delphi, uma linguagem orientada a objeto que possui uma interface gráfica já embutida, auxiliará na relação do usuário com o projeto.

Outro problema comum é que sistemas complexos, tais como os submarinos, requerem diferentes ferramentas de análise. A não existência de ferramentas que permitam as diferentes análises necessárias, dificulta a integração e a automatização do projeto. Neste contexto, este trabalho apresenta uma ferramenta que integra e automatiza as diferentes etapas do projeto do sistema propulsivo de um submarino convencional, incluindo o arranjo interno do sistema no interior do casco.

1.1 Objetivo Geral

Baseado nos aspectos apresentados na introdução, esse trabalho objetiva desenvolver uma ferramenta computacional para auxiliar no projeto do sistema propulsivo de um submarino convencional.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Implementar uma interface gráfica para inserção das dimensões principais e outras características requeridas para o projeto da embarcação;
- Desenvolver uma rotina de programação Delphi para estimar a resistência ao avanço da embarcação para diferentes velocidades;
- Elaborar um processo automatizado de seleção do propulsor da Série B objetivando o aprimoramento da eficiência e minimização da cavitação;
- Elaborar um algoritmo para o dimensionamento da planta elétrica;

- Elaborar uma rotina em Delphi para o arranjo interno dos componentes do sistema no interior do casco;
- Dividir a ferramenta desenvolvida para que os atuais módulos empíricos sejam facilmente substituíveis por modelos numéricos baseados em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais fundamentos nos quais se baseiam o desenvolvimento realizado. É importante destacar que tal desenvolvimento tomará como base muitos dos conceitos propostos por (PEREIRA, 2016), onde o autor apresenta um modelo de síntese e otimização para o projeto de um submarino convencional.

2.1 SUBMARINOS: CONTEXTO HISTÓRICO

Nesta secção é apresentado um breve histórico sobre o uso de submarinos no passado, além de apresentar as principais características do sistema propulsivo de um submarino convencional atual.

Embora o conceito de submarinos seja algo recente (século XIX), existem relatos datados antes do século IV a.C., mencionando o uso de mecanismos para auxiliar o homem a alcançar altas profundidades abaixo d'água. Aristóteles comenta, em sua obra Partes dos Animais (século IV a.C.), o uso de aparelhos que auxiliem a respiração de mergulhadores. Segundo o autor, estes aparelhos utilizam o mesmo princípio da tromba do elefante, estendendo o nariz do mergulhador até a superfície para sorver o ar.

O historiador grego Tucídides (século V a.C) relata no clássico História da Guerra do Peloponeso, dividida em 8 livros, o uso de mergulhadores por Espartanos e Atenienses, como auxílio na guerra que se discorria pela costa. Contudo, foram necessários quase dois mil anos para que as primeiras embarcações submersíveis fossem construídas e empregadas com fins bélicos.

Segundo Pereira (2016), a construção do primeiro submersível¹ tripulado foi fruto do trabalho do físico Holandês Van Drebbel², entre os anos de 1620 e 1624, que o fez como um presente para o então rei da Inglaterra Jaime I. Envolveu firmemente uma embarcação movida a remo em couro a prova d'água, com tubos ligados a flutuadores para sorver o ar. Seu modelo era capaz de transportar até 16 passageiros, com a capacidade de empreender travessias submersas de até 3 horas, a 5 metros de

¹ No presente trabalho, o vocábulo submersível será empregado para denominar embarcações (de propósito militar ou civil) aptos à submersão e de projeto anterior à primeira embarcação projetada para alto desempenho em condição submersa, o *Type XXI* alemão.

² Cornelis Drebbel teve seu trabalho grandemente influenciado pelas ideias do matemático inglês William Bourne, que em 1758, publicou a descrição de um veículo submersível em seu livro *Inventions or Devises*.

profundidade, conforme foi demonstrado em sua primeira viagem na Tamisa (Figura 1).

Figura 1 – O submersível de Van Drebbel (modelo 3D e réplica) - 1624.



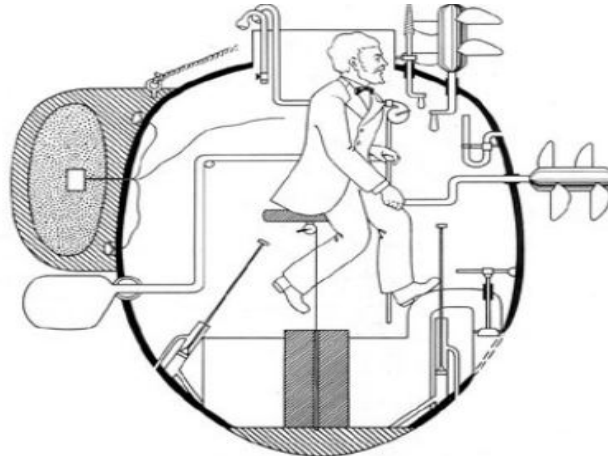
Fonte: Pereira (2016)

Em 1776 o americano David Bushnell projetou o *Turtle*, que é conhecido como o primeiro submersível empregado em operações militares que se tem registro. Esse submersível foi projetado afim de permitir que cargas explosivas fossem implantadas, discretamente, sob o casco de embarcações ancoradas. Tal embarcação possuía hélices em parafuso que eram operadas manualmente, além de ser monotripulado (Figura 2).

Durante a Guerra de Independência Americana, o General Washington deu ordens para que o Sargento Ezra Lee, à bordo do *Turtle*, empreendesse um ataque contra o navio que liderava a frota de navios da marinha inglesa, o *HMS Eagle* (1774), que estava ancorado no que é chamada hoje de Ilha da Liberdade. Às 23 horas do dia 6 de Setembro de 1776, Lee subiu à bordo do *Turtle* e pedalou por duas horas em direção ao *HMS*. Na madrugada do dia 7 de Setembro Lee implantou explosivos no casco do *HMS*, mas não obteve êxito, provavelmente devido à placa de metal colocada para proteger o casco e o leme. Quando ia realizar o segundo ataque, Lee não conseguiu manter a embarcação submersa, e após emergir, foi capturado pela marinha inglesa.

Entre os anos de 1793 e 1797, Robert Fulton, um inventor americano radicado na França, projetou, construiu e realizou testes bem sucedidos de um submersível que recebeu o nome de *Nautilus*. O governo da embarcação, quando submersa, era feito com o uso de estabilizadores muito semelhantes aos planadores utilizados nas embarcações modernas. A embarcação possuía 6,5 metros de comprimento, estrutura de ferro coberta de cobre. Era propelido por um hélice em parafuso e contava com uma vela retrátil para auxiliar a operar quando na superfície (Figura 3). Com uma capacidade

Figura 2 – O Turtle de Bushnell - 1776



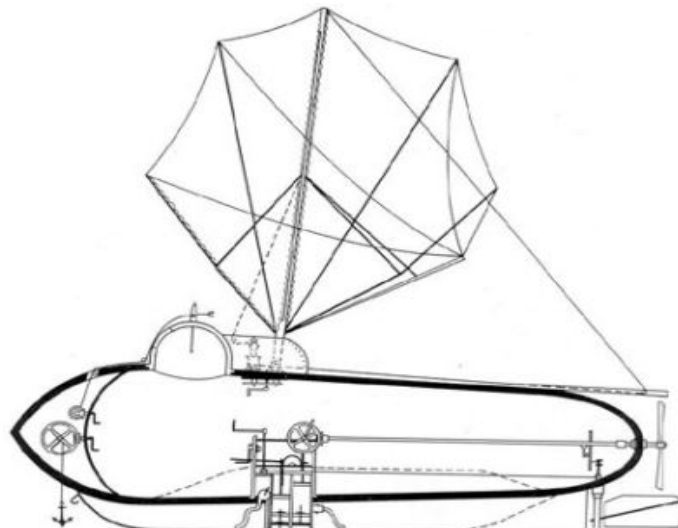
Fonte: Pereira (2016)

de 3 tripulantes, a embarcação tinha uma autonomia de até 4 horas e meia submersa.

Esse projeto de ataque criou a palavra torpedo no dicionário, pois seu modo de ataque consistia em transportar uma mina de contato e lançar próximo dos alvos. Financiado inicialmente por Napoleão e embora os testes tenham ocorrido bem, a Marinha Francesa cortou os investimentos e o projeto foi encerrado em 1804.

No ano seguinte o inventor tentou vender a embarcação aos britânicos, onde afundou um veleiro de 3 toneladas, mas também foi recusado. O motivo alegado em ambos os casos era a incapacidade da embarcação acompanhar a velocidade das esquadras navais.

Figura 3 – O Nautilus de Fulton - 1800



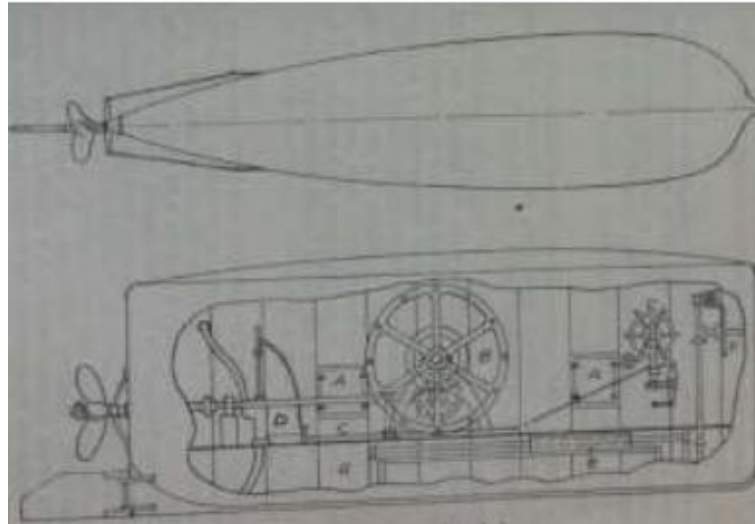
Fonte: Pereira (2016)

Entre os anos 1859 e 1863, foi construído o primeiro submersível com sistema propulsivo mecânico³. Essa embarcação foi batizada de *Plongeur* (Figura 4) e foi

³ Ao invés de manual.

projetada pelos franceses Siméon Bourgeois (oficial de marinha) e Charles Brun (engenheiro). Possuía 463 toneladas de deslocamento e um motor de ar comprimido que era alimentado com 23 tanques de armazenamento à bordo que lhe forneciam 5 milhas náuticas⁴ de autonomia submerso, à uma velocidade de 4 nós⁵ (kt).

Figura 4 – O Plongeur- 1863



Fonte:(GUERRA, 1964)

Em 1864, durante a Guerra Civil Americana, um submersível Confederado chamado *Hunley*, fez história ao afundar uma corveta da união, a *Housatonic*. Este evento ficou conhecido como o primeiro registro histórico de um ataque submarino que tenha sido eficaz. O *Hunley*, que levava o nome de seu idealizador, o engenheiro naval americano Horace Lawson Hunley, tinha aproximadamente 12 metros e era operado por uma tripulação de 9 membros, sendo 8 para operar as manivelas e um para o governo da embarcação.

O método de ataque deste submarino consistia em uma carga explosiva que era anexada ao próprio submersível por meio de uma vara de madeira(Figura 5) . A carga era acionada por meio de um arriscado procedimento de abalroamento proposital, colocando a em contato com o alvo⁶.

Em 1940 foram construídos na Inglaterra os submarinos da classe NRP Netuno, que teve como unidade final o NRP Narval. Essa classe de submarino já possuía características encontradas nos modelos atuais, como duplo casco e duplo sistema de

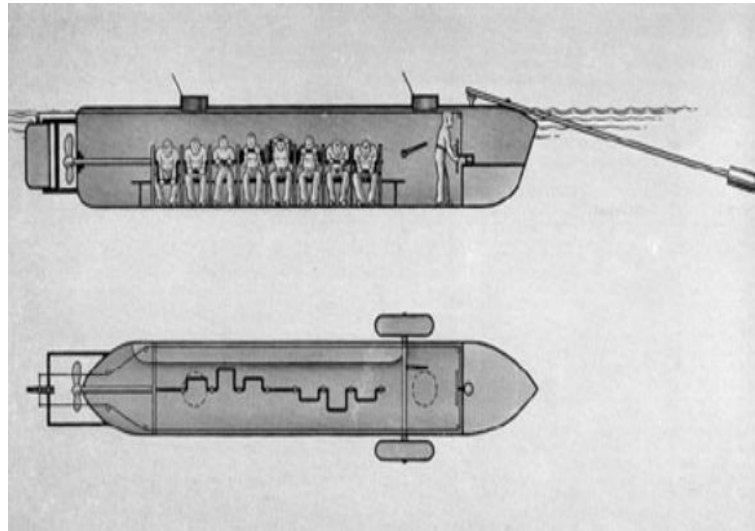
⁴ Aproximadamente 9,2 km.

⁵ Aproximadamente 7,4 km/h.

⁶ O relato de trabalho do *Hunley* é trágico. O submersível naufragou por duas vezes durante exercícios, levando à óbito cinco tripulantes na primeira vez e nove na segunda (inclusive Horace Hunley).

O submersível foi restaurado nas duas ocasiões e recolocado em serviço novamente. Por fim, logo após o assalto à *Housatonic*, o submersível acabou naufragando definitivamente. O *Hunley* só foi encontrado em 1995 e reparado em 2000. Estudos apontaram que muito provavelmente o *Hunley* tenha sido vitimado por sua própria carga explosiva.

Figura 5 – O Hunley- 1864



Fonte:(GUERRA, 1964)

propulsão diese-elétrico.

2.1.1 OS PROJETOS PRECURSORES DOS SUBMARINOS MODERNOS

Ao final do século XIX, algumas tecnologias haviam evoluído consideravelmente, permitindo assim o desenvolvimento dos primeiros submersíveis modernos. Dentre tais modernizações, vangloriam-se:

- O advento de sistemas propulsivos capazes de queimar combustíveis para produzir a potência requerida, tais como motores de combustão interna e instalações à vapor;
- A elaboração de torpedos autopropelidos;
- Criação de baterias chumbo-ácido para o armazenamento de energia.

Dois projetos de submarinos podem ser considerados como precursores dos submarinos modernos, o *USS Holland* (Figura 6), de John Holland e o *Narval* (Figura 7) do francês Laubeuf (BURCHER et al., 1994),.

Apesar das ideias de Laubeuf influenciarem hegemonicamente o projeto de submersíveis militares por décadas, a embarcação projetada por Holland⁷, foi adotada pela Marinha Real Britânica (FRIEDMAN, 1995). Holland teve a competência de antecipar, em seu projeto, diversos dos atributos presentes nos submarinos modernos:

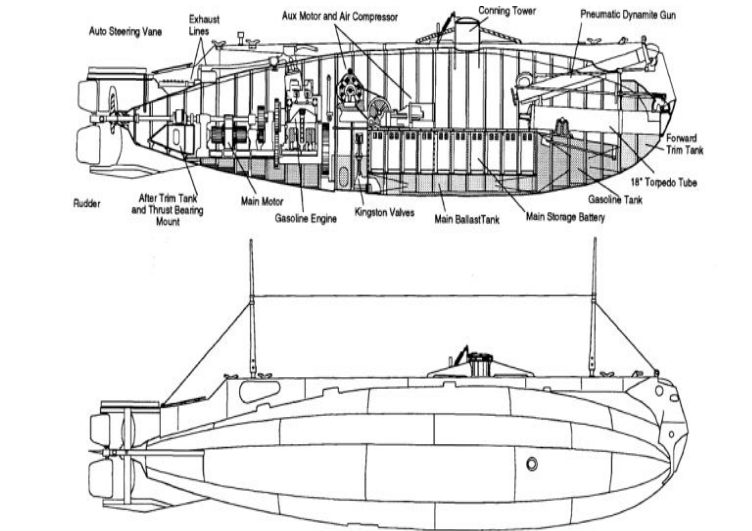
- Forma circular de simetria axial;
- Superestrutura reduzida;
- Baixa razão comprimento/diâmetro;

⁷ John Phillip Holland, de origem Irlandesa, teve muito mérito sendo um dos pioneiros na indústria submarina, dedicando 25 anos de sua vida ao estudo e desenvolvimento de submarinos. Mais detalhes está disponível em http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_19/holland.htm.

- Presença de um único hélice com um único eixo.

Inicialmente, os submarinos da classe Holland tinham sérios problemas de confiabilidade e em 1903 em uma tentativa de navegar pela superfície da Ilha de Wight⁸, resultou na quebra de quatro dessas embarcações antes mesmo de completarem os 6,4 quilômetros do trajeto.

Figura 6 – O Holland- 1901



Fonte:(GUERRA, 1964)

O projeto de Laubef, por outro lado, consistia em uma embarcação de duplo casco, que em essência, tratava-se de um torpedeiro de superfície com a capacidade de submergir para mascarar sua posição durante a evasão e/ou ataques. Posteriormente, alemães e italianos adotaram essa solução técnica em suas embarcações (GUERRA, 1964), a qual passou a ser o padrão adotado a partir da metade do século XX (BURCHER et al., 1994).

Durante a primeira grande guerra, devido à limitação da autonomia existente nos submarinos, foram utilizados apenas modelos de submersíveis para o combate (BOGOSIAN, 2005).

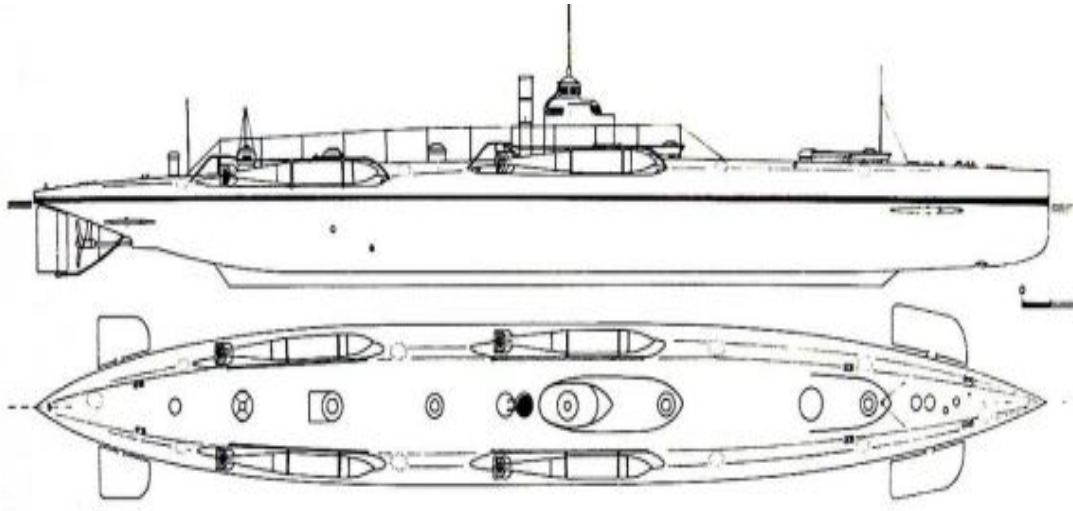
Contudo, devido ao fato do desenvolvimento de submersíveis militares durante o período entre as duas guerras ter prosseguido aceleradamente, pode se utilizar grandes submarinos no período da segunda guerra mundial que realizaram diversos ataques a frota marítima.

Nesse período, os EUA lançaram os submarinos de esquadra (Figura 8), que possuíam um sistema propulsivo mais eficiente, permitindo os primeiros combates submarinos. Foi nessa época que surgiram os primeiros sonares, conhecido como ASDIC⁹, sendo esses considerados de suma importância no combate de submarinos

⁸ Ilha localizada na Inglaterra.

⁹ Segundo o dicionário Oxford, o acrônimo surgiu a partir da expressão “Allied Submarine Detection

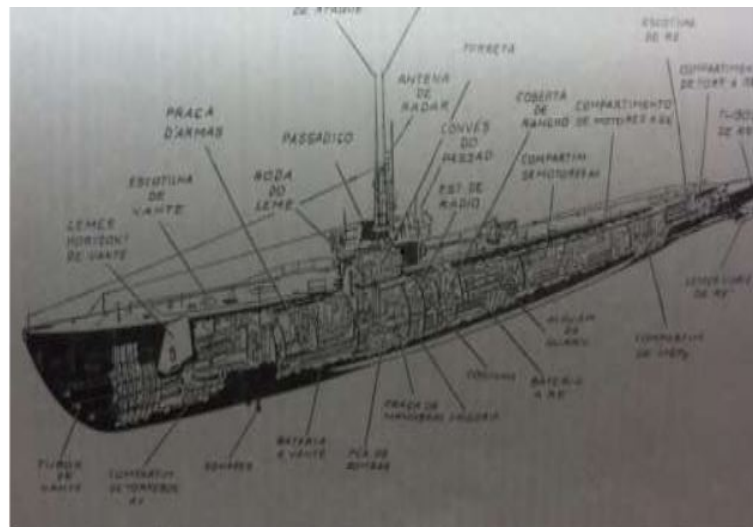
Figura 7 – O Narval- 1899



Fonte: (LAKOWSKI, 1987).

inimigos.

Figura 8 – Submarino de Esquadra



Fonte: (GUERRA, 1964)

Durante a segunda guerra, até o período de 1943, a Alemanha manteve sua estratégia baseada em submersíveis. Foi neste ano que desenvolveu o esnórquel como uma tentativa de recuperar a iniciativa dos ataques. Naquele momento, a frota alemã havia sido reduzida consideravelmente devido à constantes patrulhas aéreas e marítimas, além do desenvolvimento de melhores radares e sonares.

Com o esnórquel a embarcação poderia recarregar as baterias estando submerso, através de uma ligação com a superfície à uma determinada cota de

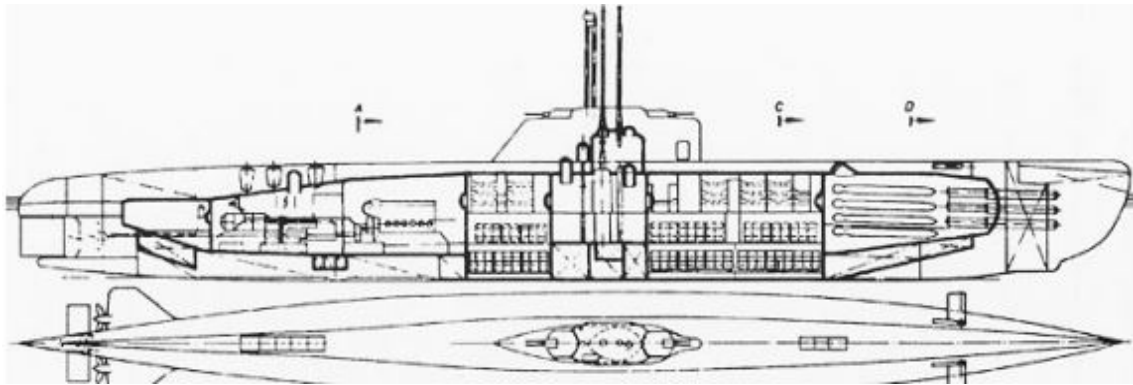
Investigation Committee”, apesar de que haja discussões sobre a concreta origem e definição do termo.

profundidade conhecida como cota periscópica.

Porém, como os submersíveis haviam sido projetados para um melhor desempenho na superfície, a utilização do esnórquel acabou impondo limitações estratégicas à marinha alemã, dada a sua velocidade cair em média de 16 nós para 5 nós.

Diante do desenvolvimento tecnológico e do protagonismo dos submarinos na primeira grande guerra, era evidente que a pesquisa e o desenvolvimento voltado à operações submarinas sofreria grandes progressos. Embora a solução alemã tenha sido apresentada tardiamente com o *Type XXI* (Figura 9), não podendo assim ter sido colocada em prática durante a guerra, os conceitos de projeto definiram os submarinos modernos ainda hoje em operação.

Figura 9 – O U-Boat Type XXI – 1943



Fonte: (GABLER, 1986)

O grande diferencial foi que o projeto do Type XXI priorizou o desempenho submerso da embarcação. Sendo assim, itens como apêndices externos e o carenamento do casco foram minuciosamente estudados. Com isso, a velocidade submersa alcançava a marca de 18 nós. Além disso, houve um aumento do volume ocupado pelas baterias e tanques de combustível, ampliando consideravelmente a autonomia e o alcance em relação à seus predecessores.

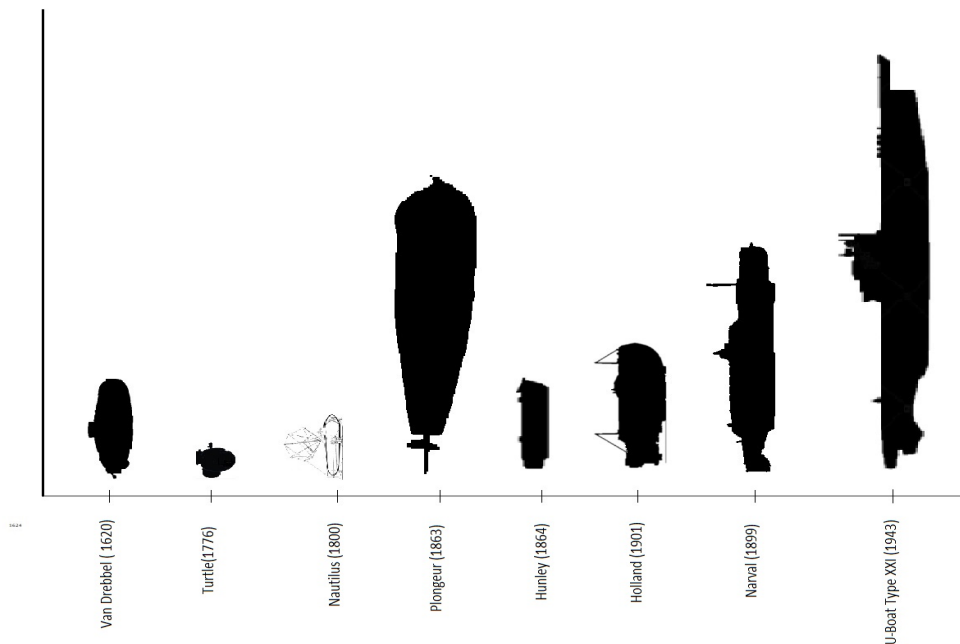
Na Figura 10 é ilustrado uma linha de evolução cronológica submarina com os exemplos citados neste capítulo.

2.2 A ABORDAGEM DE PROJETO DE SUBMARINOS CONVENCIONAIS

Nesta secção é apresentada uma discussão baseada na literatura aberta, sobre o projeto de submarinos convencionais. É importante observar que em se tratando de um sistema com forte vocação bélica, o projeto de submarinos é tópico bastante reservado, com um reduzido número de publicações abertas.

Burcher e Rydill(1994) citam três metas principais existentes do projeto, as

Figura 10 – Cronologia de variação das formas e dimensões dos submarinos



Fonte: Autor(2019)

quais devem ser observadas ao longo do desenvolvimento:

- O projeto precisa ser propício à construção, respeitando os recursos disponíveis e as capacidades tecnológicas;
- O custo deve ser justificado e aceitável para o cliente;
- O resultado final deve satisfazer ao objetivo funcional requisitado pelo operador/armador.

Ainda segundo tais autores, esses objetivos interagem e podem se tornar, ocasionalmente, conflitantes. Para determinadas situações um objetivo poderá tornar-se preponderante sobre os demais¹⁰ Invariante a isto, é comum todos os objetivos estarem presentes e ter influência no resultado do projeto.

Nesse contexto, Pereira (2016) propõe um modelo para projeto de submarinos convencionais.

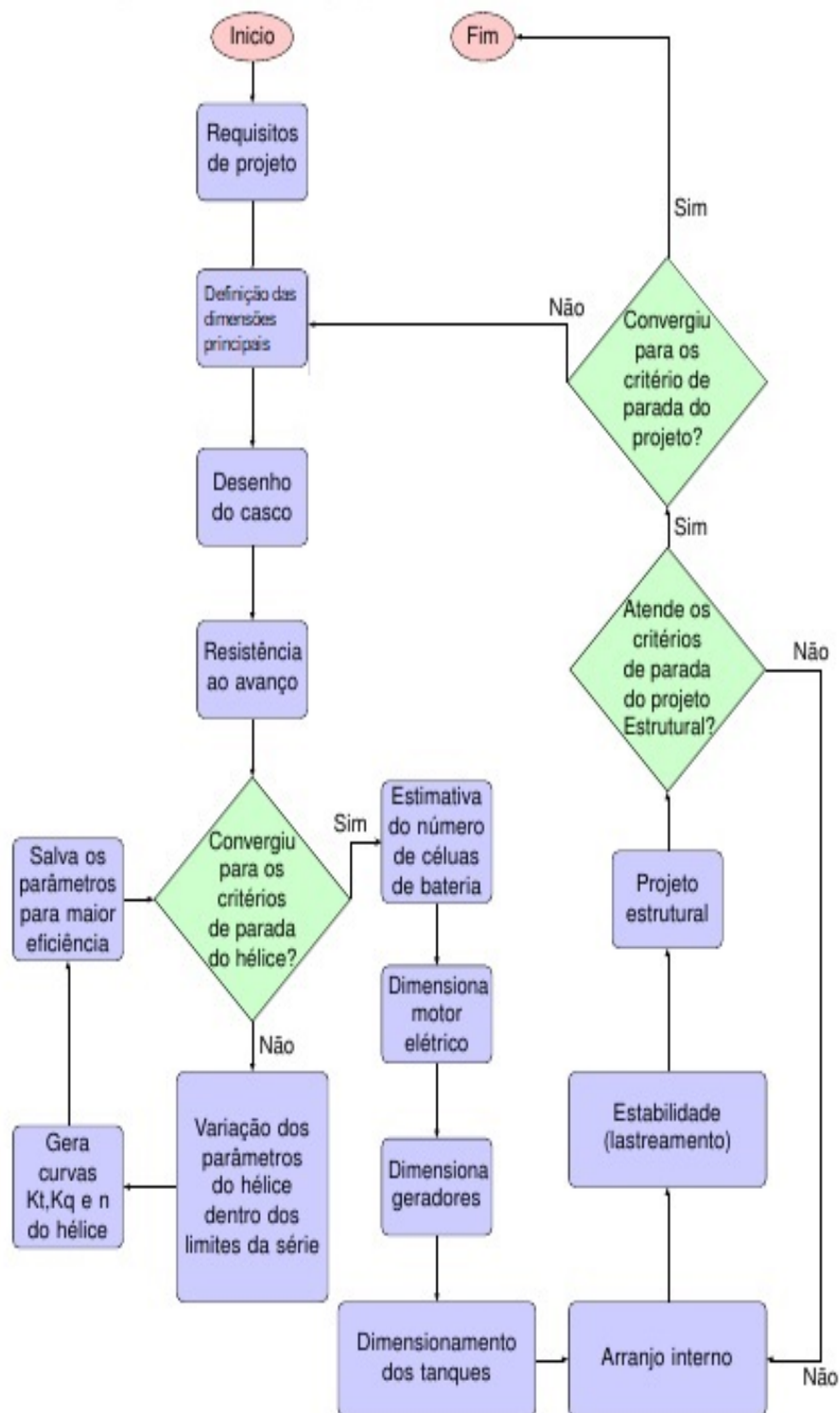
Tradicionalmente, o projeto de embarcações é feito de forma sequencial e iterativa. A abordagem tradicional do trabalho é baseada na divisão do projeto em

¹⁰ Por exemplo:

- Em algumas situações o custo será a variável de maior prioridade. Nesses casos, haverá um limite imposto sobre o desempenho da embarcação;
- Em algumas situações a altíssima performance prevalece sobre os demais atributos, fato este que acontece geralmente em tempos de guerra. Durante a Guerra Fria por exemplo, algumas marinhas investiram fortemente em projetos militares de grande porte (e.g.nucleares). Em tais circunstâncias, o desempenho da embarcação era considerado primordial. O cenário atual político mundial tende a limitar situações em que grandes investimentos sejam levantados para tais projetos.

etapas, de maneira lógica e sequencial (Figura 11), afim de refinar a solução final e possibilitar uma maior fluidez na convergência.

Figura 11 – Fluxograma do projeto de um submarino convencional



Fonte: Autor(2019).

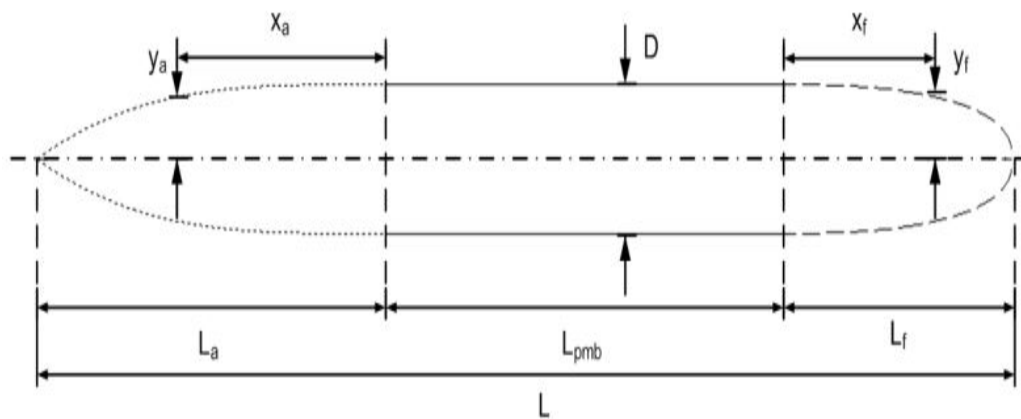
Conforme pode ser visto no fluxograma mostrado na Figura 11, o projeto de um submarino inicia-se com a definição dos requisitos e das dimensões da embarcação.

Tal dimensionamento é decisivo para o desempenho da embarcação, mas, no entanto, fogem ao escopo deste trabalho. O leitor interessado poderá encontrar informações e referência sobre esse assunto em Pereira (2016).

2.3 Geometria do casco

Neste trabalho, a geometria do casco foi definida seguindo a proposta de Jackson (1992), no qual o autor estabelece que o projeto de um submarino deve contemplar um casco externo (Figura 12) para fins hidrodinâmicos e um casco interno (Figura 14) para resistir à pressão imposta sobre o casco.

Figura 12 – Geometria do casco externo



As variáveis de entrada para o modelo geométrico são listadas na tabela 1, onde com o uso das equações 2.1 e 2.2, podem ser calculadas as alturas das balizas. A altura da baliza no corpo médio paralelo é igual ao raio do submarino. Com os valores de altura das balizas é traçada uma linha, cuja revolução em torno do eixo longitudinal da origem a superfície ao casco.

Conforme pode ser visto na Figuras 12 e 14, os cascos (interno e externo) são divididos em 3 partes: corpo de vante (L_f), corpo de ré (L_a) e corpo médio paralelo (L_{pmb}). A relação entre essas dimensões é explícita nas equações 2.3, 2.4 e 2.5 para L_a , L_f e L_{pmb} respectivamente (JOUBERT, 2004). Os valores das alturas e a variação da curvatura do corpo de vante e de ré dependem dos coeficientes n_a e n_f definidos no projeto.

$$y_a = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_a}{L_a} \right)^{n_a} \right] \quad (2.1)$$

$$y_f = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_f}{L_f} \right)^{n_f} \right]^{1/n_f} \quad (2.2)$$

Tabela 1 – Variáveis e parâmetros de entrada para geometria do casco

Variável	Definição	valor
D	diâmetro	entrada
L	comprimento	entrada
n_a	fator de forma a ré	entrada
n_f	fator de forma a vante	entrada
k_{21}	diferença entre o diâmetro externo e D^* [m]	0,2
k_{22}	diferença entre o diâmetro externo e o Diâmetro interno	0,1

Fonte Pereira(2016) - Adaptado).

$$L_a = 3,6D \quad (2.3)$$

$$L_f = 2,4D \quad (2.4)$$

$$L_{pmb} = L - 6D \quad (2.5)$$

Jackson (1992) ilustra em seu trabalho algumas linhas de casco variando os coeficientes n_a e n_f (Figura13). O uso das imagens em consonância com as equações 2.1 e 2.2, permite a observação de que quanto maiores forem os coeficientes n_a e n_f , mais a altura das balizas dos corpos de vante e ré se aproximam de $D/2$. Isto é:

Se

$$\lim_{n_a \rightarrow 0} y_a = \frac{D}{2} \quad (2.6)$$

$$\lim_{n_a \rightarrow \infty} y_a = 0 \quad (2.7)$$

analogamente

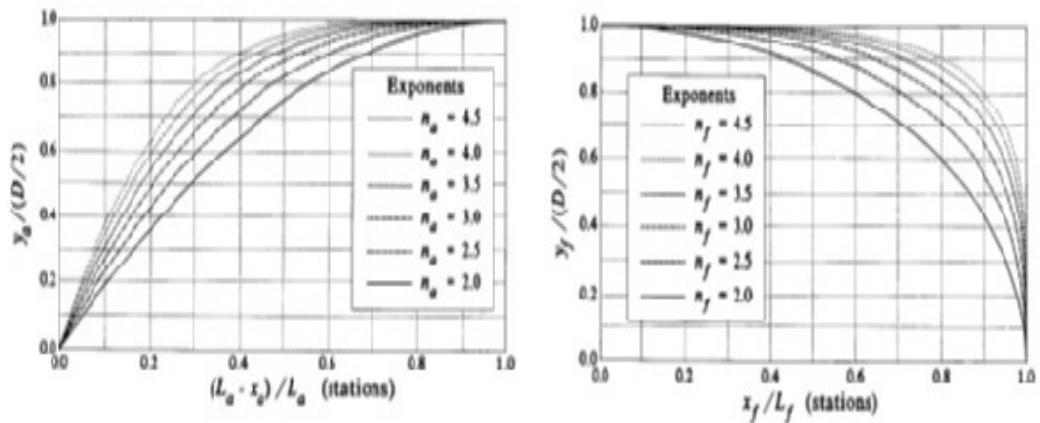
$$\lim_{n_f \rightarrow 0} y_f = \frac{D}{2} \quad (2.8)$$

$$\lim_{n_f \rightarrow \infty} y_f = 0 \quad (2.9)$$

A geometria do casco interno(resistente) é obtida por meio de um equacionamento simplificado, compatível com o casco externo.

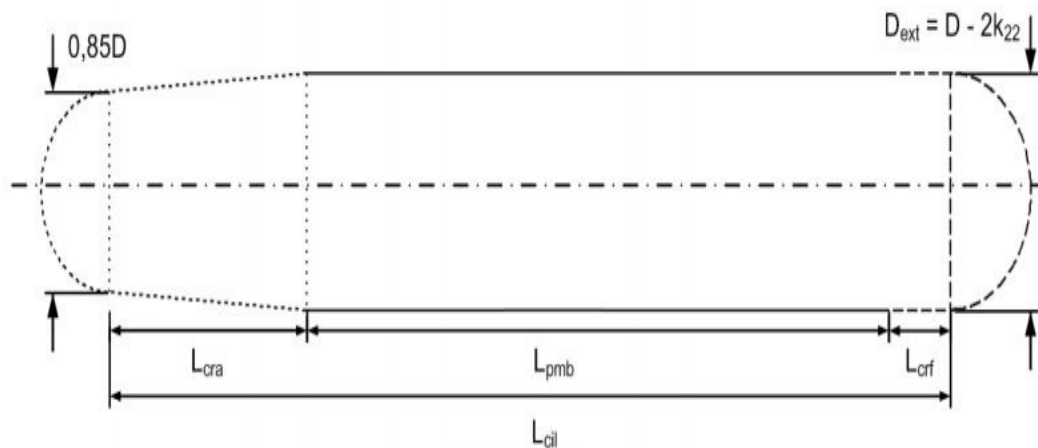
Para maximizar a resistência a flambagem, admite-se o casco interno como sendo um cilindro com calotas esféricas de fechamento nos hemisférios (OLIVEIRA, 2015). As calotas possuem raio proporcional à seção, e a parte cilíndrica tem dimensão igual à dimensão de corpo médio paralelo (L_{pmb}), se estendendo à vante e à ré do submarino - respectivamente L_{crf} e L_{cra} (Figura14).

Figura 13 – Geometria do casco resistente



Fonte: Jackson (1992).

Figura 14 – Geometria do casco resistente



Fonte: Pereira (2016).

Para a definição das dimensões do casco resistente assume-se que o diâmetro do eixo cônico localizado à ré do submarino (D^*) corresponde a 0,85 do diâmetro do submarino. Assume-se também que devido à fatores ligados à fabricação e a união das seções, haverá um espaço entre o casco externo e o casco interno, declarado como fator k_{21} , o qual tipicamente é definido como 0,2, conforme discutido por Pereira (2016).

Uma vez definida a geometria do casco externo, a equação 2.14 apresentada por Jackson (1992), permite calcular a área da superfície molhada, a qual servirá para estimar a resistência ao avanço da embarcação.

$$L_{cra} = 3.6D \left[0.15 - \frac{2}{D}k_{21} \right]^{1/n_a} \quad (2.10)$$

$$aux_1 = \left(1 - \frac{2}{D}k_{22} \right)^{n_f} \quad (2.11)$$

$$L_{crf} = 2.4D [1 - aux_1]^{1/n_f} \quad (2.12)$$

$$L_{cil} = L_{cra} + L_{lpbm} + L_{crf} \quad (2.13)$$

$$A = \pi D^2 [L/D - K2] \quad (2.14)$$

Onde K2 depende de coeficientes da geometria do casco C_{wf} e C_{wsa} (Anexo B).

$$K2 = 6 - 2.4C_{wf} - 3,6C_{wsa} \quad (2.15)$$

Com base nas dimensões e volume do casco resistente, é feito o esboço do arranjo interno dos componentes da embarcação. É importante destacar que o projeto de submarinos é talvez o mais emblemático e extremo exemplo de projeto de embarcações baseado em volume, tal como classificado por Watson (1987). O espaço limitado no interior do casco, bem como a necessidade de alocação de baterias e tanques de lastro, definem o arranjo como uma das tarefas mais desafiadoras do projeto de submarinos.

Para calcular o volume, o autor divide o casco em três corpos distintos: o corpo de vante, o corpo ré e o corpo médio paralelo. As equações para estimar o volume de tais corpos dependem das dimensões do casco e dos coeficientes de forma C_{pa} e C_{pf} disponíveis no Anexo B, tal como pode ser visto nas equações:

Volume a ré:

$$V_a = \pi(D/2)^2 [C_{pa} * 2,4 * D] \quad (2.16)$$

volume a vante:

$$V_f = \pi(D/2)^2 [C_{pf} * 3,6 * D] \quad (2.17)$$

Volume corpo médio paralelo:

$$V_{pmb} = \pi(D/2)^2 [L - 6D] \quad (2.18)$$

volume total:

$$V_t = V_{pmb} + V_f + V_a \quad (2.19)$$

2.4 Estabilidade

O arranjo interno da embarcação é feito levando-se em conta a estabilidade longitudinal e transversal. A análise é feita a partir de suas condições de operação: superfície, submergindo, submerso, emergindo e pousado no fundo do mar (RENILSON,

2015). Na Tabela 2 estão dispostas as relações referentes ao peso¹¹(Δ) e ao empuxo¹²(∇) da embarcação para cada situação. A variável normal refere-se à força de apoio exercida pelo fundo do oceano sobre o casco.

Tabela 2 – Dados do modelo

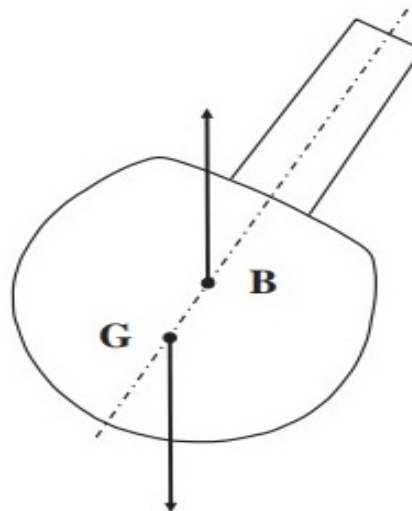
Condição	Razão
Superfície	$\Delta < \nabla$
Submergindo	$\Delta > \nabla$
Submerso	$\Delta = \nabla$
No fundo do oceano	$\Delta = \nabla + Normal$

Fonte Autor(2019).

A ausência de área de linha d'água faz da condição submersa aquela mais propícia para instabilidade, podendo levar o submarino a movimentos de rotação abruptos.

Um submarino submerso é estável na situação em que o centro de flutuação se localiza acima do centro de gravidade. Pois, nessa situação, para pequenos ângulos de inclinação transversal, a força peso aplicada no centro de gravidade e a força de flutuação aplicada no centro de flutuação, resulta em um momento que restaura a embarcação para a posição inicial (Figura 15).

Figura 15 – Submarino submerso estável



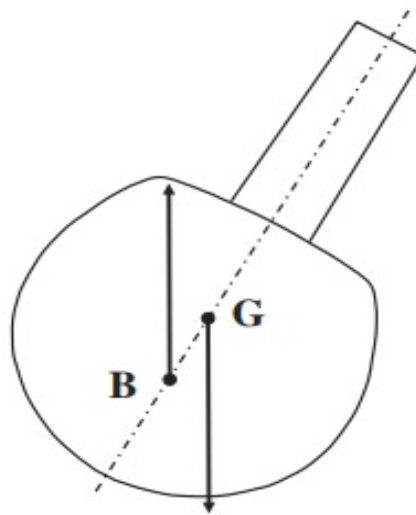
Fonte: Pereira (2016).

No entanto, para o caso em que o centro de gravidade está localizado acima do centro de flutuação, para pequenos ângulos de inclinação, as forças atuantes produzem um momento de emborcamento que levará o submarino a se inclinar cada vez mais, culminando com a rotação de 180° do casco (Figura 16) (RENILSON, 2015).

¹¹ Somatório dos pesos da embarcação

¹² Peso do volume de água deslocado pelo casco submerso da embarcação

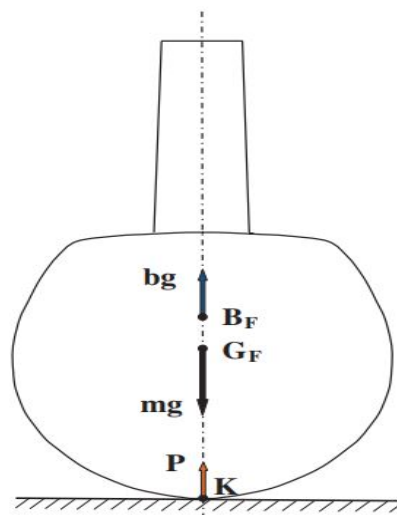
Figura 16 – Submarino submerso instável



Fonte: Pereira (2016).

Existem operações nas quais, para fugir da detecção sonar, o submarino deve ficar submerso a tal ponto que o casco encoste no fundo do oceano. Quando isso ocorre, a estabilidade da embarcação é afetada por uma força vertical que age na quilha da embarcação (Figura 17).

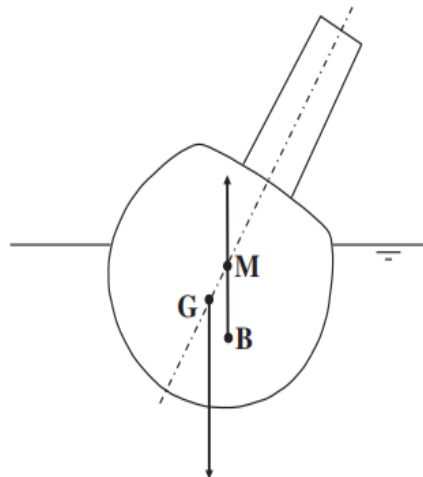
Figura 17 – Estabilidade do submarino sentado no fundo do oceano



Fonte: Renilson (2015).

Por fim, quando navegando na superfície, o comportamento do submarino é similar ao comportamento de qualquer embarcação flutuante, e para ser estável, a altura metacêntrica GM deve ser maior que zero, ou seja, a posição do metacentro deve estar localizado acima do centro de gravidade (Figura 18).

Figura 18 – Estabilidade do submarino na superfície



Fonte: Renilson (2015).

A altura metacêntrica (GM) é encontrada com o uso da equação:

$$GM = KB + GM - KG \quad (2.20)$$

Onde:

- KB: altura do centro de carena;
- KG: altura do centro de gravidade;
- BM: raio metacêntrico.

O raio metacêntrico (BM) por sua vez é definido como:

$$BM = \frac{I}{\nabla} \quad (2.21)$$

Onde:

- BM é a altura metacêntrica;
- I é o momento de inércia longitudinal e transversal;
- ∇ é o volume deslocado da embarcação [m^3].

De toda sorte, faz-se notável a importância do projeto manter a posição do centro de gravidade a mais baixa possível a fim de obter uma embarcação mais estável possível¹³.

Nesse contexto, tanto o desenho do casco como a disposição dos elementos internos devem buscar a redução do centro de gravidade do projeto.

¹³ Ensaios de estabilidade envolvem o rearranjo de todo o sistema do submarino a fim de obter a melhor solução possível baseada nos requisitos de projeto.

2.5 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Segundo consta no livro publicado em 1990 pela sociedade americana de arquitetos e engenheiros navais (ALLMENDINGER, 1990), a resistência ao avanço da embarcação pode ser dividida em duas parcelas: resistência devido ao casco e resistência devido aos apêndices.

Em se tratando do projeto de um submarino ambas as parcelas ganham importância considerável visto que a vela representa um apêndice cuja resistência ao avanço consiste em uma fração significativa da resistência ao avanço total da embarcação (RAMOS et al., 2011).

Tradicionalmente a resistência ao avanço de um casco pode ser dividida em parcelas referentes aos diferentes fenômenos associados ao arrasto que um corpo provoca ao se deslocar na água. Uma vez que a ferramenta desenvolvida utiliza modelos empíricos para estimar a resistência ao avanço de um submarino, a caracterização dessas parcelas foge ao escopo de relevância deste texto. O leitor poderá encontrar uma breve explicação no Apêndice A, ou nas diversas referências sobre o assunto, tais como Molland et al. (2017), Geer (1989) e Carlton (2012).

Classicamente, a resistência ao avanço da embarcação é calculada com o uso da equação 2.22.

$$Resistenciaoavanco(Rt) = \frac{1}{2}\rho V^2 Cd \quad (2.22)$$

Onde

- $Cd = AC_t + A_s C_{Ds} + \sum(A_A C_{DA})$

A potência total necessária para que um submarino navegue a uma dada velocidade V pode ser calculada com base em conceitos da mecânica dos fluidos, utilizando-se a equação 2.23, proposta por Russo et al. (1990).

$$Potencia_{casco} = Rt * V \quad (2.23)$$

O que resulta na equação 2.24.

$$Potencia_{casco} = \frac{1}{2}\rho V^3 [AC_t + A_s C_{Ds} + \sum(A_A C_{DA})] \quad (2.24)$$

Onde:

- ρ : Densidade do fluido;
- A : Área molhada;
- C_t : Coeficiente adimensional de arrasto;
- A_s : Área molhada da vela;
- C_{Ds} : Coeficiente de resistência da vela;

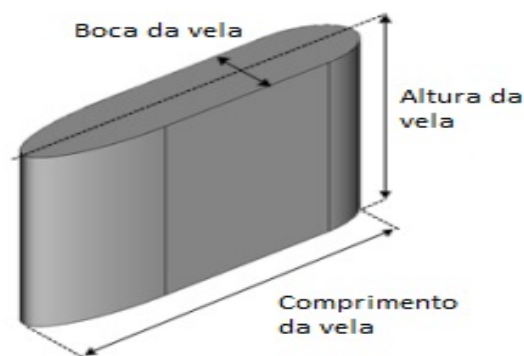
- A_A : Área molhada de cada um dos apêndices;
- C_{DA} : Coeficiente de resistência do apêndices.

A área dos apêndices é determinada a partir de considerações de controle hidrodinâmico. Para o projeto de submarinos modernos, é utilizada uma aproximação inicial, na qual a soma de $A_A * C_{DA}$ pode ser aproximada pelo fator $L * D / 1000$, conforme proposto por (JACKSON, 1992).

Tradicionalmente, a vela possui a geometria de gota quando vista de cima, isto é, as seções curvas a ré e a vante possuem geometria elíptica parecidas com as do casco (Figura 19).

Embora a existência da vela represente um acréscimo de resistência ao avanço, sua presença é uma necessidade e visa abrigar mastros, apêndices externos e em casos específicos, ser utilizada como torre de lançamento de mísseis, provendo proteção e contorno hidrodinâmico para tais itens (RAMOS et al., 2011).

Figura 19 – Vista isométrica da vela



Fonte: Pereira (2016)

Segundo Jackson (1992), o coeficiente de arrasto pode ser dividido em quatro componentes:

$$C_t = C_f + \Delta C_f + C_r + C_w \quad (2.25)$$

onde:

- C_f : Coeficiente friccional;
- ΔC_f : Coeficiente de correlação;
- C_r : Coeficiente de resistência de forma (ou residual);
- C_w : Coeficiente de resistência por formação de ondas.

O coeficiente C_w pode ser ignorado quando o submarino estiver operando a

uma profundidade de 5 vezes seu diâmetro (ALLMENDINGER, 1990). Para velocidades mais baixas, típicas e associadas com as operações de submarinos, a resistência friccional é o fator dominante na resistência ao avanço da embarcação.

Conforme discutido no Apêndice A, essa força surge devido ao cisalhamento que o fluido sofre ao escoar ao longo do casco. Assim, tal força é dependente do número de Reynolds e pode ser estimada por diversos métodos. Entre os métodos mais expeditos e de maior confiabilidade, destaca-se a formulação proposta pela Conferência Internacional de Tanques de Reboque (ITTC) de 1957, onde é sugerida a seguinte formulação:

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (2.26)$$

Onde Re é o número de Reynolds baseado no comprimento do casco:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2.27)$$

A curva ITTC é baseada em modelos de reboque com superfície suavizada. No entanto, como submarinos não mantêm sua forma suave por todo o casco, um termo adicional é utilizado, o coeficiente de correlação ΔC_f . Segundo Renilson (2015), valores típicos variam entre 0,0004 e 0,0009.

O coeficiente residual (C_r), ou coeficiente de resistência de forma, representa a parcela de força relacionada ao descolamento do fluido na camada limite, gerada devido a variação de pressão ao longo do casco. Esse valor pode ser estimado a partir da Equação 2.28, sugerida por Jackson (1992).

$$C_r = \frac{0,00789}{(L/D - K)^2} \quad (2.28)$$

Por fim, a área molhada pode ser estimada a partir da equação proposta por Jackson (1992), o qual propõe a seguinte formulação:

$$A_{reamolhada} = \pi D^2 [L/D - K] \quad (2.29)$$

2.6 Propulsor

O propulsor de uma embarcação é um dispositivo que converte a energia mecânica na força longitudinal necessária para mover o casco.

O sistema propulsivo padrão de um submarino convencional diesel-elétrico, é composto por um hélice que gera o empuxo necessário para atingir a velocidade pretendida, um eixo para fazer a ligação do hélice ao motor elétrico, um conjunto de baterias para fornecer a energia de operação necessária e um conjunto de diesel geradores para recarregar as baterias (PEREIRA, 2016).

Embora existam pesquisas para propor propulsores alternativos¹⁴, os propulsores do tipo hélice continuam a ser aqueles mais usados em submarinos. O controle de velocidade pode ser feito pelo ajuste do passo ou da rotação do propulsor.

Em geral, um sistema propulsivo pode ter um ou mais propulsores, dependendo de sua aplicação. No entanto, a configuração mais utilizada em submarinos modernos consiste em um único propulsor localizado na popa e cujo eixo de rotação coincide com o eixo de revolução do casco. Tal configuração permite obter valores de eficiência na ordem de 70 a 80%(JACKSON, 1992).

Conforme citado por Pereira (2016), outras configurações propulsivas consistem no uso de duas hélices coaxiais. Tal configuração, em teoria, permite a obtenção de maiores coeficientes propulsivos, além de anular o torque gerado pela rotação do hélice. Nessa configuração, cada propulsor rotaciona em um sentido, visando anular o torque total produzido na embarcação.

A hélice a ré recupera parte da energia rotacional transmitido pela hélice dianteira. Assim, em princípio, a eficiência propulsora pode ser maior do que para uma única hélice. Na Figura 20 é mostrado um propulsor contra-rotativo acoplado a um torpedo.

O submarino não requer hélices contra-rotativos para reduzir a perda do torque da propulsão, graças ao baixo centro de gravidade, as aletas transversais e a inercia da embarcação. Desse modo, essa configuração não será tratada no desenvolvimento inicial apresentado neste trabalho.

Figura 20 – Propulsores contra-rotativos de um torpedo



Fonte: Renilson (2015)

Propulsores contra-rotativos foram utilizados em submarinos americanos de 1967 a 1989, demonstrando um acréscimo de 10% de eficiência propulsiva (DUTTON, 1994). No entanto, a complexidade associada a tal sistema aliada a um perfil mais discreto de mísseis, reduziu o uso de tais configurações em projetos mais atuais.

¹⁴ Incluem-se aqui tentativas de mimetizar o comportamento de peixes, como aquelas vista em Lashkari et al. (2010)

2.6.1 HÉLICE

Segundo Allmendinger (1990), a configuração tradicional de um submarino utiliza um único propulsor do tipo hélice situado a ré e cuja função é transformar da maneira mais eficiente possível a potência entregue pelo motor em empuxo longitudinal

O funcionamento de um propulsor do tipo hélice baseia-se na modificação da quantidade de movimento do fluido impulsionado pelas pás do propulsor. A rotação do propulsor combinada com a secção transversal das pás “empurram” o fluido para trás, que reage¹⁵ empurrando a embarcação para frente. Tal funcionamento é discutido por diversos autores, dentre os quais destaca-se a seguinte citação:

“Neste caso a pá empurra a água do mesmo modo como você faz com a mão quando está nadando [...] é exatamente isto que também acontece com o movimento da pá de um hélice. Este movimento cria uma diferença de pressão entre os dois lados da pá: uma pressão positiva empurrando a pá no lado de baixo e uma pressão negativa puxando a pá no lado de cima. Este efeito ocorre em todas as pás ao mesmo tempo, com cada pá puxando e empurrando água ao mesmo tempo [...]” (NASSEH, 1999, p.48)

No apêndice E é apresentada uma breve discussão sobre o modelamento matemático de funcionamento de um propulsor do tipo hélice, o qual, a exemplo da modelagem referente a resistência ao avanço de um casco, foge ao escopo do trabalho, mas pode ser visto em detalhes em diversos trabalhos tais como Geer (1989), Padovezi (1997) e Sampaio (2011).

Um propulsor do tipo hélice é composto por um bosso no centro (hub ou boss) e pás dispostas simetricamente em relação ao eixo central, cuja quantidade depende das características do projeto. No apêndice F são mostrados detalhes referentes a modelagem e localização das pás de um hélice.

As características de um hélice são influenciadas por diversos fatores. Do ponto de vista hidrodinâmico, os parâmetros mais importantes no projeto e seleção de um propulsor são: o número de pás, passo, caimento, a assimetria do contorno de pá e o perfil da pá. A seguir é apresentada uma breve descrição sobre a definição e o comportamento de cada uma dessas características.

- (i) Diâmetro do propulsor (D): Corresponde a duas vezes a medida entre o centro do eixo propulsor e a ponta da pá. Em geral, quanto maior o diâmetro, maior o empuxo gerado, aumentando a carga na pá (PADOVEZI, 1997).
- (ii) Número de pás (Z): É um número importante que influencia diretamente na eficiência e vibração de um propulsor. Tradicionalmente um propulsor possui

¹⁵ Aplicação direta da terceira lei de Newton: "A toda ação sempre há uma reação de mesma intensidade e direção, porém sentidos opostos" (HALLIDAY, 2012)

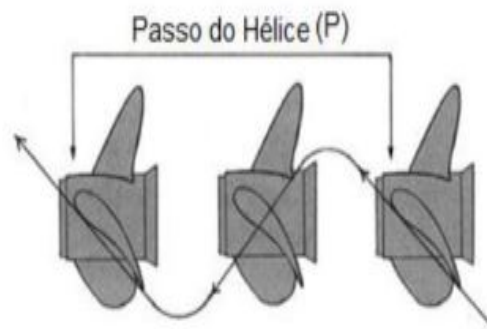
entre 4 e 7 pás, sendo que quanto maior for o número de pás, menor será a vibração gerada no hélice (TRINDADE, 2012). Mantido as características da pá, um maior número de pás fornece uma maior área projetada, gerando um maior empuxo, sem a necessidade de maiores rotações;

- (iii) Área do disco (A_0): Corresponde a área total medida em um plano ortogonal ao eixo propulsor, a qual é ocupada pelo hélice durante uma rotação completa. A área do disco de um propulsor pode ser determinada pela Equação 2.30;

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.30)$$

- (iv) Área expandida (A_E): Corresponde a soma das áreas das faces das pás e tem influência em dois aspectos importantes: quanto menor a área da pá, maior a suscetibilidade ao fenômeno de cavitação, por outro lado, quanto maior a área da pá maiores são as perdas por atrito (arrasto) (PADOVEZI, 1997);
- (v) Passo do hélice (P): O passo do hélice (Figura 21) é o valor de deslocamento na direção axial de um ponto na sua extremidade ao efetuar uma revolução completa. Usualmente o passo de um propulsor é medido como uma fração do diâmetro do hélice, obtendo-se a razão P/D (PINHEIRO, 2014);

Figura 21 – Passo hélice.



Fonte: Pinheiro (2014).

- (vi) Relação entre área do disco e área expandida (A_E/A_0): Valores típicos variam entre $1,05 \geq A_0/A_E \geq 0,3$. Valores acima disso, significam a ocorrência de pás sobrepostas (TRINDADE, 2012);
- (vii) Área projetada (A_p): Corresponde à área da projeção das pás em um plano horizontal ao eixo do hélice. Segundo Burril et al. (1962), a área projetada pode ser estimada pela Equação 2.31 .

$$A_p = A_E(1,067 - 0,229P/D) \quad (2.31)$$

É importante observar que no projeto de um submarino, a quantidade de pás é definida visando minimizar a assinatura acústica gerada pela operação do propulsor.

Idealmente, deve ser selecionado o maior número de pás para o propulsor possível, de preferência um número primo, para evitar efeitos harmônicos. Contudo, existem preocupações práticas relacionadas a um número de pás muito altos, tais como rigidez estrutural das pás.

Tal redução decorre da diminuição inerente do comprimento da secção localizada na base da pá, resultado do aumento no número de pás.

Todas as configurações levam ao fato de que o número de pás comumente adotado em propulsores de submarinos é sete (RENILSON, 2015), como pode ser visto no propulsor de um submarino convencional mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Propulsor 7 pás de um submarino.



Fonte: Renilson (2015).

2.6.1.1 DIAGRAMA DE ÁGUAS LIVRES

A maneira mais confiável de aferir o desempenho de um propulsor consiste na realização de ensaios em águas livres. Nesse tipo de ensaio, um modelo em escala reduzida do propulsor é deslocado com velocidade de avanço V_a em um fluido em repouso. Durante o ensaio são medidos valores de torque (Q) e de força propulsiva (T), para vários regimes de operação, que após serem adimensionalizados utilizando-se as equações 2.33 e 2.32, constituem os chamados diagramas de águas livres de um propulsor (TRINDADE, 2012).

$$K_t = \frac{T}{\rho D_p^4 n^2} \quad (2.32)$$

$$K_q = \frac{Q}{\rho D_p^5 n^2} \quad (2.33)$$

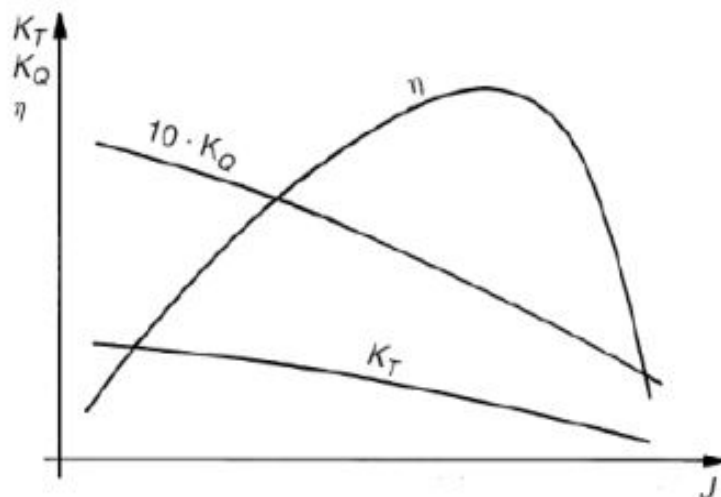
$$J = \frac{V}{n D_p} \quad (2.34)$$

$$\eta_0 = \frac{K_t J}{2\pi K_q} \quad (2.35)$$

Na figura 23 é apresentado um exemplo de diagrama de desempenho de um hélice ensaiado em águas abertas, no qual é mostrada a variação dos coeficientes de força propulsiva K_t e torque K_q em termos do coeficiente de avanço J .

Por fim, observa-se ainda que a eficiência de um propulsor, calculada por meio da equação 2.35, representa a relação entre a força propulsiva e o torque correspondente em uma dada condição de operação do propulsor.

Figura 23 – Diagrama de águas abertas



Fonte: Trindade (2012).

2.6.1.2 SÉRIES SISTEMÁTICAS

Uma série sistemática é um conjunto obtido a partir da variação sistemática dos parâmetros geométricos que definem o objeto de análise, a qual tem como objetivo permitir ao projetista a compreensão dos principais parâmetros que influenciam no desempenho do sistema ensaiado.

No caso de propulsores do tipo hélice, uma série sistemática de hélices permite ao projetista assimilar os principais parâmetros que influenciam na ocorrência de cavitação e no desempenho do propulsor em uma dada velocidade. Além disso, o conjunto dos dados que compõem uma série sistemática facilita a seleção e o dimensionamento do propulsor (TRINDADE, 2012).

É importante destacar que o processo de seleção das características de um propulsor utilizando uma série sistemática não se trata do projeto do hélice em si, pois diversos valores da geometria do hélice são definidos na série, em especial os parâmetros que descrevem as secções transversais das pás.

Por fim, destaca-se que um dimensionamento livre e completo de um propulsor do tipo hélice é um processo extremamente complexo, lento e custoso, o que inviabiliza tal abordagem nas fases iniciais de projeto ou para projetos usuais.

2.6.1.3 SÉRIE DE WAGENINGEN

Entre as séries sistemáticas de propulsores, destaca-se a série Wageningen descrita no clássico trabalho Kuiper (1992). Tal série é amplamente conhecida pela letra B, enquanto os resultados da série são nominados em função do número de pás e da razão de área expandida. Por exemplo, o gráfico de desempenho B 5 - 80 representa o ensaio em águas abertas de um hélice da série B de 5 pás e com uma razão de área expandida de 80%. A seguir são listados os limites de validade para uso dessa série.

Tabela 3 – Limites da Série de Wageningen

Número de pás	$2 \leq z \leq 7$
Razão Passo/Diâmetro	$0,5 \leq P/D \leq 1,4$
Razão de área expandida	$0,3 \leq \frac{A_e}{A_0} \leq 1,05$

Brinati (2010).

A partir das curvas de desempenho obtidas nos ensaios dessa série, Van Oossanen elaborou expressões analíticas que interpolam os resultados experimentais. As expressões analíticas obtidas por Oossanen permitem estimar o empuxo (K_t) e o torque (K_q) em uma dada condição de operação em função das características geométricas do propulsor (LEWIS, 1988).

As equações 2.36 e 2.37 representam esses polinômios, enquanto os valores dos coeficientes relacionados à série encontram-se disponíveis no Anexo C.

$$K_{T-helice} = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v} \cdot (J)^s \cdot (P/D)^t \cdot (A_E/A_0)^u \cdot (Z)^v \quad (2.36)$$

$$K_{Q-helice} = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v} \cdot (J)^s \cdot (P/D)^t \cdot (A_E/A_0)^u \cdot (Z)^v \quad (2.37)$$

Sobre a importância do procedimento proposto por Oossanen, Trindade (2012) escreve:

“As curvas traçadas nestes diagramas servem principalmente para a otimização do hélice e determinação do ponto de funcionamento. Na

prática, já não são utilizadas aquelas representações gráficas no projeto de hélices, mas sim os polinômios representativos daquelas evoluções para permitir o cálculo computacional. As tabelas têm cerca de 50 coeficientes para polinômios relativos a série sistemática de hélices de Wageningen” (TRINDADE, 2012, 46).

É importante observar que, para a realização dessa série, foram ensaiados cerca de 120 propulsores variando-se a razão de área expandida/área de disco, a razão passo diâmetro e o número de pás dentro dos limites estabelecidos anteriormente. No entanto, nem todas as combinações foram ensaiadas, o que diminui a confiabilidade das equações propostas por Oossanen em combinações de parâmetros não efetivamente ensaiadas.

Por fim, destaca-se que a geometria da Série B é mais adequada as condições de operação e aos requisitos encontrados em navios mercantes, do que ao projeto de submarinos. No entanto, na ausência de séries mais apropriadas, este trabalho segue as propostas apresentadas em Bettle (2014) e Jackson (1992), onde inicialmente, utilizam-se propulsores da Série B de 7 pás durante o projeto conceitual de um submarino.

2.6.1.4 CRITÉRIO DE CAVITAÇÃO

A água se transforma em vapor a 100°C na pressão atmosférica, porém, se a pressão atmosférica for reduzida, a mesma água passará para o estado de vapor a uma temperatura menor.

A alta velocidade de rotação do hélice, gera zonas de baixa pressão que resultam da aceleração do fluido ao longo da pá. Quando essas bolhas caminham para uma região onde a pressão é superior à pressão de vapor, essas bolhas são comprimidas e implodem, causando ruído, vibração e erosão no propulsor.

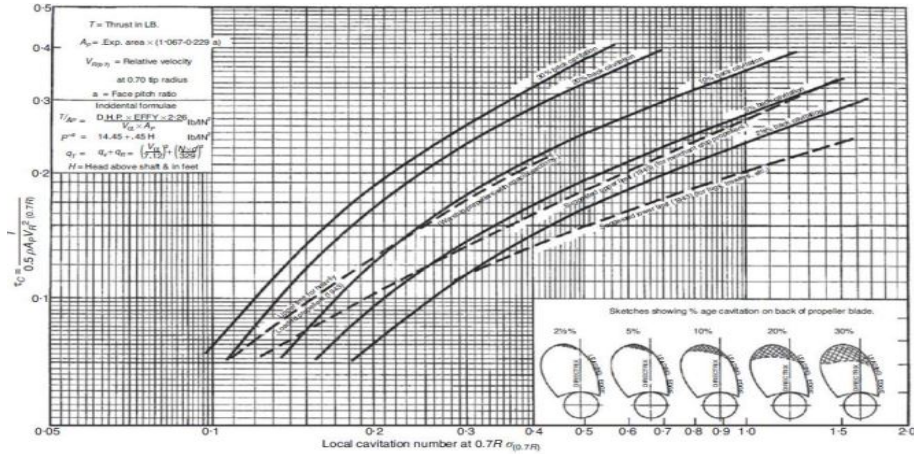
Além das questões associadas a eficiência, no projeto de submarinos a descrição acústica é de fundamental importância¹⁶ (PEREIRA, 2016). Dessa forma a aplicação de critérios envolvendo limites de cavitação torna-se extremamente relevante.

Entre as técnicas mais utilizadas para a avaliação da porcentagem de cavitação ocorrida durante a operação de um propulsor, destaca-se a utilização do diagrama de Burril, o qual é mostrado na Figura 24. Burril realizou ensaios em túneis de cavitação com modelos de propulsores em escala real com diferentes geometrias e propôs um diagrama relacionando o número de cavitação (σ) e o coeficiente de Burril (τ_C) (MOLLAND et al., 2017).

O coeficiente de Burril (τ_C) é calculado pela equação 2.38, enquanto o número de cavitação (σ) é calculado pela equação 2.39.

¹⁶ Eventualmente, poder-se-ia citar textos técnicos referentes a importância da emissão sonora no projeto de submarinos, no entanto o clássico filme “Caçada ao Outubro Vermelho” e o recente “Alerta Lobo” ilustram com perfeição tal cenário.

Figura 24 – Diagrama de Burril



Fonte: Molland et al. (2017).

$$\tau_c = \frac{R_T}{(1-t)0,5\rho V_R^2 A_P} \tag{2.38}$$

O número de cavitação (σ) é calculado pela equação:

$$\sigma = \frac{\rho g h + P_{atm} - P_v}{0,5\rho V_R^2} \tag{2.39}$$

Onde:

- P_{atm} : pressão atmosférica (101 KN/m^2);
- h : profundidade do propulsor;
- P_v : pressão de vapor da água salgada (considera-se 3.000 N/m^2 para um projeto preliminar);
- t : coeficientes de redução da força propulsora .

O coeficiente de redução da força propulsora relaciona as perdas devido ao aumento de velocidade e a diminuição da pressão do fluido ao longo do casco. É possível definir o fator de redução de propulsão (t) como:

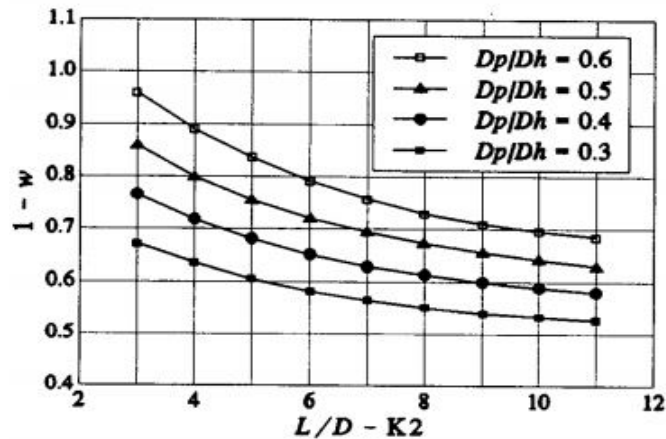
$$t = \frac{T - R_{av}}{T} \tag{2.40}$$

Onde:

- T : força necessária para movimentar a embarcação no meio fluido à velocidade pretendida (empuxo);
- R_{av} : resistência sofrida pela embarcação devido ao movimento no fluido.

Por fim, a velocidade radial (V_R), calculada pela equação 2.41, consiste na velocidade do escoamento medida a 0.7 do raio do hélice, a qual é composta da

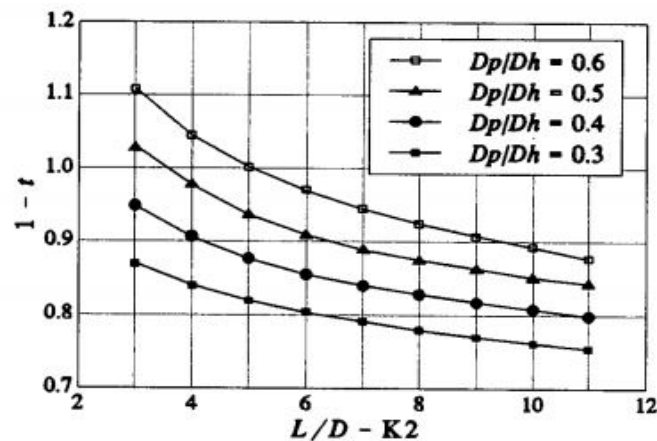
Figura 26 – Curvas de relação para o coeficiente de esteira.



Fonte: Jackson (1992).

O autor também propõe o uso de um gráfico (Figura 27) para estimativa do coeficiente de redução da força propulsora (t) do sistema. Esse coeficiente surge devido a zonas de baixa pressão geradas a ré do casco, as quais são geradas pela rotação do propulsor. Tais zonas aumentam a diferença de pressão entre a proa e a popa do casco e, na prática, representam um aumento da resistência ao movimento de uma embarcação.

Figura 27 – Curvas de relação para o coeficiente de redução da força propulsora.



Fonte: Jackson (1992).

Um vez que as curvas de desempenho de um propulsor são expressas na forma adimensionalizada, deve-se também adimensionalizar a curva de resistência ao avanço do casco, a fim de obter o ponto de operação do propulsor. Tal ponto representa a situação no qual o coeficiente de força propulsiva fornecido pelo hélice se iguala ao coeficiente de resistência ao avanço adimensionalizada do casco.

De maneira prática, o ponto de operação J é definido como a intersecção

da curva de resistência adimensionalizada do casco ($K_t \text{casco}$) gerada com o uso da equação 2.43 proposta por Jackson (1992), com a curva de força propulsiva adimensionalizada do hélice ($K_t \text{hélice}$), a qual pode ser obtida utilizando a equação 2.36.

$$K_t \text{casco} = \frac{R_T}{\rho(1-t)V_a^2 D_{max}^2} J^2 \quad (2.43)$$

2.7 OTIMIZAÇÃO

Um processo de otimização pode ser definido como uma busca automática, dirigida e sistemática com o intuito de obter a melhor resposta dentro de um campo de soluções possíveis (AUGUSTO, 1996).

A palavra otimização deriva do latim *optimus* (melhor)+ *izar* (fazer)+*ção* (processo) que pode ser traduzido como 'processo de fazer melhor'. Na prática, um processo de otimização é aquele que dentre as alternativas do projeto, seleciona as melhores soluções possíveis.

Evidentemente o conceito de melhor solução precisa ser definido pelo projeto e, de maneira geral, consiste em uma função que representa o mérito da solução a qual deve ser maximizada ou minimizada durante o processo de otimização.

Assim, a função objetivo é uma função escalar das variáveis de projeto definidas pelo engenheiro ou projetista. Genericamente, essa função pode ser definida pela equação 2.44.

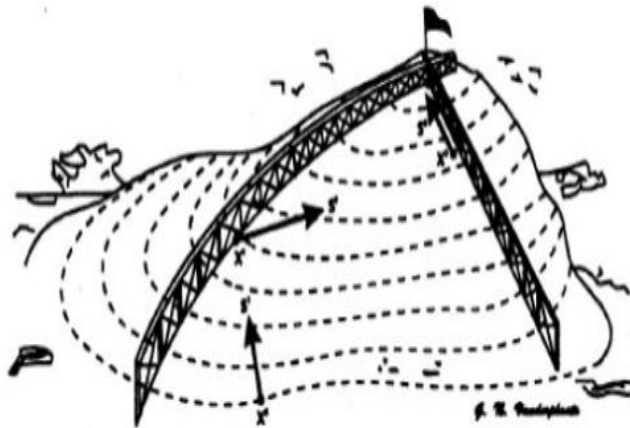
$$f(x) = (x_1, x_2, x_3, x_4 \dots x_n) \quad (2.44)$$

O conceito de solução possível, por sua vez, compreende o conjunto de soluções que atendem aos requisitos estabelecidos para o projeto, tanto em termos dos limites das variáveis de projeto, quanto em termos dos requisitos de desempenho ou dos requisitos normativos. Sobre a importância da consideração das restrições em um processo de otimização, Tancredi (2008) escreve:

“Para melhor entender a existência de restrições, considere-se a analogia com a escalada de uma montanha; imagine-se que durante a subida encontram-se obstáculos como cercas e grandes pedras que não fazem parte da topologia do terreno em si e que não permitem caminhar sempre no sentido de inclinação máxima, como mostrado na Figura 15. Esses obstáculos representam as restrições e exigirão que se façam grandes desvios para chegar ao pico da montanha; eventualmente, eles nem permitem que se chegue ao pico, pois esse objetivo pode se encontrar em uma parte inacessível do terreno.”(TANCREDI, 2008, p.28-29).

No trabalho aqui apresentado, a otimização do projeto é feita selecionando-se os parâmetros de projeto (D , A_e/A_0 e P/D) que maximizam a eficiência do propulsor.

Figura 28 – Ilustração sobre a otimização de problemas com restrição



Fonte: Silva (2007).

Os limites das variáveis de projeto são impostas pela série B descrita no capítulo anterior. Além disso, considera-se o número de pás fixo em 7 (conforme discutido anteriormente) e um limite de cavitação de 2,5%.

Dessa forma, o modelo matemático desenvolvido para a otimização do propulsor de um submarino consiste nas equações a seguir:

$$\text{Max } F(x) = \max \eta(Z, \frac{P}{D}, \frac{A_e}{A_0}, J)$$

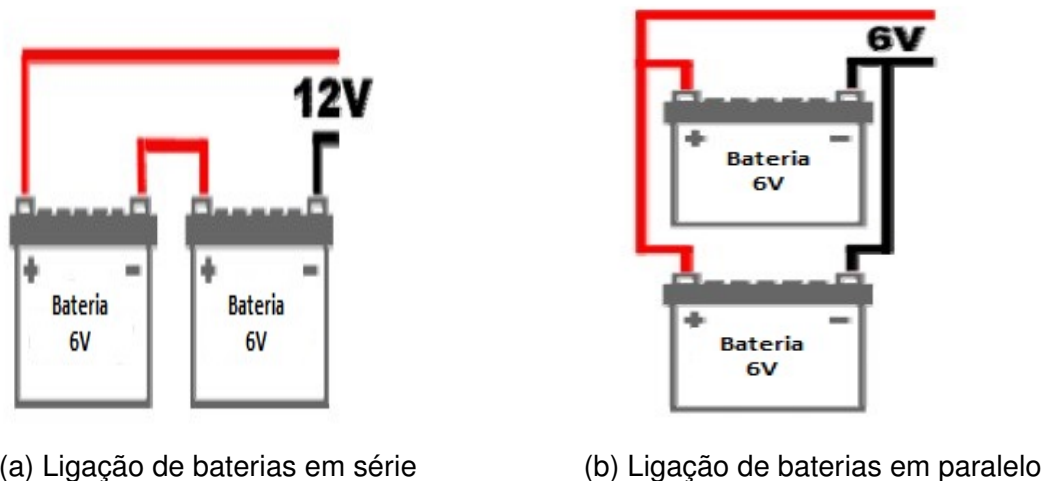
As restrições dessa função são aquelas impostas pela Série B, pelos limites de cavitação e pelos dados fornecidos nas Figuras 26 e 27, dessa forma, tem-se como restrição:

- $Z = 7$
- Diâmetro do hélice \geq Diâmetro do casco * 0,3
- Diâmetro do hélice \leq Diâmetro do casco * 0,6
- $\frac{A_e}{A_0} \geq 0,3$
- $\frac{A_e}{A_0} \leq 1,05$
- $\frac{P}{D} \geq 0,5$
- $\frac{P}{D} \leq 1,4$
- $Kt_{casco} = Kt_{hlice}$
- Cavitação $(Z, \frac{P}{D}, \frac{A_e}{A_0}) \leq$ Limite de cavitação

2.8 BATERIAS

A bateria elétrica é uma fonte de corrente contínua, composta pela combinação de uma ou mais células eletroquímicas (também chamadas de células voltaicas), que tem como objetivo converter energia química em voltaica. O funcionamento de uma bateria é resumidamente descrito no Apêndice B.

Para o dimensionamento do sistema propulsor de um submarino diesel-elétrico,



(a) Ligação de baterias em série

(b) Ligação de baterias em paralelo

Figura 29 – Fonte: teleco (2019)- Adaptado.

o cálculo da autonomia do sistema é feito considerando a corrente do consumidor e a autonomia da bateria. Por exemplo: Uma Bateria de 300Ah/10hs sujeita à corrente do consumidor de 15A tem previsão de autonomia de 300/15 ou seja 20hs.

Em vários casos, uma bateria não supre a demanda de corrente ou tensão do sistema, sendo necessário então o uso de um grupo de baterias associados em série ou em paralelo, denominado de banco de baterias.

O correto dimensionamento do banco de baterias é uma etapa de extrema importância no projeto de submarinos, visto sua influência na autonomia e no centro de gravidade da embarcação, pois o peso do banco de baterias representa, em média, 30% do peso total da embarcação (PEREIRA, 2016).

A ligação das baterias em série (Figura 29a) resulta em um aumento da tensão do circuito, enquanto que em paralelo (Figura 29b) resulta na mesma tensão mas com um acréscimo da capacidade.

No projeto, para se alcançar a potência necessária, dimensionam-se as baterias em série, variando assim a potência gerada até o valor requerido. Após, para o aumento da capacidade do sistema, adicionam-se baterias em paralelo, aumentando assim a capacidade do sistema, mantendo a potência entregue constante.

O banco de baterias fornece a energia necessária para alimentar o motor elétrico, gerando rotação no propulsor e assim, conseqüentemente, movendo a embarcação. A potência necessária para mover a embarcação é proporcional à velocidade com que ela avança (PEREIRA, 2016), a qual foi discutida na seção 4.2.

De acordo com um levantamento de submarinos da classe SSK¹⁷, a velocidade de projeto de um submarino convencional varia em torno de 20 nós (BUCKINGHAM, 2008). Esse valor é selecionado particularmente por que o ruído emitido pelo movimento

¹⁷ Submarinos da classe SSK são projetados para batalha anti-submarina. A simbologia é adotada pela marinha americana para identificar as características individuais da embarcação. SS indica que trata-se de um submarino e K significa assassino ("killer")

do submarino até essa velocidade dificulta o rastreamento da embarcação.

Devido à era de munições e torpedos de alta velocidade, a velocidade do submarino SSK não é projetada para fugir de um torpedo. Para balancear isso muitas vezes, é utilizada a força de empuxo juntamente com os hidroplanos para dar propulsão suficiente, sem aumentar o peso do motor.

Um levantamento realizado por Bagshaw (1992) mostra que as células de bateria têm altura média entre 1 e 1,1 metros. No entanto, células alemãs da classe 209 possuem uma altura de 1,39m embora possuam o mesmo volume (Figura 30). No mesmo estudo é apresentada a performance típica de uma bateria, a qual é mostrada na Figura 31.

Figura 30 – Tabela de dimensões de células levantada por Norman E. Bagshaw

Typical dimensions of submarine cells				
Class	Country	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)
Whiskey	Russian Federation	365	656	1013
Romeo	Russian Federation	365	656	1013
Foxtrot	Russian Federation	365	656	1013
Guppy I	USA	361	451	1079
Daphne	France	360	450	1066
Agosta	France	360	450	1066
Sauro	Italy	379	620	980
Oberon	UK	360	449	1081
Upholder	UK	360	449	1157
205	Germany	310	379	922
209	Germany	290	450	1336

Fonte: Bagshaw (1992).

Figura 31 – Tabela de desempenho típico de uma bateria

Typical performance figures for submarine cells			
Discharge rate (A)	Capacity (A h)	Energy density	
		(W h/kg)	(W h/l)
6080	6500	21.4	63.6
2700	8300	29.7	88.4
1760	9200	33.8	101
970	9950	37.5	112
525	10650	40.8	121
190	12130	47.1	140
Discharge rate (h)	Mean voltage (V)	End voltage (V)	
1	1.71	1.46	
3	1.86	1.61	
5	1.91	1.67	
10	1.96	1.73	
20	1.99	1.77	
60	2.02	1.80	

Fonte: Bagshaw (1992) - Adaptada.

O uso de células de bateria permite o aumento da precisão do bloco de construção, podendo ser dividido em várias células, além de aumentar o fator de segurança do sistema elétrico (SANTOS, 2010).

2.8.1 BATERIAS - CHUMBO ÁCIDA

As baterias Chumbo Ácida são amplamente utilizadas na indústria de submarinos, dada a simplicidade do sistema, o baixo custo quando comparado à outros modelos de baterias e o vasto conhecimento existente referente à esse modelo. No Apêndice C o leitor encontrará uma melhor explicação a respeito do funcionamento das baterias Chumbo Ácida.

A potência da carga representa a potência ativa que o sistema solicita do banco de baterias. Picos no aumento da potência são compensados pelo aumento da corrente. No modelo desenvolvido, as cargas são consideradas sempre com potência constante, correspondendo a potência requerida pelo sistema propulsivo do submarino.

A autonomia submersa especificada pelo armador representa uma variável importante para o dimensionamento do banco de baterias. Dependendo da autonomia submersa, haverá um fator multiplicador do banco de baterias para que a potência de carga seja entregue durante todo o período em que o submarino permanece submerso e, portanto, não realiza o recarregamento do banco de baterias.

Baterias ditas estacionárias, sofrem o que é chamado de estratificação. Nesse processo ocorre a separação do ácido e da água no eletrólito. O ácido vai para a parte de baixo da bateria, aumentando a corrosão no local e diminuindo a eficiência da bateria. Em carros e motos esse efeito quase não acontece, devido a vibrações existentes nos veículos. Em submarinos, o efeito é diminuído com o uso de ar comprimido injetado na região inferior da bateria, o qual é removido por orifícios existentes na região superior da bateria.

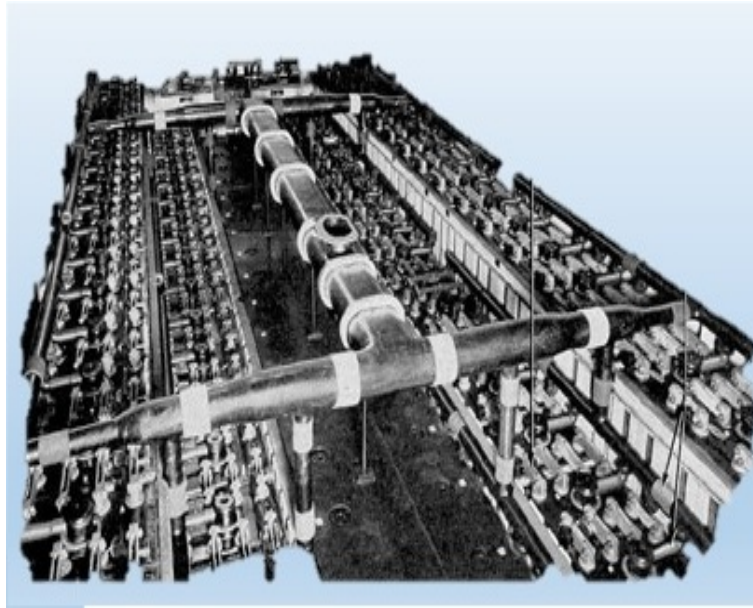
Altas taxas de descarga geram um aumento de temperatura nas células de bateria, o que pode ocasionar falhas ou até diminuir a vida útil das mesmas. Assim sendo, o projeto do banco de baterias inclui a instalação de dutos de ventilação (Figura 32 que além de renovar o ar da sala de baterias, retira os gases provenientes das reações químicas das células(U.S.NAVY, 1946).

2.8.2 ARRANJO DO SISTEMA ELÉTRICO

Existe pouca literatura sobre o arranjo do sistema elétrico de um submarino, destacando-se o manual *The Fleet Type Submarine*¹⁸, publicado após a Segunda Guerra Mundial. Nessa abordagem, o banco de baterias é dividido em dois grupos e inserido no fundo do casco, sendo o primeiro grupo localizado a vante e o segundo, a ré. Ambos os grupos ocupam o corpo médio paralelo do casco resistente, como pode ser visto na Figura 33.

¹⁸ Disponível em <http://archive.hnsa.org/doc/fleetsub/index.htm>- Acessado em Janeiro/2019

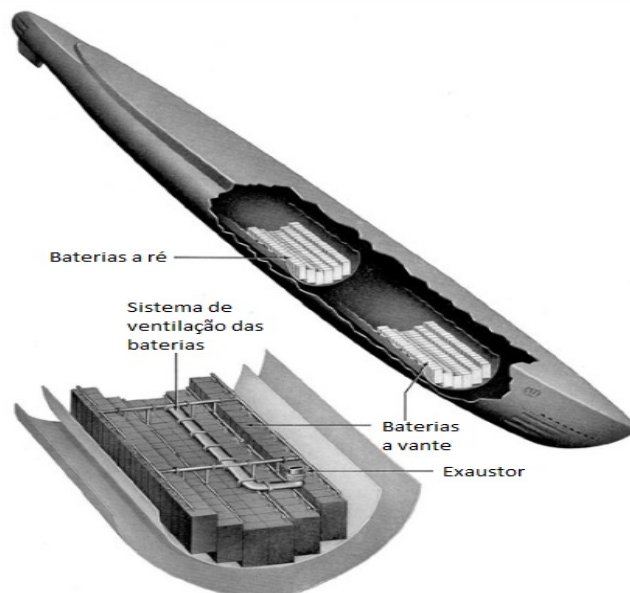
Figura 32 – Sistema de dutos de ventilação e conectores das células de bateria



Fonte: U.S.Navy (1946).

A disposição das baterias é feita de forma a ficarem com o centro de gravidade o mais baixo possível e mais alinhado com o eixo longitudinal possível, aumentando assim a estabilidade transversal da embarcação (U.S.NAVY, 1946).

Figura 33 – Arranjo das baterias



Fonte: U.S.Navy (1946).

2.9 GERADOR DIESEL

Segundo Pereira (2016) o modelo de geração de energia para um submarino convencional utiliza geradores a diesel para recarregar as baterias.

Para dificultar a detecção, submarinos modernos utilizam um duto denominado esnórquel para absorver ar e expelir os gases da combustão. Tal dispositivo permite que os geradores operem com o submarino estando próximo da superfície, mas ainda totalmente submerso.

Assim, o conjunto energético de um submarino é composto de geradores que transformam combustível em energia mecânica, a qual é convertida em energia elétrica, que por fim é armazenada nas baterias na forma de energia química.

2.10 MOTOR ELÉTRICO

Segundo Harbour (2001) motores elétricos tem sido utilizados pela indústria naval desde os anos 1910. Porém, após a Segunda Guerra Mundial, técnicas de fabricação de engrenagens redutoras tornaram o motor a combustão um eficiente, barato e rápido modo de obtenção de alta propulsão.

Motores elétricos foram e ainda são, fontes de energia utilizadas em submarinos com propulsão diesel-elétrica com baixa necessidade de energia e também sistema auxiliar em submarinos com alta potência.

Na indústria mercante e na indústria de cruzeiros, motores elétricos vem se tornando mais populares. Recentes avanços tecnológicos em propulsão elétrica trouxeram renovações em motores de alta potência para submarinos. A grande vantagem da propulsão elétrica, além de um maior controle na velocidade obtida, é a capacidade de fornecer e transmitir potência com uma baixa emissão de ruído.

Segundo Pereira (2016), o projeto do motor elétrico do submarino é feito visando alcançar a máxima rotação quando o propulsor requer o máximo empuxo. Nas condições de máxima potência, o torque de saída deve ter o mesmo valor do torque do hélice.

Assim, as características principais do projeto de um sistema propulsivo elétrico relacionam-se com o volume da instalação elétrica, níveis de torque fornecido e velocidade angular do eixo.

Em geral, o motor elétrico principal (dito MEP), será de corrente contínua, cujo rotor é acoplado diretamente no eixo do hélice. Sendo assim, o número de motores elétricos é proporcional ao número de hélices, dado que não haverá transmissão, com o intuito de diminuir a assinatura acústica da embarcação. Optou-se por utilizar a eficiência de 85% do motor elétrico, baseado nos valores obtidos em ensaios realizados por Isfahani (2011).

2.11 TRABALHOS RELEVANTES

Conforme discutido na introdução, o caráter bélico associado ao projeto de submarinos dificulta a existência de referências públicas sobre o assunto. Assim, nesta secção é apresentada uma breve revisão bibliográfica a respeito dos métodos empregados no projeto de submarinos.

Entre os primeiros trabalhos modernos destinados ao projeto de submarinos, destaca-se o modelo proposto por Jackson (1992), o qual propõe que a geometria do casco do submarino seja representada por uma forma de gota (incluindo o corpo médio paralelo). O perfil gota ótimo segundo o autor, consiste em uma forma elipsoidal de casco a vante e uma parabólica a ré.

Pereira (2016), a partir das equações propostas por Jackson, desenvolveu um trabalho de mestrado onde propõe um modelo de síntese e otimização para o projeto de um submarino convencional diesel-elétrico. Em seu trabalho, Pereira analisa as soluções obtidas utilizando o modelo de otimização por ele proposto e as características dos projetos de submarinos convencionais atualmente existentes.

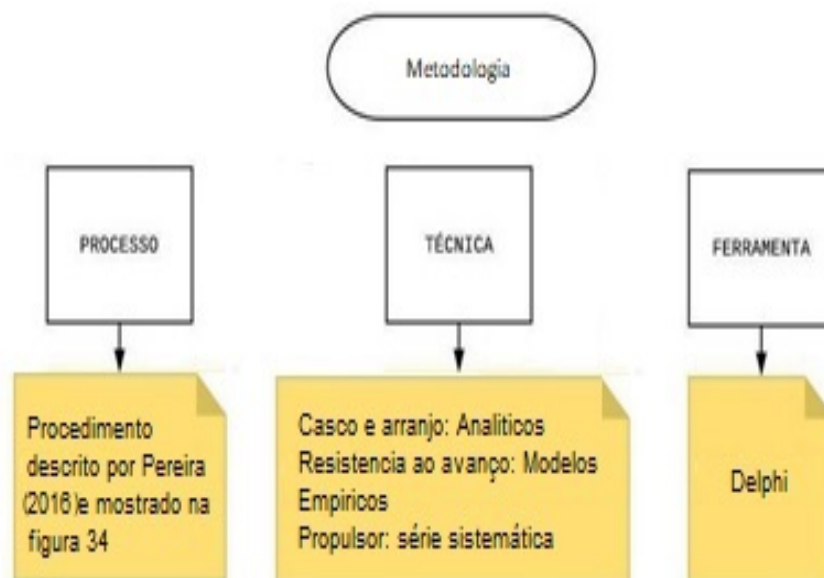
Renilson (2014) publicou um livro com os principais pontos para o projeto de submarinos. Os tópicos abordados incluem: hidrostática, manobrabilidade, resistência ao avanço e sistema de propulsão. O autor revisa conceitos básicos de hidrodinâmica de cascos e sua aplicação em cascos de submarinos, utilizando uma abordagem analítica e resultados experimentais de modelos físicos.

É importante observar que em todos os trabalhos analisados a geometria do casco, o método para estimar a resistência ao avanço e o banco de baterias são similares.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, destacando-se o processo de construção da ferramenta computacional, bem como as técnicas e ferramentas utilizadas no desenvolvimento e na verificação dos resultados (Figura 34).

Figura 34 – Metodologia aplicada neste trabalho



Fonte: Autor(2019)

Destaca-se que a proposta descrita na introdução pressupõe o desenvolvimento de um módulo inicial para o projeto de submarinos, o qual contará com a implementação de técnicas simplificadas baseadas em modelos analíticos e empíricos discutidos no capítulo anterior.

O presente trabalho utilizará o procedimento proposto por Pereira (2016), juntamente com as equações da forma do casco e resistência ao avanço propostas por Jackson (1992). Por fim, também serão utilizados os conceitos e as considerações hidrodinâmicas enunciadas por Renilson (2015).

No entanto, o desenvolvimento deve prever a substituição de ao menos dois módulos importantes. O primeiro módulo, destinado ao cálculo da resistência ao avanço, o qual deve ser substituído pelo trabalho em desenvolvimento pelo aluno Matheus Farah, e que utilizará uma abordagem CFD baseada na ferramenta OpenFOAM para estimar

a resistência ao avanço do casco de um submarino.

O segundo, destinado a seleção de um propulsor de 7 pás da Série B, deverá ser substituído pelo trabalho em desenvolvimento pelo aluno Felipe Lemes, o qual permitirá o projeto de propulsores quaisquer utilizando análise numérica baseada em linhas de sustentação.

A ferramenta utilizada em todo o desenvolvimento será o Delphi, cuja escolha se deve a versatilidade, robustez e capacidade de modelagem 3D disponíveis. A licença utilizada no desenvolvimento foi a Community Edition disponível gratuitamente no site do desenvolvedor.

Inicialmente será realizada a implementação de uma interface gráfica na linguagem Delphi, que auxilie na entrada e exibição de dados; além de permitir a visualização dos resultados do projeto. Essa interface deve ser capaz de abranger todas as etapas do projeto do submarino e será dividida em quatro partes: desenho do casco, resistência ao avanço, planta elétrica e arranjo.

Uma variável do tipo estrutura de dados será utilizada para armazenar os dados relativos ao desenho do casco. Essa variável conterá parâmetros pertinentes a embarcação, tais como: massa, material e dimensões.

O desenho do casco possuirá uma janela específica para entrada de dados (coeficientes de forma, comprimento e diâmetro). Esses valores ao serem inseridos na ferramenta, geram automaticamente um modelo tridimensional do casco utilizando a formulação descrita na seção 2.3.

Os dados referentes ao casco da embarcação são armazenados na forma de uma matriz tridimensional, com dimensões de escala na longitudinal, transversal e ao longo do eixo vertical de 1:1, 10:1 e 10:1¹ respectivamente.

A resistência ao avanço possuirá uma janela sem parâmetros de entrada, pois as dimensões da embarcação são informadas na janela de desenho de casco. Nessa janela é exibido o gráfico da resistência ao avanço da embarcação, considerando uma variação de velocidade entre 0 e 20 nós. A formulação utilizada na estimativa da resistência ao avanço foi apresentada na seção 2.5.

A seguir o propulsor da Série B de 7 pás é selecionado resolvendo o modelo matemático descrito na seção 2.6.1.3, utilizando um algoritmo de força bruta. A ferramenta irá simular todas as hipóteses de projeto, dentro dos limites da série, e selecionar a melhor opção. O resultado referente a curva de desempenho do propulsor selecionado é mostrado ao lado da curva de resistência ao avanço, destacando-se o ponto de operação do sistema.

Na janela seguinte são selecionados os componentes da planta elétrica:

¹ O tamanho da matriz esta associada diretamente com a demanda de memória que será utilizada pelo sistema. Os valores foram escolhidos com o intuito de discretizar de maneira mais eficiente os componentes ao longo dos três eixos.

baterias, geradores diesel e motores elétricos. O dimensionamento de tais elementos considera a resistência ao avanço e a eficiência do sistema propulsivo.

Por fim, o arranjo e a distribuição de pesos são feitos automaticamente pela ferramenta após o dimensionamento dos elementos que compõe o sistema

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento realizado com base na metodologia descrita no capítulo anterior e nos fundamentos apresentados no capítulo 2.

A ferramenta desenvolvida segue o procedimento mostrado no fluxograma da Figura 35, onde a partir dos requisitos de projeto, a ferramenta atribui valores dentro das limitações das séries, estabelecendo, ao final do projeto, o resultado otimizado.

Conforme discutido anteriormente, o projeto do hélice de um submarino visa a diminuição de ruído e vibração. Nesse intuito, o desenvolvimento proposto utiliza um hélice 7 pás com um diâmetro variando entre 30% e 60% do diâmetro do casco externo. Tais valores foram adotados por representarem os limites existentes nos gráficos das figuras 26 e 27.

Assim, a ferramenta determina o J de operação que maximiza a eficiência do hélice respeitando o critério de cavitação, além de dimensionar a planta elétrica e a praça de máquinas do submarino.

O algoritmo de otimização do hélice tem como objetivo encontrar a melhor combinação possível dos parâmetros: Diâmetro do propulsor, $\frac{P}{D}$ e $\frac{A_e}{A_o}$ que maximizam a eficiência do propulsor. O procedimento proposto, varia o passo de 0.5 à 1.3, o diâmetro do hélice de 0.3 à 0.6 do diâmetro do casco e a razão de áreas entre 0,3 e 1,05. Todos os parâmetros foram variados com incrementos de 0.1 a cada iteração.

O motor elétrico é escolhido automaticamente logo após a escolha dos geradores, sem o auxílio do usuário, a partir de um catálogo proposto por Pereira (2016) já inserido na ferramenta.

4.1 Geometria do casco

A aba Desenho do Casco (Figura 36) é o ambiente criado para o usuário informar as dimensões principais do submarino (comprimento, diâmetro, coeficientes de forma e profundidade de operação). Os limites das dimensões principais a serem inseridas, bem como as respectivas unidades são mostrados na tabela 4.

O diâmetro mínimo é justificado por Renilson (2015). Segundo o autor, diâmetros abaixo de 10 metros implicam em falta de espaço para o arranjo interno. O valor de comprimento mínimo é derivado das soma das equações que resultam no comprimento a ré e a vante do casco (equação 2.3 e 2.4 respectivamente). Os limites

Figura 35 – Fluxograma do projeto do sistema propulsivo de um submarino



Fonte: Autor(2019).

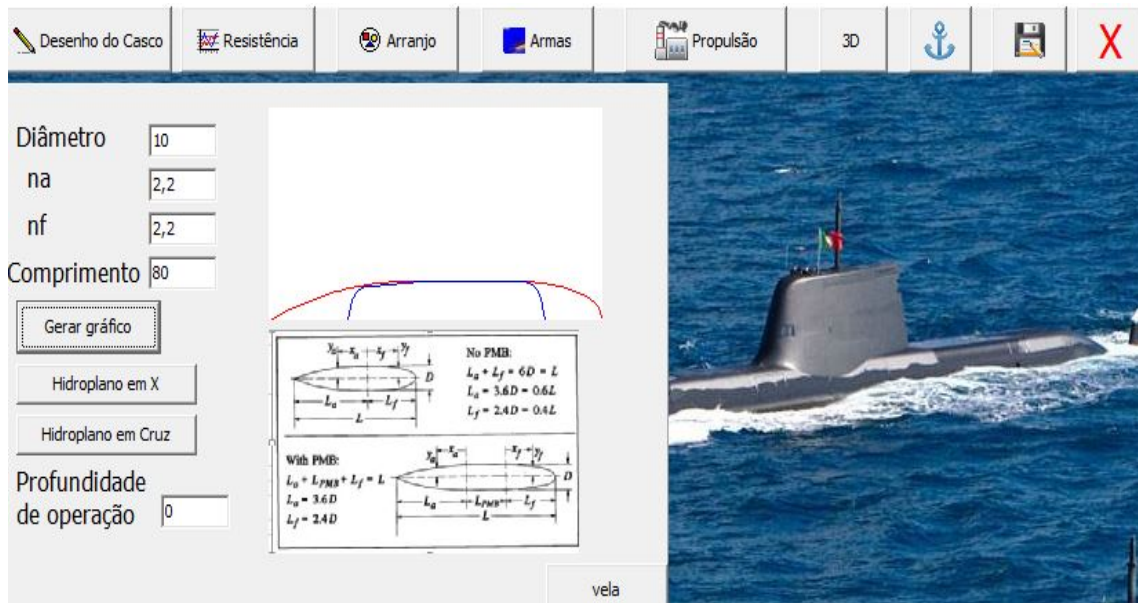
dos coeficientes n_a e n_f são estabelecidos devido a forma final do casco em valores abaixo de 1 tender a zero, o que acarretaria em graves anomalias na forma do casco. O valor $10 \geq n_f$ é relativo à limitações impostas também pela modelagem do casco.

Tabela 4 – Dados do modelo

Entrada	Limites	Unidade
Diâmetro	Diâmetro ≥ 10	metros
Comprimento	Comprimento $\geq 6 \cdot$ Diâmetro	metros
n_a	$n_a \geq 1$	adimensional
n_f	$10 \geq n_f \geq 1$	adimensional
Profundidade	Profundidade \geq Diâmetro	metros

Fonte Autor(2019).

Figura 36 – Aba - Dimensões principais



Fonte: Autor(2019).

O botão gerar gráfico cria uma matriz de pontos tridimensional com as dimensões principais da embarcação. Em seguida inicia-se uma rotina que determina a linha do casco interno e externo, baseado nas equações descritas anteriormente neste trabalho (Seção 2.3). A partir da revolução dessas linhas em torno do eixo longitudinal da embarcação, são geradas as superfícies do casco interno e do caso externo e então o casco é modelado na matriz de pontos¹.

O corpo gerado é dividido em pontos materiais que representam 10^5 cm^3 do casco. Tais pontos materiais são dispostos em uma matriz, que além das coordenadas espaciais, possuem as propriedades de massa de cada ponto.

O sistema de coordenadas utilizado na ferramenta considera que o eixo x encontra-se alinhado com o comprimento da embarcação, o eixo y com a boca e por fim, o eixo z encontra-se alinhado com o pontal da embarcação (Figura 37).

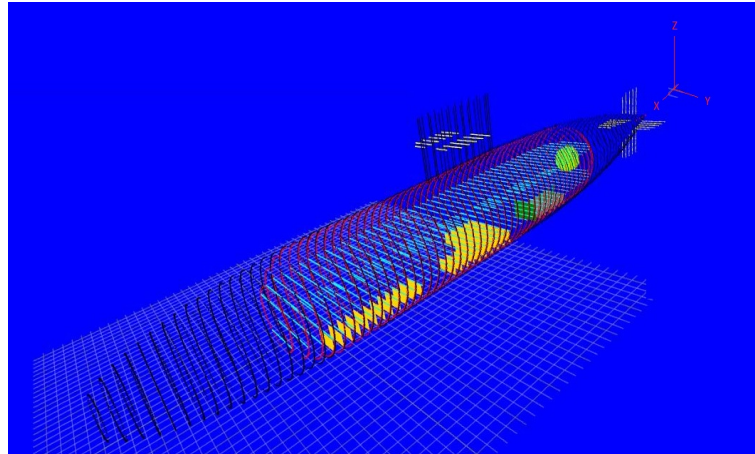
Esta aba também possui a opção de inserir hidroplanos dispostos de duas formas: Em cruz e em X. Esse tipo de mudança afeta diretamente a manobrabilidade da embarcação, mas esse assunto não será abordado neste trabalho.

A aba também possui a opção para o dimensionamento da vela do submarino

¹ O procedimento de gerar o casco a partir de uma matriz com as dimensões principais da embarcação assemelha-se ao processo utilizado por escultores de estátuas de mármore do renascimento. O escultor Michelangelo disse ao ser questionado sobre o procedimento seguido por ele para realizar uma escultura que a esta sempre esteve lá. O que ele fazia era retirar o excesso de mármore do bloco. Nas palavras de Michelangelo:

“Vi um anjo no bloco de mármore e simplesmente fui esculpindo até libertá-lo”. Lewis (2007)

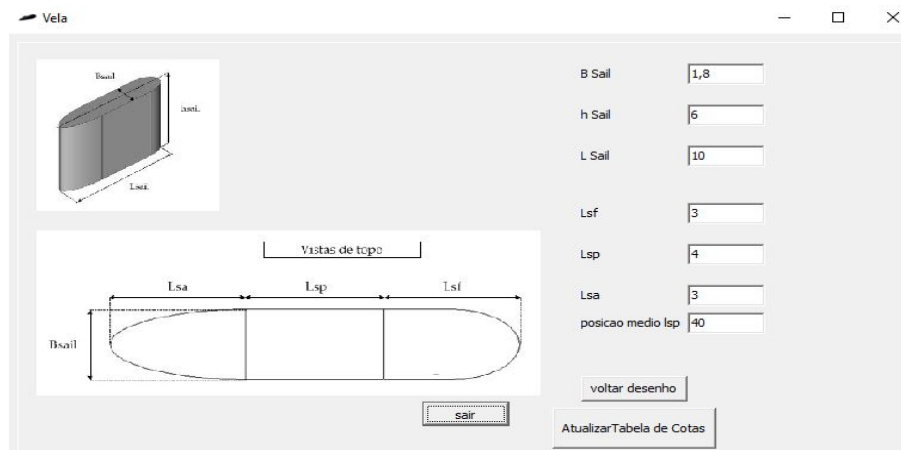
Figura 37 – Submarino em perspectiva



Fonte: Autor(2019).

(Figura 38). A vela tem influência direta na resistência ao avanço da embarcação e no arranjo dos mísseis verticais (não tratados neste trabalho).

Figura 38 – Aba - Dimensões da vela



Fonte: Autor(2019).

A seguir o volume da embarcação é estimado com o auxílio de um algoritmo de buscas. O algoritmo desenvolvido percorre todas as dimensões da matriz de pontos, somando os volumes de cada ponto no interior do casco. Desta forma, obtém-se um valor aproximado do volume que o corpo desloca de água. Nas figuras 39, 40 e 41 são mostradas planificações feitas na matriz de pontos que representa a embarcação, a fim de facilitar a compreensão do método utilizado.

Os cortes foram realizados estrategicamente em posições onde é possível observar a existência da vela objetivando incluí-la na representação.

Na Figura 39 é ilustrado um corte no plano (x,y) da embarcação de 80 metros de comprimento e 10 metros de diâmetro.

Figura 39 – Planificação da embarcação a partir da matriz de pontos- Eixo [x,y]



Fonte: Autor(2019).

A Figura 40 ilustra um corte no plano (x,z) da mesma embarcação. Estão presentes elementos como a forma do casco, a posição da vela ao longo da longitudinal e o comprimento entre perpendiculares.

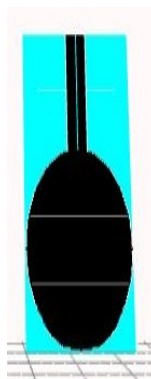
Figura 40 – Planificação da embarcação a partir da matriz de pontos - Eixo [x,z]



Fonte: Autor(2019).

A Figura 41 é mostrada a planificação do plano y,z da embarcação. Nessa figura é possível se ter ideia de informações sobre a vela como altura, largura e disposição ao longo da circunferência, além do diâmetro do casco. Também esta presente o modelo de forma circular para o casco adotada neste trabalho.

Figura 41 – Planificação da embarcação a partir da matriz de pontos - Eixo [y,z]



Fonte: Autor(2019).

Na abordagem matricial desenvolvida, os pontos pertencentes a superfície ocupada pela embarcação (casco, vela, motores, baterias...) são representados em preto nas imagens, enquanto os pontos em azul representam posições da matriz que possuem massa nula.

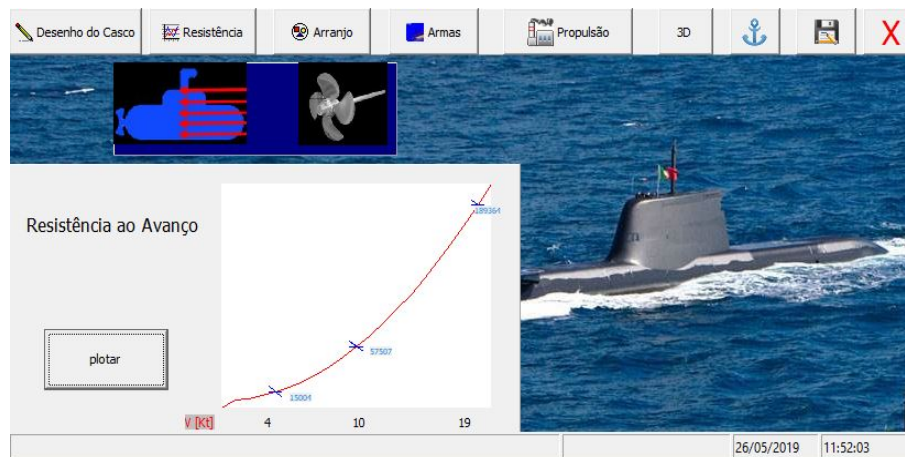
Na figura 40 é possível observar que a matriz de pontos se estende a ré da embarcação. Isso foi feito para que, em trabalhos futuros, possam ser incluídas as linhas do hélice.

4.2 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Com as dimensões principais definidas, a ferramenta é capaz de estimar a resistência ao avanço da embarcação, utilizando-se a formulação discutida na Seção 2.5 deste trabalho. Na Figura 42 é mostrado um exemplo de uma análise realizada em uma embarcação de 80 metros de comprimento e 10 metros de diâmetro.

Existem 3 pontos marcados estrategicamente no gráfico da Figura 42, os quais são baseados em projetos existentes na literatura. Segundo Pereira (2016), a velocidade típica de cruzeiro de um submarino é cerca de 4 nós, enquanto que a velocidade máxima é de cerca de 20 nós. Por fim, inclui-se o ponto relativo a velocidade de 10 nós a fim de enriquecer a análise.

Figura 42 – Resistência ao avanço



Fonte: Autor(2019).

4.3 DIAGRAMA de ÁGUAS LIVRES e CURVAS DE BURRIL

Uma vez obtida a curva de resistência ao avanço, é possível determinar o hélice ideal conforme descrito na fundamentação teórica e na metodologia deste trabalho.

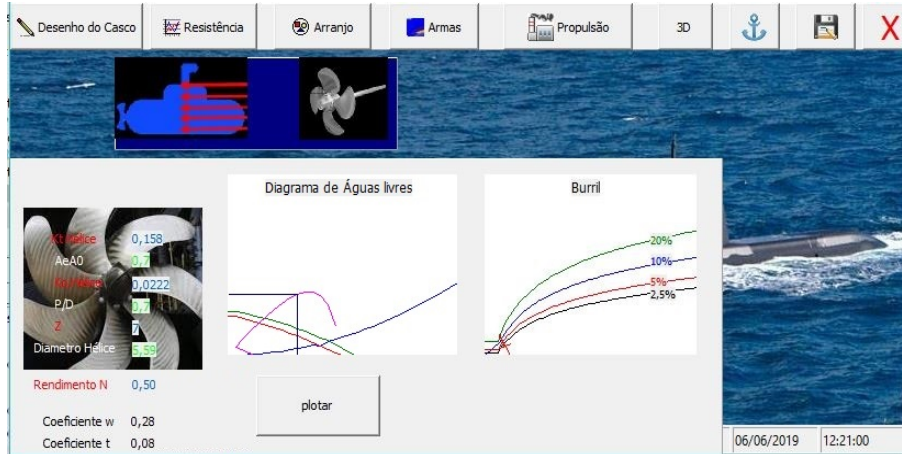
Na Figura 43 é mostrado o resultado do processo de otimização realizado para uma embarcação de 80 metros de comprimento e 10 metros de diâmetro, e cuja resistência ao avanço foi mostrada na secção anterior.

O principal resultado mostrado nessa etapa consiste na definição das características do hélice otimizado, bem como no diagrama de águas livres do propulsor. Por fim é mostrado o diagrama de Burril bem como os pontos de operação do propulsor representados em ambos os gráficos.

A curva K_q , K_t e rendimento do hélice estão representadas no diagrama de águas livres na cor verde, vermelha e roxa respectivamente. Já o ponto de operação é marcado com um X em vermelho no diagrama de Burril. Pode-se observar que no

exemplo da Figura 43, o hélice foi projetado para atender a um limite de cavitação de 5%.

Figura 43 – Diagrama de Águas Livres - Diagrama de Burril



Fonte: Autor(2019).

4.4 SISTEMA ELÉTRICO

O dimensionamento das baterias é feito partindo da potência necessária para movimentar a embarcação na velocidade pretendida (Equação 4.1). A seguir são feitas considerações quanto a eficiência do motor elétrico responsável por entregar o torque necessário para o hélice gerar a propulsão, a eficiência do hélice e a autonomia do submarino, as quais são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Eficiências e autonomia

Autonomia	Requisito de projeto
Eficiência do hélice	Resultado da etapa 4.3
Eficiência do motor elétrico	85% como discutido na secção 2.10

Fonte Autor(2019).

A potência individual por célula é calculada pelo produto da corrente com a tensão elétrica que cada célula possui (Equação 4.1).

$$Pot_{cel} = I_{cel} * V_{cel} \quad (4.1)$$

Onde:

- Pot_{cel} : representa a potência gerada por célula;
- I_{cel} : representa a corrente gerada por célula;
- V_{cel} : representa a tensão gerada por célula.

A quantidade de baterias calculadas será multiplicada por um fator que relaciona a autonomia por célula considerando a autonomia da embarcação. Essa

razão é calculada fazendo uso da equação 4.2.

$$R_{autonomia} = \frac{Autonomia_{sub}}{Autonomia_{cel}} \quad (4.2)$$

Onde:

- $R_{autonomia}$: representa a razão entre autonomia da embarcação e da célula de bateria;
- $Autonomia_{sub}$: representa a autonomia da embarcação;
- $Autonomia_{cel}$: representa a autonomia da célula de bateria.

A potência necessária para mover a embarcação é calculada pela equação

$$Pot_{total} = \frac{Resistenciacasco * Velocidade}{\eta_h * \eta_{motor}} \quad (4.3)$$

Onde:

- Pot_{total} : representa a potência necessária para mover a embarcação;
- η_h : representa a eficiência do propulsor;
- η_{motor} : representa a eficiência do motor elétrico.

Por fim, obtém-se o número de células dos bancos de baterias pela equação 4.4.

$$N_{células} = \frac{Pot_{total}}{Pot_{cel}} * R_{autonomia} \quad (4.4)$$

Onde:

- $N_{células}$: número de células de bateria.

O banco de baterias foi dividido em duas partes, conforme arranjos propostos por U.S.Navy (1946). A quantidade de baterias foi dividida considerando-se que 40% das baterias estão localizadas a ré, e os 60% restantes, estão localizados a vante da embarcação. Tal configuração tem o intuito de uniformizar longitudinalmente a carga, baixar o centro de gravidade das células e garantir a redundância do sistema.

Uma maior porcentagem de baterias em um único banco implicaria em um empilhamento desnecessário, conseqüentemente, a elevação do centro de gravidade da embarcação. A menor porcentagem de baterias a ré deve-se a presença da motorização, a qual representa uma porcentagem significativa da massa no interior do corpo.

Para um dimensionamento mais preciso, Pereira (2016) sugere a partir de uma análise estrutural e de equilíbrio de corpo, o rearranjo dos elementos, a fim de buscar a solução otimizada para o posicionamento dos sistemas a bordo.

As alternativas para a escolha dos Diesel Geradores inclusos na ferramenta são listadas no Apêndice D. Elas foram adaptadas a partir de modelos dos fabricantes Wartsila e Caterpillar retirados de catálogos disponíveis na internet.

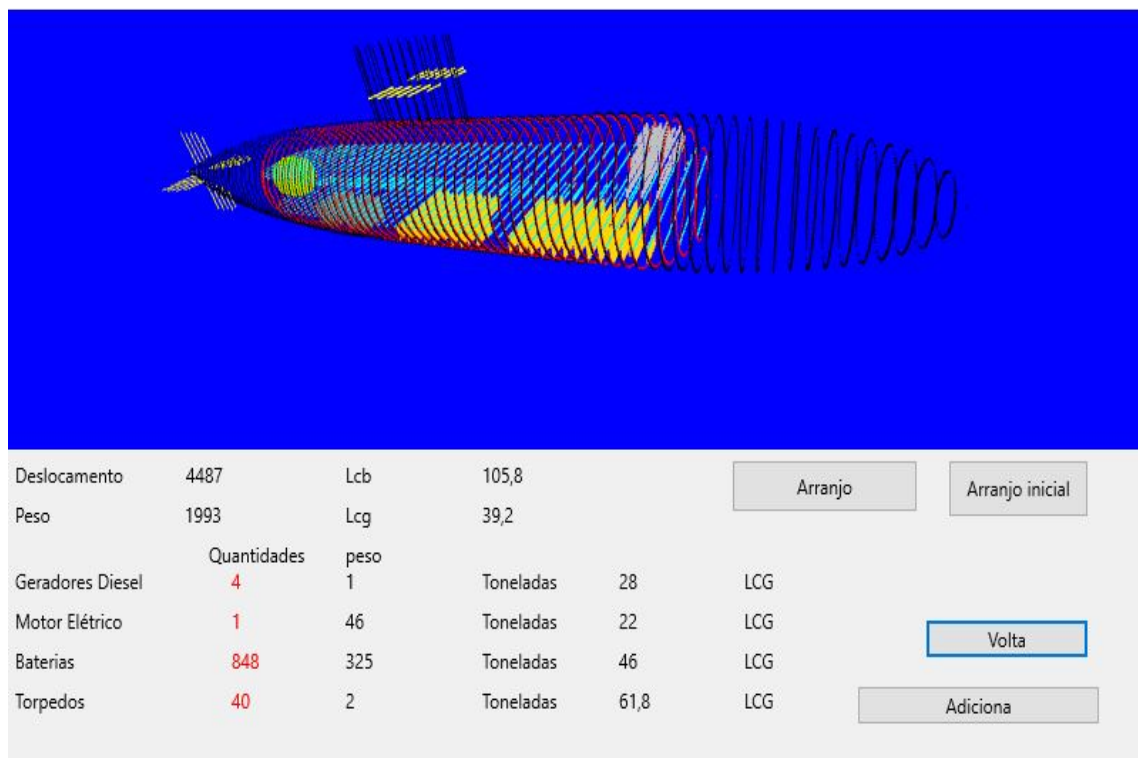
Os diesel geradores são organizados em grupos de pares ao longo da longitudinal do submarino, a fim de manter a simetria transversal e distribuir o

peso atuante no casco. Caso o número de geradores seja ímpar, a ferramenta automaticamente adiciona um gerador na linha central entre os geradores posicionados simetricamente.

4.5 ARRANJO

Após o dimensionamento do sistema propulsivo, há uma janela denominada arranjo (Figura 44) onde o usuário pode verificar como ficou a posição longitudinal de cada elemento. Nessa janela também é mostrado um esboço da embarcação o qual inclui os diversos itens alocados ao longo do projeto.

Figura 44 – Tela de arranjo da ferramenta

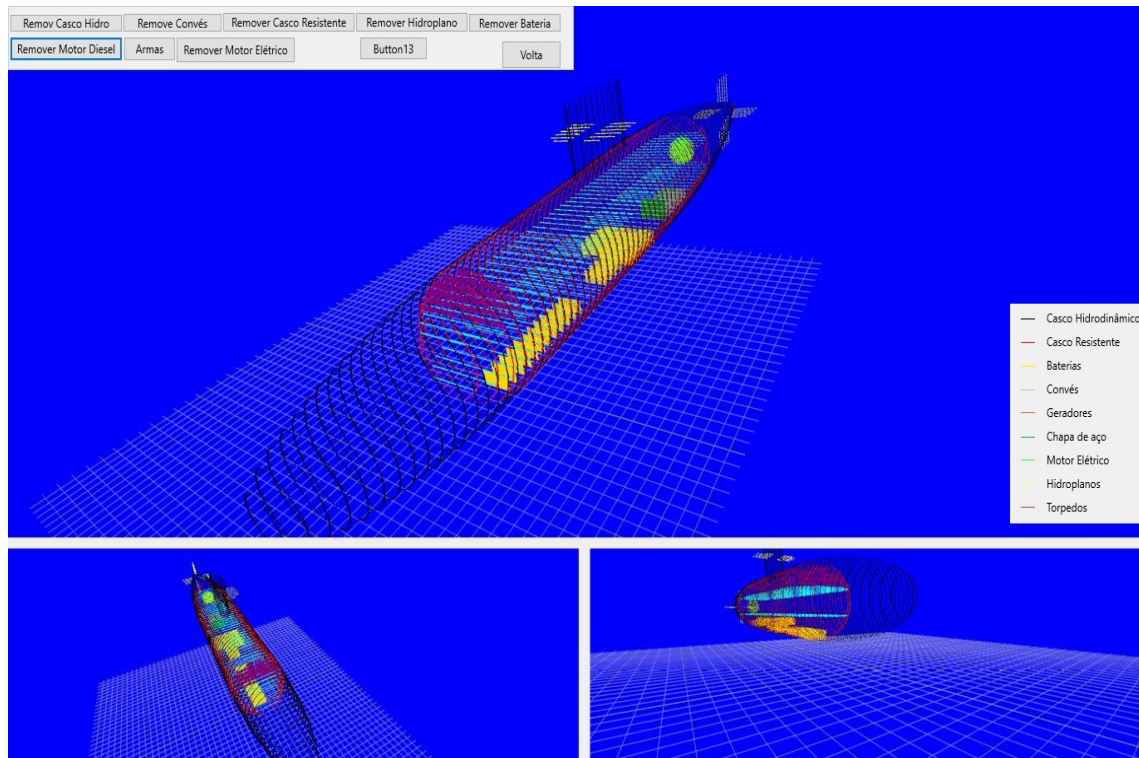


Fonte: Autor(2019).

O arranjo também pode ser observado através do ambiente 3D contido na aba denominada 3D. Nessa janela, existem 3 câmeras dispostas em posições diferentes, de maneira que o usuário possa visualizar o projeto de diferentes ângulos simultaneamente. Na Figura 45 é mostrada a janela 3D contendo a representação feita a partir de um submarino de 80 metros de comprimento e 10 metros de diâmetro utilizado como exemplo. Nessa imagem é ilustrado os componentes da embarcação, seguindo as cores apresentadas na legenda da figura.

$$NUMERO_{ger} = \frac{Pot_{celula} * N_{celulas}}{Pot_{ger}} \quad (4.5)$$

Figura 45 – Arranjo janela 3D



Fonte: Autor(2019).

4.6 VERIFICAÇÃO DA FERRAMENTA

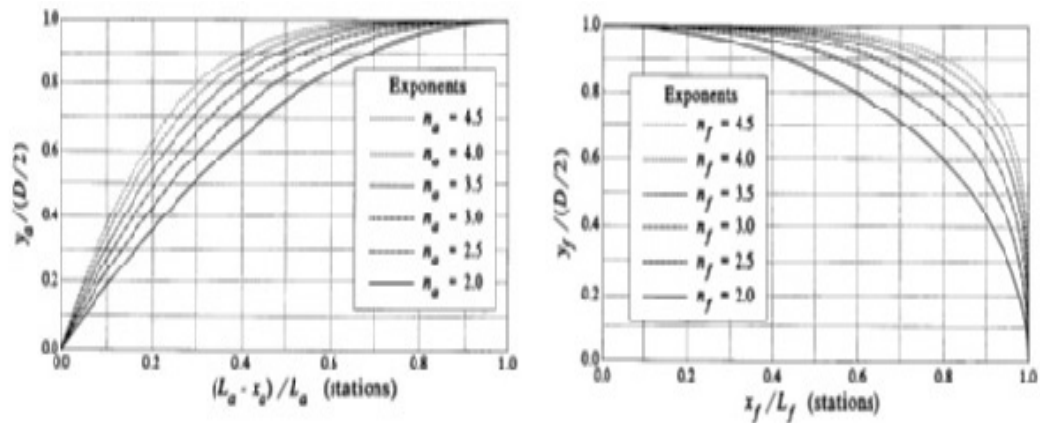
Neste capítulo, inicialmente, são mostrados os procedimentos de verificação realizados na ferramenta desenvolvida. A seguir são mostrados três exemplos de aplicação, nos quais são realizados o projeto conceitual de três embarcações diferentes.

4.6.1 Geometria do casco

Em Jackson (1992) são mostradas as influências dos coeficientes n_a e n_f (Figura 46) nas linhas do casco de um submarino.

Na Figura 47 são mostradas as curvas geradas na ferramenta sobrepostas às curvas de mesmos coeficientes propostas por Jackson (1992). É visível a proximidade dos valores encontrados com aqueles observados na literatura.

Figura 46 – Geometria do casco resistente



Fonte: Jackson (1992).

Os valores também foram verificados a partir de uma simulação de um submarino com dimensões especiais², no intuito de se obter valores de altura de baliza para as posições contidas na tabela do Apêndice B. Essa comparação é mostrada na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação da altura das balizas geradas na ferramenta com a literatura (a vante e a ré)

$\frac{x_a}{L_a}$	$\frac{y_a}{D/2}$ Literatura	$\frac{y_a}{D/2}$ simulado	erro	$\frac{x_f}{L_f}$	$\frac{y_f}{D/2}$ Literatura	$\frac{y_f}{D/2}$ simulado	erro
1	0,0000	0,0000	0,000	1	0,000	0,000	0
0,9	0,1892	0,1900	0,004	0,9	0,430	0,430	0,000
0,8	0,3586	0,3600	0,004	0,8	0,600	0,590	0,017
0,7	0,5082	0,5100	0,004	0,7	0,710	0,710	0,000
0,6	0,6379	0,6400	0,003	0,6	0,800	0,799	0,001
0,5	0,7478	0,7500	0,003	0,5	0,860	0,750	0,128
0,4	0,8379	0,8400	0,003	0,4	0,917	0,860	0,062
0,3	0,9082	0,9100	0,002	0,3	0,954	0,954	0,000
0,2	0,9586	0,9600	0,001	0,2	0,980	0,970	0,010
0,1	0,9892	0,9900	0,001	0,1	0,995	0,995	0,000
0	1,0000	1,0000	0,000	0	1,000	1,000	0,000

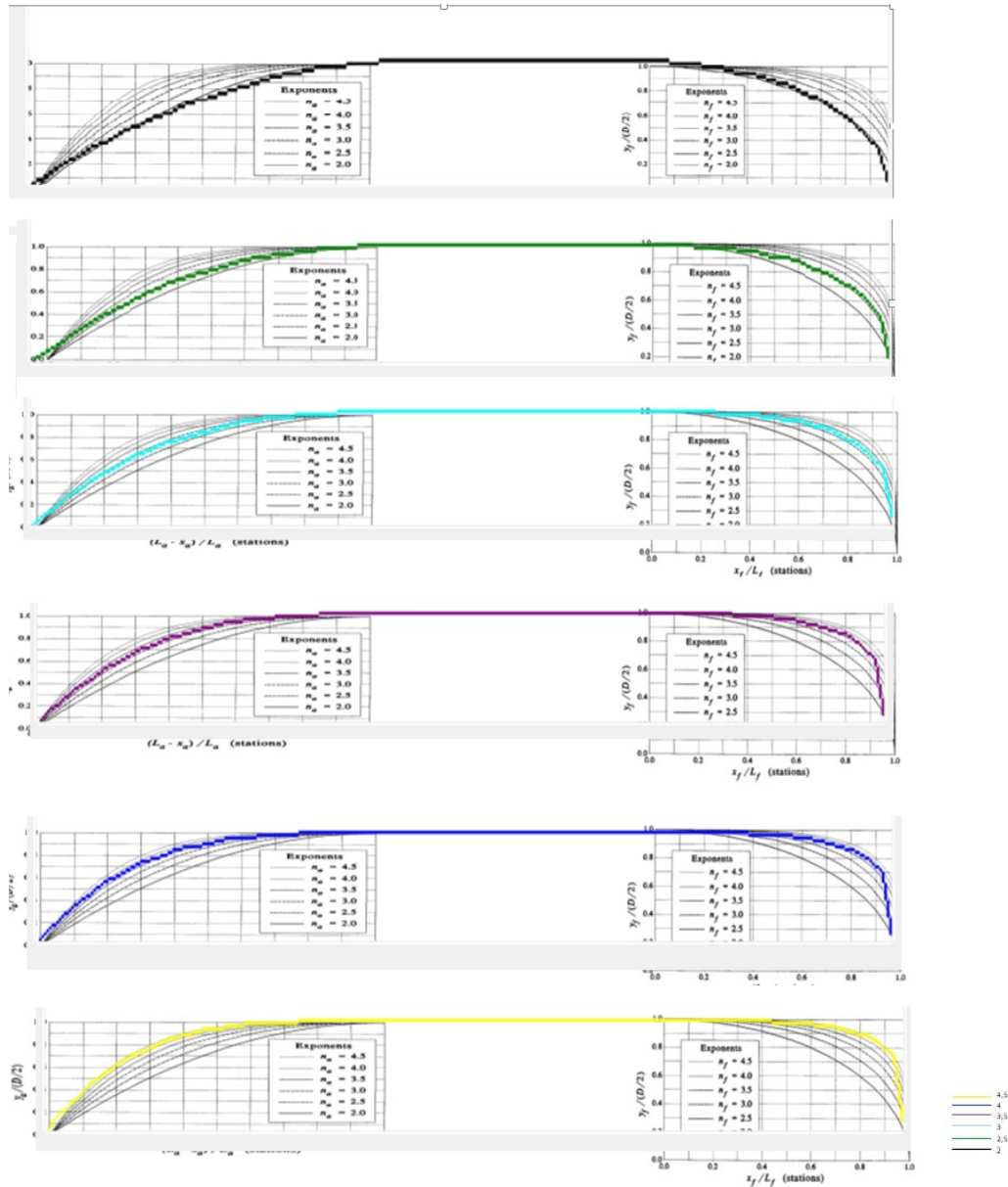
Fonte Autor(2019).

O volume do casco é estimado de acordo com a equação proposta por Jackson, onde segue o cálculo da equação 4.9, resultando em 4487 m^3 . Volume a ré:

$$V_a = \pi(D/2)^2[C_{pa} * 2,4 * D] \quad (4.6)$$

² Valores de comprimento e diâmetro que gerem pontos em posições próximas aos pontos fornecidos por Jackson (1992)

Figura 47 – Curva da linha do casco geradas no software



Fonte: Autor(2019).

volume a vante:

$$V_f = \pi(D/2)^2 [C_{pf} * 3,6 * D] \quad (4.7)$$

Volume corpo médio paralelo:

$$V_{pmb} = \pi(D/2)^2 [L - 6D] \quad (4.8)$$

volume total:

$$V_t = V_{pmb} + V_f + V_a \quad (4.9)$$

A integral dos volumes ao longo do casco resultou em 4633 m^3 , representando uma diferença de 146 m^3 , ou 3% em relação à equação proposta por Jackson.

4.6.2 Resistência

A Tabela 7 contém os valores intermediários do cálculo da força propulsiva necessária para mover o casco à velocidade pretendida para um submarino de 80 metros de comprimento, 10 metros de diâmetro, na e nf iguais a 2,2.

Tabela 7 – Valores intermediários do cálculo da força propulsiva

Velocidade	C_f	C_r	ΔC_f	$A_A C_{DA}$	k2	k1	ct
4 nós	0,0019	0,0012	0,0004	0,8	1,55	2,29	$3,510^{-3}$
10 nós	0,0017	0,0012	0,0004	0,8	1,55	2,29	$3,3310^{-3}$
20 nós	0,0015	0,0012	0,0004	0,8	1,55	2,29	$3,1910^{-3}$

Fonte Autor(2019).

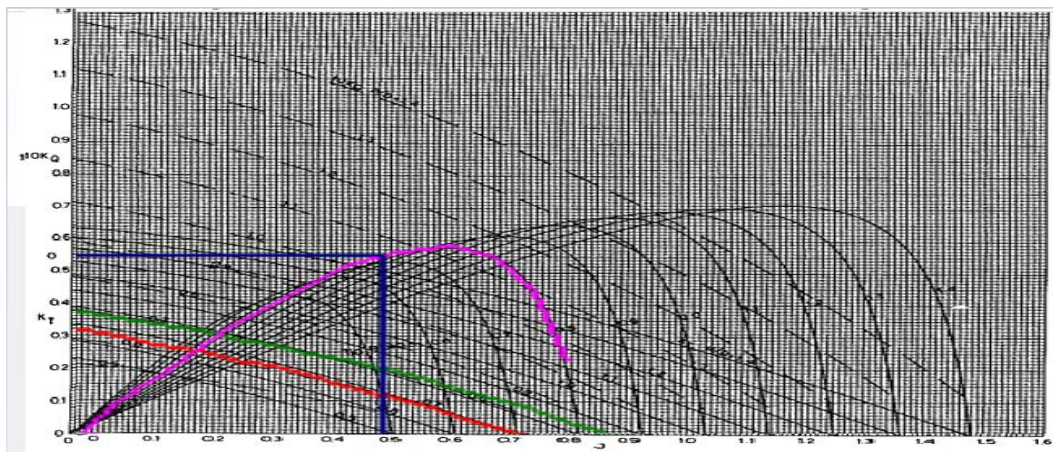
Os valores contidos na Tabela 7 demonstram a variação da parcela de resistência viscosa, descrita no capítulo 2.5. Sendo a resistência friccional inversamente dependente do número de Reynolds, o seu decréscimo está associado diretamente ao aumento da velocidade da embarcação.

4.6.3 Seleção do propulsor

Assim como as curvas de casco e o módulo de resistência ao avanço, o módulo de seleção do propulsor precisa ser verificado, para que se possa averiguar sua coerência entre o método tradicional e o algoritmo implementado.

A verificação consistiu na análise da curva modelada que representa as eficiências dos hélices da série B. Para isso exportou-se a imagem da curva gerada na ferramenta e sobrepôs se com o gráfico original de um conjunto de hélices sistemáticas de Wageningen, como pode ser visto na Figura 48.

Figura 48 – Verificação do hélice



Fonte: Jackson (1992).

A curva de eficiência do propulsor (roxa) sobreposta à curva original da série

não apresenta nenhuma diferença aparente, assim como as curvas K_T (vermelha) e $10K_Q$ (verde).

4.6.4 Exemplos de aplicação da ferramenta desenvolvida

Com o uso da ferramenta desenvolvida, foram desenvolvidos três modelos de submarinos, cujas dimensões são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características dos exemplos modelados

Nome	Comprimento	Diâmetro	na	nf
Modelo 1	105	15	2,2	2,2
Modelo 2	80	10	2,2	2,2
Modelo 3	160	20	2,2	2,2

Fonte Autor(2019).

Os resultados das análises realizadas na ferramenta são mostrados na Tabela 9. Esses modelos foram todos gerados com o mesmos coeficientes n_a e n_f a fim de se obter uma variação da potência requerida sem variar a forma do casco.

Tabela 9 – Dados simulados retirados do software

Dados	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Comprimento [m]	80	80	160
Diâmetro [m]	7	10	13
na	2,2	2,2	2,2
nf	2,2	2,2	2,2
Potência (20 kt) [kW]	2108	2925	8793
Potência (4 kt) [kW]	19,6	27,3	82,0
autonomia	20 dias	20 dias	20 dias
Número de Células	698	968	2910
Quantidade de Motores	6	3	7
AE/A0	1	1	1
Kt	0,268	0,181	0,21
KQ	0,0572	0,0247	0,045
P/D	1,3	1,3	1,3
Z	7	7	7
Diâmetro do hélice [m]	4	5,6	7,7
Eficiência do hélice	0,67	0,72	0,7
coeficiente w	0,36	0,28	0,32
coeficiente t	0,15	0,080	0,12

Fonte Autor(2019).

Também optou-se por colocar o gerador de 1MW nos modelos 1 e 3 e 1,5MW no modelo 2, cujos detalhes podem ser vistos no apêndice H. Embora na prática não seja prático o uso de muitos motores, a expectativa era mostrar a flexibilidade e robustez

da ferramenta desenvolvida.

No caso da embarcação de 80 metros de comprimento e 7 metros de diâmetro, a ferramenta estimou 3 geradores, 3 geradores para a embarcação de 80 metros de comprimento e 10 de diâmetro e 7 geradores para a embarcação de 160 metros de comprimento. Para baterias, utilizou-se o modelo Oberon UK nos três casos.

Nos três casos faz se notável valores de área expandida, diâmetro do propulsor e razão de passo por diâmetro estarem próximos ao valor máximo permitido pela série. Isso se deve ao fato de quem tratando-se o submarino de um a embarcação projetada para operar em regime submerso, o hélice fica menos suscetível à cavitacão.

Para os estudos realizados, seguiu-se a sugestão de Blizzard et al. (2008), que considera 30 metros como a profundidade base para o cálculo de cavitação. No entanto, recomenda-se que em trabalhos futuros, tal valor seja explorado, buscando identificar o comportamento do sistema em função da profundidade de operação do submarino.

Por fim, verificou-se a influência da autonomia no projeto do sistema elétrico do submarino. Realizou-se uma análise paramétrica utilizando os dados referentes ao modelo 2, a qual é mostrada na tabela 10.

O número de células para a potência máxima (20 nós) por um período de 4 horas foi estimado em 825 células de bateria. O que implica que para uma autonomia abaixo de 15 dias, a demanda de baterias será dimensionada com base na potência máxima, e não na autonomia da embarcação³.

Tabela 10 – Variação do número de células de bateria para velocidade de patrulha em diferentes autonomies

Modelo	10 dias	20 dias 2	25 dias
Modelo 2	484	726	968

Fonte Autor(2019).

³ Na prática isso não acontece, pois a autonomia comumente varia entre 20 e 30 dias (PEREIRA, 2016)

5 CONCLUSÕES

A definição do sistema de propulsão tem elevado grau de importância no projeto final da embarcação, devido a sua influência direta no custo operacional e no desempenho do submarino.

A complexidade inerente ao projeto de um submarino, aliada ao fato dos métodos tradicionais de seleção de hélice envolverem etapas manuais, fazem com que a qualidade do projeto dependa da experiência de arquitetos e projetistas.

Por fim, os rigorosos critérios de cavitação associados ao projeto de um submarino adicionam uma parcela a mais de risco e de complexibilidade ao projeto.

Nesse contexto este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional destinada ao projeto automatizado e otimizado do sistema propulsivo de um submarino do tipo diesel elétrico.

Considera-se que os objetivos propostos foram atingidos. Pois, como mostrado no capítulo anterior, o resultado obtido foi uma ferramenta eficiente e transparente ao usuário, que contém uma interface para a entrada dos requisitos de projeto, um algoritmo para a estimativa da resistência ao avanço, um algoritmo para a seleção otimizada de um propulsor da Série B com 7 pás, um algoritmo para o dimensionamento do sistema elétrico e, por fim, um algoritmo para alocação e verificação do arranjo tridimensional interno do casco.

Por fim é importante destacar que a ferramenta foi construída de modo que os módulos de análise possam ser substituídos facilmente a depender das fases do projeto. Em especial, almeja-se a curto prazo substituir o módulo de estimativa da resistência ao avanço e o modo de análise do propulsor, por módulos baseados em técnicas numéricas em desenvolvimento por outros pesquisadores.

Além da substituição dos módulos de análise, a ferramenta desenvolvida pode ser aprimorada de inúmeras maneiras. Entre as principais, está a otimização do ambiente gráfico 3D, que pode ter o desempenho melhorado, além de permitir a renderização das superfícies modeladas. Um exemplo de tais melhorias pode ser visto no Apêndice I, onde os mísseis de vante são mostrados com as superfícies renderizadas.

Como conclusão final destaca-se que o desenvolvimento realizado, embora vislumbre a resolução automática e automatizada para o projeto conceitual do sistema propulsivo de um submarino, não pretende eliminar o trabalho do engenheiro, mas sim permitir que esse desenvolva projetos mais complexos, integrados e possa explorar um

conjunto maior de alternativas de solução. Por fim, destaca-se que o senso crítico e o conhecimento técnico são fundamentais para que os engenheiros possam avaliar a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ALLMENDINGER, E. **Submersible Vehicle Systems Design**. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990. v. 2.
- AUGUSTO, O. B. **Processo de busca não linear para o projeto da estrutura do navio**. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996. v. 1.
- BAGSHAW, N. E. Submarine battery technology - an aid to electric vehicle battery design? **Journal of Power Sources** — Submarine Power and Propulsion Technology, Ucrânia, n. 1, p. 113–122, 1992.
- BETTLE, M. Validating design methods for sizing submarine tailfins e. **RINA, Royal Institution of Naval Architects - Warship 2014: Naval Submarines and UUV's, Papers**, Canada, n. 1, p. 133–146, 2014.
- BLIZZARD, C. R. et al. **Design Report Ballistic Missile Defense Submarine SSBMD**. Virginia Tech: [s.n.], 2008. v. 1.
- BOGOSIAN, S. N. **Projeto de Concepção de um Navio Patrulha de Formas não Convencionais com características Submersíveis: Viabilidade e Manobrabilidade**. 100 f. Tese ((Doutorado) - Curso de Engenharia Oceânica) — UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, 2005.
- BRASIL. Estratégia nacional de defesa. Brasília, Ministério da Defesa, 2008.
- BRINATI, H. L. **Instalações De Máquinas Marítimas**. [S.l.]: PNV 2324, 2010. v. 1.
- BUCKINGHAM, J. Submarine power and propulsion -application of technology to deliver. **UDT Europe2008**, Glasgow, n. 11, p. 1–17, 2008.
- BURCHER, R. et al. **Concepts in Submarine Design**. [S.l.]: Cambridge University, 1994. v. 2.
- BURRIL et al. **Propeller Cavitation: Further Tests on 16 in Propeller models in the king's College Cavitation tunel**. [S.l.: s.n.], 1962. v. 79.
- CARLTON, J. **Marine propellers and propulsion**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2012. v. 2.
- DUTTON, J. L. Contrarotating electric drive for attack submarines. **Engineers Journal**, p. 45–50, 1994.
- ROBERT W. FOX, A. T. M. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. [S.l.]: Grupo Editora Nacional, 2014. v. 8.

- FRIEDMAN, N. **U.S. Submarines Through 1945: An Illustrated Design History**. [S.l.]: Annapolis: Naval Institute, 1995. v. 1.
- GABLER, U. **Submarine Design**. [S.l.]: Bernard I Graefe, 1986. v. 1.
- GEER, D. **Propeller handbook**. Estados Unidos da America: [s.n.], 1989. v. 1.
- GUERRA, Y. **A Evolução Técnica do Submarino**. São Paulo: Escritório Técnico de Construção Naval: [s.n.], 1964. v. 1.
- HALLIDAY, D. **Funamentos da Física**. [S.l.]: LTC, 2012. v. 1.
- HARBOUR, J. P. **Evaluation and Comparsion of Eletric Propulsion Motors for Submarines**. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Ciência da Computação) — Massachusetts Institute of tecnology, Massachussets, 2001.
- HOLTROP, J. et al. **A statistical power prediction method**. [S.l.]: International Shipbuilding Progress, Outubro 1978. v. 25.
- ARASH H. ISFAHANI, F. A. Mechanical coupled bldc motors for energy saving in submarine application. **Przeglad Elektrotechniczny**, n. 1, p. 316–320, 2011.
- JACKSON, H. A. Fundamentals of submarine concept design. **Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers**, Massachusetts, n. 100, p. 419–448, 1992.
- JOUBERT, P. N. **Some Aspects of Submarine Design Part 1. Hydrodynamics**. [S.l.]: DSTO Platforms Sciences Laboratory, 2004. v. 1.
- KUIPER, G. **the wageningen propeller series**. [S.l.]: Marin Publication, 1992. v. 2.
- LAKOWSKI, R. **U-Boote. Zur Geschichte einer Waffengattung der Seestreitkräfte**. Berlim: Publicação Militar da República Democrática Alemã, 1987. I.
- LASCALA, T. C. **GERAÇÃO GEOMÉTRICA E MODELAGEM AUTOMATIZADA DE PROPULSORES DA SÉRIE-B DE WAGENINGEN**. 145 p. Tese (Graduacao em Engenharia Naval) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- LASHKARI, H. et al. Development of a fish-like propulsive mechanism. p. 389–395, 2010.
- LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture: Resistance, Propulsion and Vibration**. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. v. 1.
- LEWIS, J. P. **Michelangelo's World**. USA: Creative Editions, 2007. v. 1.
- MARK MCGUINNESS, B. B. Submarine lead-acid battery performance. **Australian Submarine Corporation**, Australia, n. 1, p. 1–34, 2003.
- MOLLAND, A. et al. **Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power**. USA: Cambridge University, 2017. v. 2.
- NASSEH, J. Hélices: Os conceitos básicos (parte i). **Revista Náutica**, São Paulo, n. 61, p. 98–100, 1999.

OLIVEIRA, E. F. G. de. **INFLUÊNCIA DOS DEFEITOS GEOMÉTRICOS EXISTENTES NO CASCO ESTRUTURAL DE UM SUBMARINO NA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE OPERAÇÃO**. 100 f. Tese (Graduação em Engenharia Naval) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

PADOVEZI, C. **Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais**. 87 f. Tese (Mestrado em Engenharia Naval) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PEREIRA, M. H. **Modelo de Otimização Multiobjetivo Aplicado ao Projeto de Concepção de Submarinos Convencionais**. 364 f. Tese (Mestrado em Engenharia Naval) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PINHEIRO, T. **Obtenção de torque e empuxo de propulsores através do uso de sistema de medição de eixo por telemetria**. 52 f. Tese (Monografia (Graduação)) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RAMOS, A. d. A. et al. **Influência da variação do comprimento do corpo médio paralelo na resistência ao avanço de um submarino**. Asociación Argentina de Ingeniería Naval, Buenos Aires, 2011.

RENILSON, M. **Submarine Hydrodynamics**. Australia: Londres: Springer, 2015. v. 1.

RUSSO, V. L. et al. **Submarine Tankers**. [S.l.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990. v. 2.

OLIVEIRA SAMPAIO, H. de. **Blog FI 145: aviação e informação**. 2011. Disponível em: <<https://fi145.wordpress.com/>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

SANTOS, E. W. **DIBB – Dimensionador de banco de baterias**. 50 f. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) — UFPR (Universidade Federal do Paraná), Curitiba, 2010.

SILVA, E. C. N. **OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PROJETO DE SISTEMAS MECÂNICOS**. [S.l.]: Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Universidade de São Paulo, 2007. v. 1.

TANCREDI, T. **Otimização multidisciplinar distribuída aplicada a projetos de engenharia**. 190 f. Tese (Tese (Doutorado)) — Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

TELECO. **Energia DC: Capacidade do sistema**. 2019. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbateria/pagina_2.asp>. Acesso em: 17 jan. 2019.

TONACIO, V. C. **AVALIAÇÃO DE PROPULSORES NAVAIS EM RELAÇÃO A EFICIÊNCIA E EXCITAÇÃO DE VIBRAÇÃO**. 109 f. Tese (Mestrado em Engenharia Naval) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

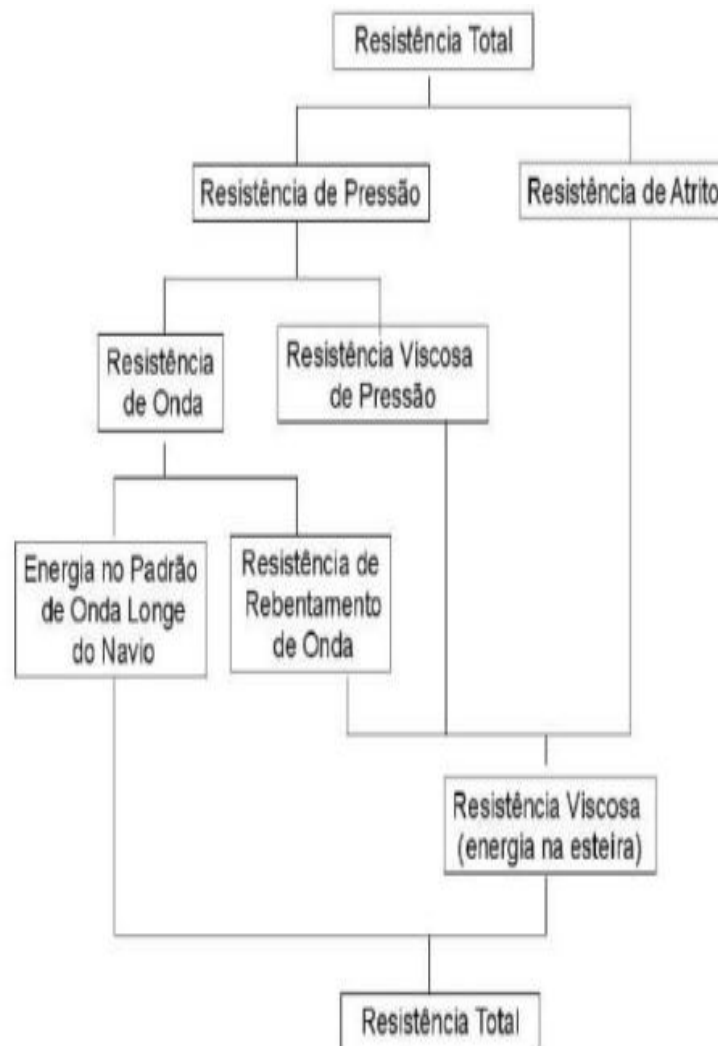
TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: engenharia de máquinas marítimas**. enidh: [s.n.], 2012. v. 1.

U.S.NAVY. **The Fleet Type Submarine**. [S.l.]: Navpers 16160, 1946. v. 1.

WATSON, D. **PRACTICAL SHIP DESIGN**. Nova York: Elsevier, 1987. I.

A PARCELAS DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Na Figura 49 é mostrada a clássica imagem na qual a resistência ao avanço referente ao casco de uma embarcação é dividida segundo diferentes classificações. Figura 49 – Composição da resistência da embarcação



Fonte: Trindade (2012).

Trindade (2012) explica cada uma das forças da seguinte forma:

Na parte superior da figura observa-se a clássica divisão baseada na característica do casco que domina a força de arrasto. Nessa divisão a resistência gerada pelo casco é dividida em resistência friccional (associada a superfície molhada do casco) e a resistência de forma (associada ao volume do casco). Já na parte inferior, a resistência total gerada por um casco é dividida de acordo com o fenômeno físico

causador da força de arrasto. Nessa divisão a resistência é separada entre uma parcela viscosa e uma parcela potencial gravitacional (geração de ondas).

No entanto, independente do agrupamento realizado a força de arrasto de um casco pode ser dividida em três componentes fundamentais, as quais são descritas a seguir.

- Resistência de atrito: ao mover-se no interior de um fluido, um corpo arrasta consigo certa quantidade de água. Dessa forma, a pequena porção diretamente em contato com a superfície move-se com a mesma velocidade que o casco da embarcação. Essa velocidade diminui à medida que o fluido se afasta do casco até alcançar a velocidade nula em regiões distantes do casco (TRINDADE, 2012);
- Resistência de onda: surge devido à padrões de ondas formados na superfície da água, os quais decorrem da variação do campo de pressão no entorno do casco.
- Resistência viscosa de pressão: surge devido ao efeito viscoso do fluido em contato com a superfície do casco, gerando uma distribuição de pressão, que se opõe ao movimento do navio (MOLLAND et al., 2017). Enquanto a resistência friccional representa a força que a água provoca no casco da embarcação, a resistência viscosa de pressão decorre das forças que o casco provoca na água, as quais reduzem a pressão a ré da embarcação.

B FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS

A célula voltaica é um equipamento simples que consiste em um ou mais pares de placas compostas por um tipo de metal ou liga metálica. As placas primárias e secundárias são feitas de materiais distintos que ao serem conectados tem a característica de gerar uma diferença de potencial elétrico. As placas são dispostas de maneira a ficarem intercaladas entre primária e secundária, sendo separadas por um material não condutor. Embora não se encostem fisicamente, as placas são eletricamente conectadas por uma solução eletrolítica sendo esta geralmente composta por uma solução ácida ou alcalina.

A placa para onde os ânions tendem a migrar é chamada ânodo e a placa para onde os cátions tendem a migrar; o cátodo. Devido a diferença elétrica existente entre os materiais, gera-se uma diferença de potencial entre as placas, também conhecida como tensão terminal entre as placas.

Conectando os terminais da bateria, o circuito é fechado e as reações químicas se iniciam. Nessas reações, ocorrem a troca de íons, onde o ânodo sofre oxidação e libera elétrons e no cátodo ocorre uma redução consequentemente o acúmulo de material e passagem de elétrons livres, gerando uma corrente elétrica. Existem três tipos de células denominadas células primárias, secundárias e terciárias. Dentro desses grupos, destaca-se o maior uso de células primárias e secundárias, cujo tem como motivo principal o baixo valor agregado.

Células primárias realizam reações eletroquímicas não reversíveis, o que as torna inutilizáveis após o seu uso. Ou é feita a substituição dos materiais. Seu uso é difundido devido ao baixo preço e facilidade de produção. Os materiais mais comumente usados são o zinco como ânodo, óxido metálico como cátodo e um solução alcalina ou ácida como eletrólito.

As células denominadas secundárias apresentam reações eletroquímica reversíveis, sendo assim, realizam reações de forma que possam ser reutilizadas após a descarga, sem a necessidade de substituição de material. A capacidade de descarga da bateria é medida em Ah (Ampere hora), que quantifica a quantidade utilizável de energia que a bateria pode armazenar na tensão nominal.

Segundo Santos (2010), uma bateria ideal deve possuir 100% de sua capacidade nominal. A partir do momento em que sua capacidade é inferior a 80%, a bateria é considerada inutilizável. A queda da capacidade de uma bateria deve-se a carga e descarga contínua da bateria.

Na figura é mostrado um exemplo da capacidade típica de uma bateria chumbo-ácido. Na tabela, será consumida 15 A por hora para um tempo de 10h ou 72 A por um tempo de 1h.

Figura 50 – Capacidade de uma bateria qualquer

BATERIA	CAPACIDADE EM Ah - Descarga de 1,75V/elemento				
	10h	8h	5h	3h	1h
150Ah/10h	150A	144A	129A	106A	72A

Fonte: (TELECO, 2019)

C BATERIA CHUMBO ÁCIDA

Inventada pelo físico francês Gastón Planté, foi a primeira bateria recarregável criada para o uso comercial. Este tipo de bateria é menos eficiente se comparada com outros tipo que serão iniciadas posteriormente, em questão de peso/energia, porém possuem melhor custo benefício e entre as baterias recarregáveis é a que apresenta melhor eficiência. Também vale citar não possuir o efeito memória, principal problema que altera a vida útil da bateria, o chamado vício de bateria.

Nas baterias chumbo ácido, catodo é composto por dióxido de chumbo (PbO₂), o eletrólito é composto por ácido sulfúrico (H₂SO₄) e o anodo é composto por chumbo (Pb) (Figura 51. No exemplo, cada célula produz em média 2V, sendo assim necessária 6 células conectadas para produzir 12V.

Figura 51 – Meia reação de descarga de uma bateria chumbo ácida

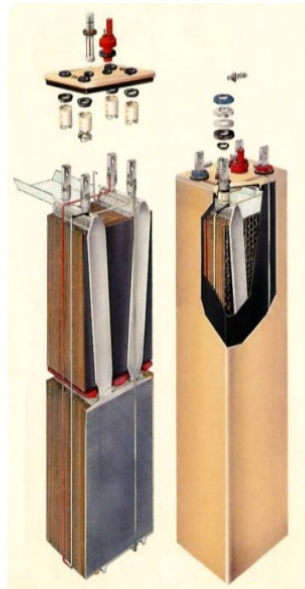
Placa	Meia Reação - Descarga	Tensão Resultante
Negativa	$\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$	0.356V
Positiva	$\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.685V

Fonte: Santos (2010).

Na descarga, a placa negativa (Pb) e a placa positiva (dióxido de chumbo) reagem com a solução do eletrólito (ácido sulfúrico) , formando assim sulfato de chumbo, ao passo em que a concentração de ácido sulfúrico diminui.

Durante o processo de recarga, feito com a conexão da bateria à uma fonte de energia, os materiais positivo e negativo que haviam sido transformados em sulfato de chumbo, reverterem novamente para chumbo e dióxido de chumbo, enquanto que a concentração de ácido sulfúrico aumenta.

Figura 52 – Representação de uma bateria chumbo ácida cortada



Fonte: McGuinness (2003).

D GERADORES

Tabela 11 – Conjunto de Geradores Diesel Caterpillar

	Caterpillar 3512	Caterpillar 3516	Caterpillar 3608
Configuração	Vee 12 Cylinder	Vee 16 Cylinder	In-Line 8 Cylinder
Ciclo	4 tempos	4 tempos	4 tempos
Comprimento x Largura x Altura (mm)	2715 mm x 1703 mm x 2053 mm	3690 mm x 1703 mm x 2053 mm	5561 mm x 1722 mm x 1040 mm
Máximo Torque em Rotação Constante	1500 bhp @ 1800 rpm	2000 bhp @ 1800 rpm	3634 bhp @ 1000 rpm
Massa	6531 - 6537 kg	8028 kg	8112 kg

Fonte Autor(2019).

Tabela 12 – Conjunto de Geradores Diesel Wartsila

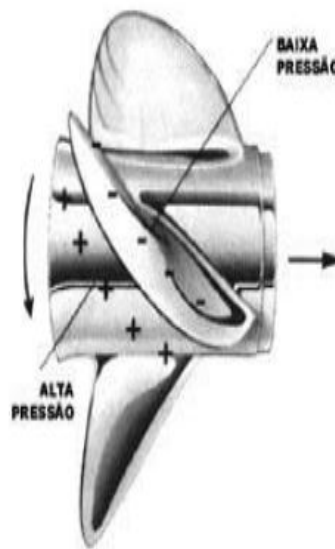
	Wartsila 6L46F	Wartsila 7L46F	Wartsila 8L46F	Wartsila 9L46F
Ciclo	4 tempos	4 tempos	4 tempos	4 tempos
Comprimento x Largura x Altura (mm)	8470 mm x 2900 mm x 2500 mm	9400 mm x 3300 mm x 3800 mm	10200 mm x 3100 mm x 3800 mm	11000 x 3100 x 3800
Máximo Torque	7,2 MW	8,4 MW	9,6 MW	10,8 MW
Massa	97 ton	113 ton	124 ton	140 ton

Fonte Autor(2019).

E FUNCIONAMENTO DO HÉLICE

O funcionamento de um propulsor do tipo hélice pode ser melhor compreendido observando a figura 53 e considerando que o hélice representado está girando da esquerda para a direita, de cima para baixo.

Figura 53 – Ação do hélice



Fonte: Carlton (2012).

A força propulsiva é, portanto, gerada devido à diferença de pressão gerada na pá. Essa diferença de pressão é gerada graças à geometria da pá, que análogo à asa de um avião (Figura 54), acelera o fluido que está acima da pá, e pelo princípio de Bernoulli, diminui a pressão no extradorso da pá (FOX, 2014).

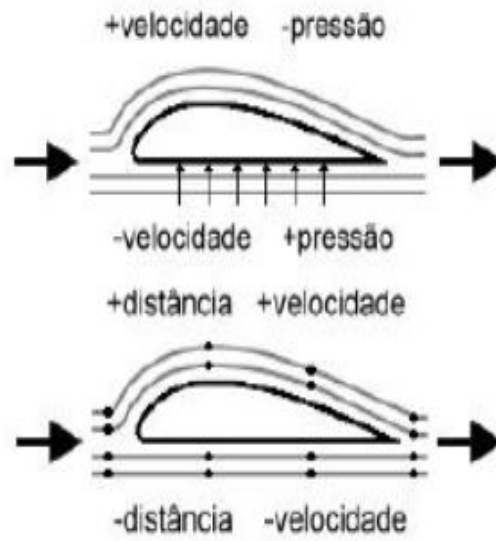
A equação da conservação de energia Bernoulli relaciona a variação de pressão de fluido com a velocidade do escoamento.

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gy = cte \quad (\text{E.1})$$

Algumas considerações são feitas para se utilizar esta equação:

- Escoamento incompressível;
- Regime estacionário;
- Escoamento invíscido;

Figura 54 – Diferença de pressão e de velocidade do escoamento sobre a asa



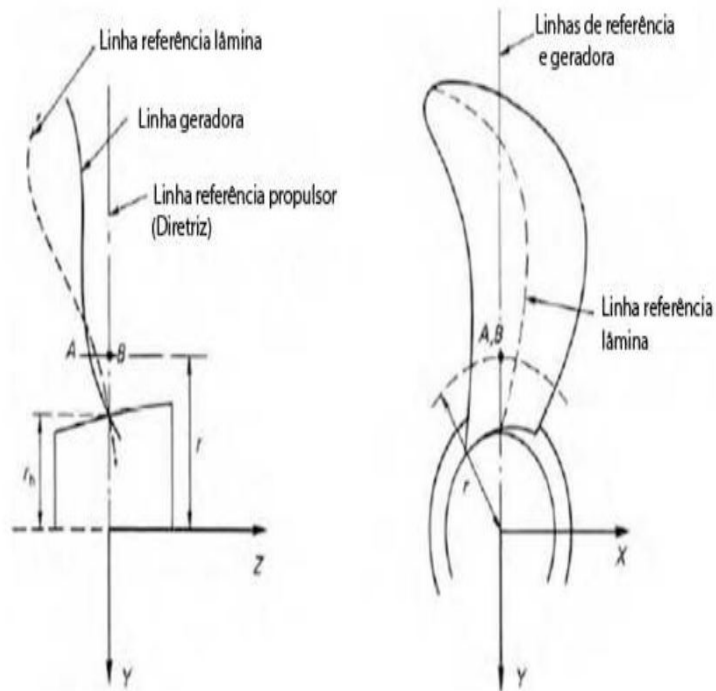
Fonte: Sampaio (2011).

- Irrotacional.

F CARACTERÍSTICAS DO HÉLICE

Segundo Tonacio (2014, p.14): “A localização das pás ao longo da circunferência do bosso é definida pelas linhas diretrizes, essas sempre igualmente espaçadas, partindo do eixo axial (x) e perpendicular ao mesmo.”(TONACIO,2014,p.14). O plano do hélice, ilustrado na Figura 55, contém as diretrizes perpendiculares ao eixo, o bosso e as linhas principais.

Figura 55 – Linhas de referência.



Fonte: Lascala (2016).

G MOTORES ELÉTRICOS

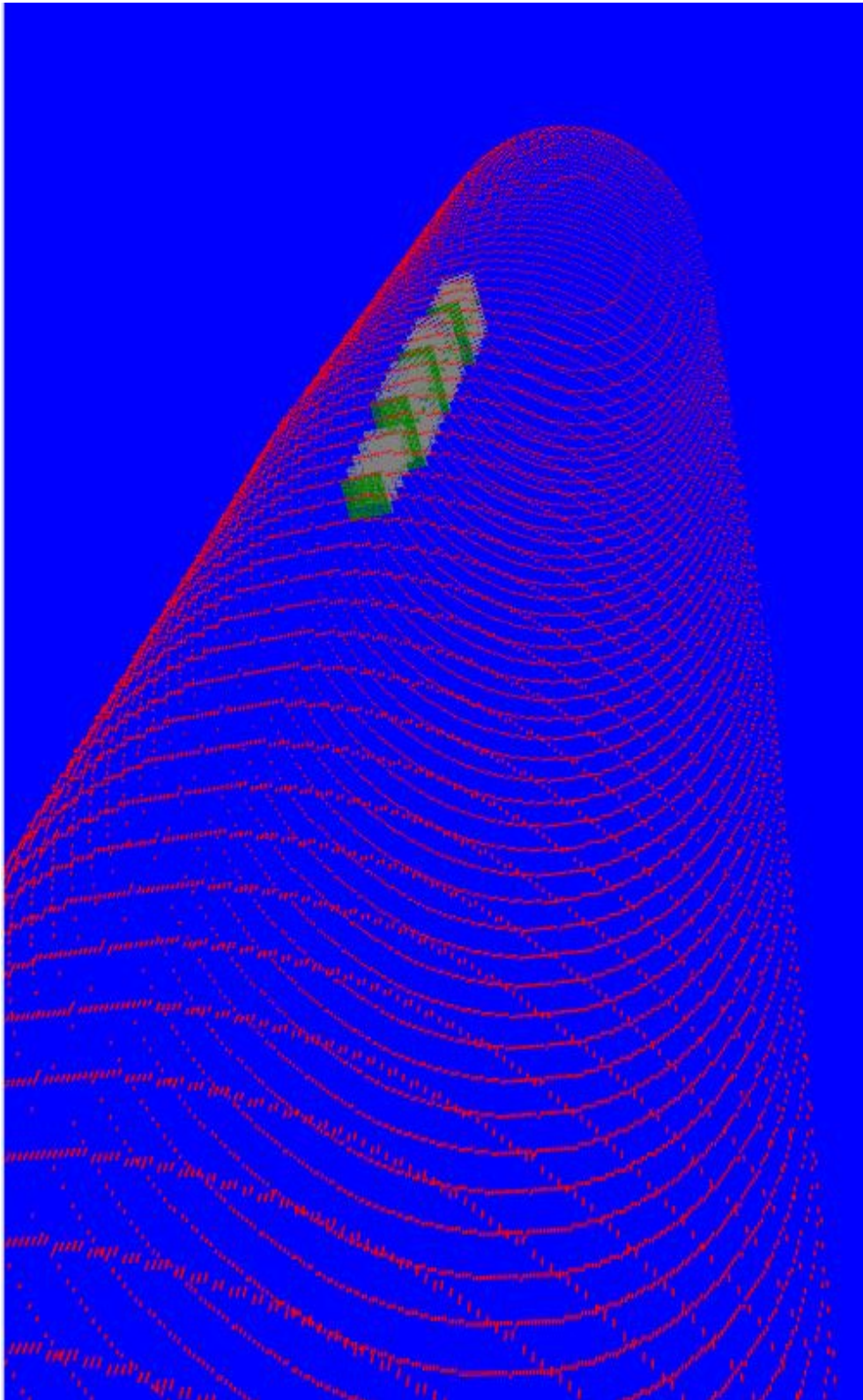
Tabela 13 – Motor Elétrico Principal

Características	MEP1	MEP2	MEP3	MEP4
Comprimento [m]	1,2	1,3	1,5	1,7
Diâmetro [m]	3,0	3,1	3,3	3,5
Peso [t]	30	35	40	45
Potência no Eixo [kW]	2200	2900	3200	4300

Pereira (2016)-Adaptado.

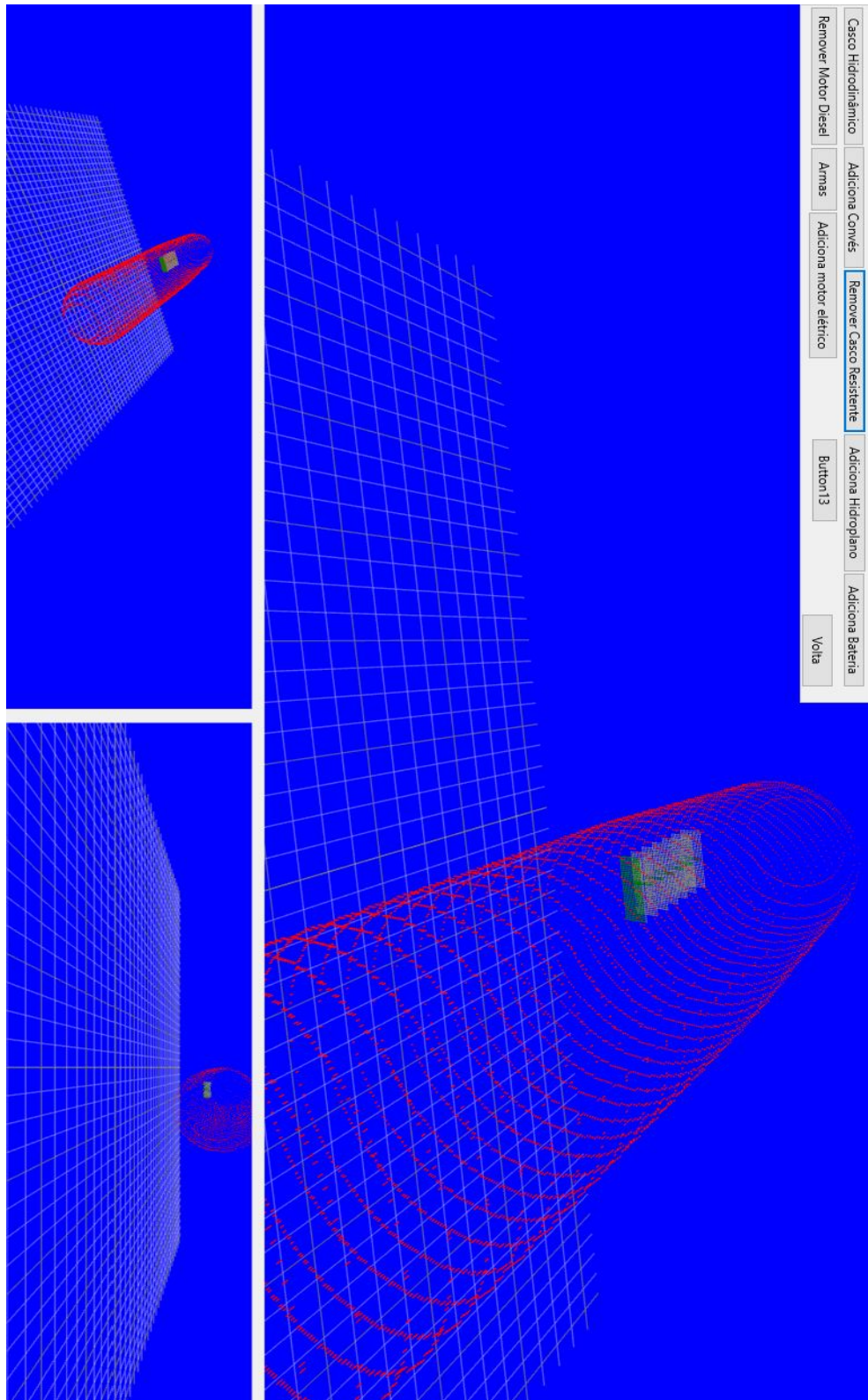
H MODELOS DO CASCO GERADOS PELO SOFTWARE

Figura 56 – Submarino com 9 geradores a bordo



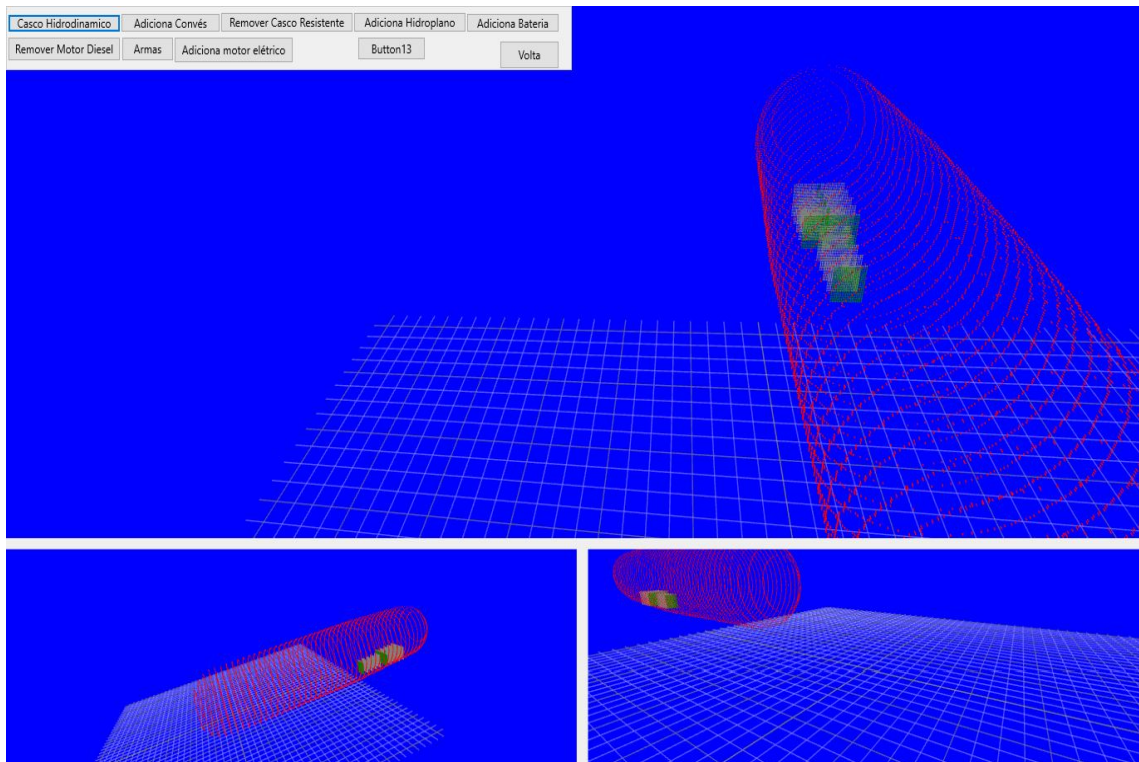
Fonte:Autor(2019);

Figura 57 – Submarino com 2 geradores a bordo



Fonte:Autor(2019);

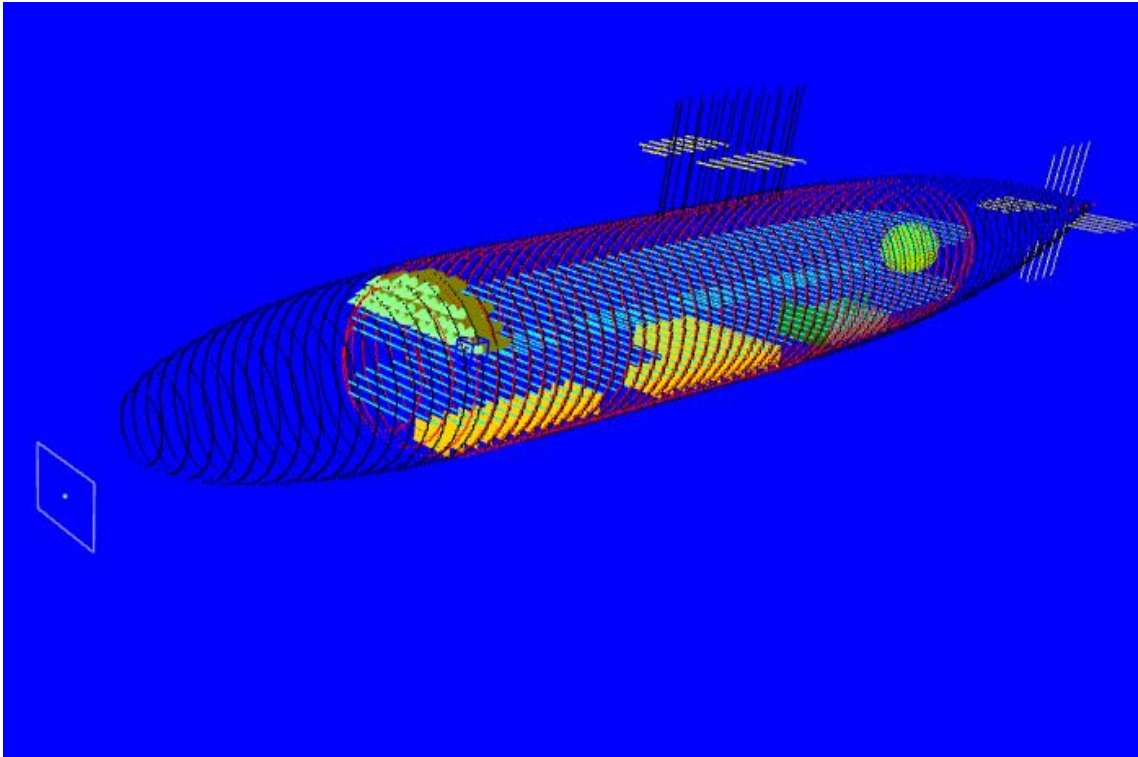
Figura 58 – Arranjo de 3 geradores



Fonte: Autor(2019).

I TRABALHOS FUTUROS FUTURAS

Figura 59 – Projeto de melhoria gráfica dos mísseis



Fonte: Autor(2019).

A TABELA DE VISCOSIDADE CINEMÁTICA

Figura 60 – Relação Viscosidade cinemática e Temperatura

Temperature, °F	Density, lb s ² /ft ⁴	Kinematic Viscosity, ft ² /s
32	1.9947	—
34	1.9946	—
36	1.9944	—
38	1.9942	—
40	1.9940	—
42	1.9937	1.6568
44	1.9934	1.6035
46	1.9931	1.5531
48	1.9928	1.5053
50	1.9924	1.4599
52	1.9921	1.4168
54	1.9917	1.3758
56	1.9912	1.2268
58	1.9908	1.2996
60	1.9903	1.2641
62	1.9898	1.2303
64	1.9893	1.1979
66	1.9888	1.1669
68	1.9882	1.1372
70	1.9876	1.1088
72	1.9870	1.0816
74	1.9864	1.0554
76	1.9858	1.0303
78	1.9851	1.0062
80	1.9844	0.9830

Fonte: Allmendinger (1990).

B COEFICIENTES DE FORMA

Figura 61 – Compensação para corpo de revolução

ENTRANCE: $v_x/D(2)$ [Equation (7)]						
x_f/l_f	n_f					
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
0.000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.100	0.9950	0.9987	0.9997	0.9999	1.0000	1.0000
0.200	0.9798	0.9928	0.9973	0.9990	0.9996	0.9998
0.300	0.9539	0.9800	0.9909	0.9958	0.9980	0.9990
0.400	0.9165	0.9582	0.9782	0.9883	0.9935	0.9964
0.500	0.8660	0.9251	0.9565	0.9739	0.9840	0.9900
0.600	0.8000	0.8774	0.9221	0.9490	0.9659	0.9768
0.700	0.7141	0.8098	0.8693	0.9079	0.9337	0.9514
0.800	0.6000	0.7119	0.7873	0.8395	0.8766	0.9056
0.850	0.5268	0.6448	0.7280	0.7877	0.8315	0.8643
0.900	0.4359	0.5570	0.6471	0.7146	0.7658	0.8054
0.950	0.3122	0.4287	0.5225	0.5969	0.6563	0.7040
0.960	0.2800	0.3933	0.4867	0.5621	0.6230	0.6726
0.970	0.2431	0.3516	0.4437	0.5196	0.5820	0.6334
0.980	0.1990	0.2999	0.3889	0.4644	0.5278	0.5811
0.990	0.1411	0.2280	0.3097	0.3824	0.4455	0.5001
0.992	0.1302	0.2086	0.2877	0.3590	0.4217	0.4762
0.994	0.1094	0.1861	0.2615	0.3309	0.3927	0.4471
0.996	0.0894	0.1583	0.2286	0.2949	0.3551	0.4089
0.998	0.0632	0.1200	0.1816	0.2421	0.2988	0.3508
1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C_{pf}	0.6667	0.7500	0.8061	0.8455	0.8740	0.8944
C_{mf}	0.7854	0.8452	0.8833	0.9089	0.9270	0.9476
LCB_{f/l_f}	0.6250	0.5955	0.5755	0.5612	0.5507	0.5437

AFTER RUN: $x_e/D(2)$ [Equation (3)]						
x_e/l_e	n_e					
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
0.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.10	0.9900	0.9968	0.9990	0.9997	0.9999	1.0000
0.20	0.9600	0.9821	0.9920	0.9964	0.9984	0.9993
0.30	0.9100	0.9507	0.9730	0.9852	0.9919	0.9956
0.40	0.8400	0.8988	0.9360	0.9595	0.9744	0.9838
0.50	0.7500	0.8232	0.8750	0.9116	0.9375	0.9558
0.60	0.6400	0.7211	0.7840	0.8327	0.8704	0.8956
0.70	0.5100	0.5900	0.6570	0.7130	0.7599	0.7991
0.80	0.3600	0.4276	0.4880	0.5421	0.5904	0.6336
0.90	0.1900	0.2316	0.2710	0.3084	0.3439	0.3776
1.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C_{pe}	0.3333	0.5952	0.6429	0.6806	0.7111	0.7366
C_{me}	0.6667	0.7143	0.7500	0.7778	0.8000	0.8359
LCB_{e/l_e}	0.3125	0.3333	0.3500	0.3636	0.3750	0.3949

Fonte: Allmendinger (1990).

C COEFICIENTES SÉRIE B

Figura 62 – Coeficientes dos polinômios da série de Wageningen

Wageningen propeller series polynomial coefficients											
Thrust K_T					Torque K_Q						
n	C_n	x	t	u	v	n	C_n	x	t	u	v
1	0.00880496	0	0	0	0	1	0.00379368	0	0	0	0
2	-0.20455400	1	0	0	0	2	0.00886523	2	0	0	0
3	0.16635100	0	1	0	0	3	-0.032241	1	1	0	0
4	0.15811400	0	2	0	0	4	0.00344778	0	2	0	0
5	-0.14758100	2	0	1	0	5	-0.0408811	0	1	1	0
6	-0.48149700	1	1	1	0	6	-0.108009	1	1	1	0
7	0.41543700	0	2	1	0	7	-0.0885381	2	1	1	0
8	0.01440430	0	0	0	1	8	0.188561	0	2	1	0
9	-0.05300540	2	0	0	1	9	-0.00370871	1	0	0	1
10	0.01434810	0	1	0	1	10	0.00513696	0	1	0	1
11	0.06068260	1	1	0	1	11	0.0209449	1	1	0	1
12	-0.01258940	0	0	1	1	12	0.00474319	2	1	0	1
13	0.01096890	1	0	1	1	13	-0.00723408	2	0	1	1
14	-0.13369800	0	3	0	0	14	0.00438388	1	1	1	1
15	0.00638407	0	6	0	0	15	-0.0269403	0	2	1	1
16	-0.00132718	2	6	0	0	16	0.0559082	3	0	1	0
17	0.16849600	3	0	1	0	17	0.0161886	0	3	1	0
18	-0.05072140	0	0	2	0	18	0.00318086	1	3	1	0
19	0.08545390	2	0	2	0	19	0.015896	0	0	2	0
20	-0.05044750	3	0	2	0	20	0.0471729	1	0	2	0
21	0.01046500	1	6	2	0	21	0.0196283	3	0	2	0
22	-0.00648272	2	6	2	0	22	-0.0502782	0	1	2	0
23	-0.00841728	0	3	0	1	23	-0.030055	3	1	2	0
24	0.01684240	1	3	0	1	24	0.0417122	2	2	2	0
25	-0.00102296	3	3	0	1	25	-0.0397722	0	3	2	0
26	-0.03177910	0	3	1	1	26	-0.00350024	0	6	2	0
27	0.01860400	1	0	2	1	27	-0.0106854	3	0	0	1
28	-0.00410788	0	2	2	1	28	0.00110903	3	3	0	1
29	-0.000606848	0	0	0	2	29	-0.000313912	0	6	0	1
30	-0.004981900	1	0	0	2	30	0.0035985	3	0	1	1
31	0.002598300	2	0	0	2	31	-0.00142121	0	6	1	1
32	-0.000560528	3	0	0	2	32	-0.00383637	1	0	2	1
33	-0.001636520	1	2	0	2	33	0.0126803	0	2	2	1
34	-0.000328787	1	6	0	2	34	-0.00318278	2	3	2	1
35	0.000116502	2	6	0	2	35	0.00334268	0	6	2	1
36	0.000690904	0	0	1	2	36	-0.00183491	1	1	0	2
37	0.004217490	0	3	1	2	37	0.000112451	3	2	0	2
38	0.0000563229	3	6	1	2	38	-0.0000297228	3	6	0	2
39	-0.001465640	0	3	2	2	39	0.000269551	1	0	1	2
						40	0.00083265	2	0	1	2
						41	0.00155334	0	2	1	2
						42	0.000302683	0	6	1	2
						43	-0.0001843	0	0	2	2
						44	-0.000425399	0	3	2	2
						45	0.0000869243	3	3	2	2
						46	-0.0004659	0	6	2	2
						47	0.0000554194	1	6	2	2

Fonte: Molland et al. (2017).