

MICHEL HENRIQUE PEREIRA

**Modelo de Otimização Multiobjetivo Aplicado ao Projeto de
Concepção de Submarinos Convencionais**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

São Paulo

2016

MICHEL HENRIQUE PEREIRA

**Modelo de Otimização Multiobjetivo Aplicado ao Projeto de
Concepção de Submarinos Convencionais**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Bernardo Luis Rodrigues de
Andrade

São Paulo

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pereira, Michel Henrique
Modelo de Otimização Multiobjetivo Aplicado ao Projeto de Concepção de Submarinos Convencionais / M. H. Pereira -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
363 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Projeto de submarinos 2.Modelos de síntese 3.Otimização multiobjetivo
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Dedico este trabalho a meus pais, Francisca e Carlos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a todos os meus professores pelos ensinamentos transmitidos ao longo de minha vida acadêmica. Em especial, ao Prof. Dr. Oscar Brito Augusto por apresentar-me o conceito de Algoritmos Genéticos, ainda em meus dias de graduação. Este é um tema que muito tem me interessado desde então.

Apresento meus sinceros agradecimentos ao Com. Yran Leite Maia e ao Eng. Gerson de Freitas. Suas opiniões e sugestões contribuíram muito para melhorar a qualidade dos resultados. Mas, os agradeço em primeiro lugar pelo constante apoio e amizade ao longo do último ano.

Agradeço aos Com. Sergio Mauricio Tavares do Amparo, Luiz Fernando Silveira Candeias Segundo e Guilherme Acioly Barbosa pelos esclarecimentos sobre muitos aspectos operativos relativos a submarinos e pelas respostas aos questionários de avaliação de efetividade. O convívio profissional com oficiais de tamanho quilate é fonte constante de inspiração e aprendizado.

Este texto teve muitas versões intermediárias, lentamente reformuladas, até que sua forma final fosse concluída. Sou grato pela detalhada revisão de todo o conteúdo feita pelo Com. Yran Maia e pelas muitas correções e sugestões de aprimoramento que ele apresentou. Também agradeço ao Com. Candeias pela leitura crítica e cuidadosa do capítulo sobre conceitos operativos.

Gostaria, ainda, de fazer um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Bernardo Luis Rodrigues de Andrade. Sua sólida orientação no transcorrer da pesquisa foi decisiva para que resultados satisfatórios fossem atingidos. Agradeço, sobretudo, pela sua confiança e a pela liberdade que me conferiu durante a condução do trabalho.

Por fim, agradeço muitíssimo a minha esposa, Elena Kiseleva, pela ajuda com a leitura das referências em russo e com a integração dos softwares. Mais ainda pela paciência, carinho e suporte durante todo o período de pesquisa e elaboração do texto. “Palavras não pagam dívidas” e foram incontáveis as horas de convívio que dela roubei para terminar esta dissertação. Acima de tudo, *большое спасибо за то, что последние шесть лет ты для меня значишь больше, чем "прекрасные воспоминания"*.

*Quando Saturno era o senhor dos céus...
Ninguém dilacerava o solo à força do arado
e não havia quem loteasse a terra
ou varresse o mar com remos submersos;
o mais remoto caminho para os mortais era, então, a praia.
Ó astuta natureza humana, vítima de suas próprias invenções,
desastrosamente criativa.
Por que isolar cidades com muralhas elevadas?
Por que se armar para a guerra?*

Ovídio, *Amores*, Livro III

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo de otimização multiobjetivo aplicado ao projeto de concepção de submarinos convencionais (i.e. de propulsão diesel-elétrica). Um modelo de síntese que permite a estimativa de pesos, volume, velocidade, carga elétrica e outras características de interesse para a o projeto de concepção é formulado. O modelo de síntese é integrado a um modelo de otimização multiobjetivo baseado em algoritmos genéticos (especificamente, o algoritmo *NSGA II*). A otimização multiobjetivo consiste na maximização da efetividade militar do submarino e na minimização de seu custo. A efetividade militar do submarino é representada por uma Medida Geral de Efetividade (*OMOE*) estabelecida por meio do Processo Analítico Hierárquico (*AHP*). O Custo Básico de Construção (*BCC*) do submarino é estimado a partir dos seus grupos de peso. Ao fim do processo de otimização, é estabelecida uma Fronteira de Pareto composta por soluções não dominadas. Uma dessas soluções é selecionada para refinamento preliminar e os resultados são discutidos. Subsidiariamente, esta dissertação apresenta discussão sucinta sobre aspectos históricos e operativos relacionados a submarinos, bem como sobre sua metodologia de projeto. Alguns conceitos de Arquitetura Naval, aplicada ao projeto dessas embarcações, são também abordados.

Palavras-chave: Projeto de submarinos. Modelos de síntese. Otimização multiobjetivo.

ABSTRACT

This thesis presents a multi-objective optimization model applied to concept design of conventional submarines (i.e. diesel-electric powered boats). A synthesis model that allows the estimation of weights, volume, speed, electrical load and other design features of interest is formulated. The synthesis model is integrated with a multi-objective optimization model based on genetic algorithms (specifically, the NSGA II algorithm). The multi-objective optimization consists of maximizing the submarine's military effectiveness and minimizing its cost. The military effectiveness is represented by an Overall Measure of Effectiveness (OMOE) established via the Analytic Hierarchy Process (AHP). The submarine's Basic Construction Cost (BCC) is estimated from its weight groups. At the end of the optimization process, a Pareto Front composed of non-dominated solutions is established. One of these solutions is selected for preliminary refinement and the results are discussed. This work also presents succinct discussion about submarine historical and operational aspects and design methodology. Some Naval Architectural concepts, applied to submarine design, are also discussed.

Keywords: Submarine design. Synthesis models. Multi-objective optimization.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla	Definição
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Processo Analítico Hierárquico)
AIP	<i>Air Independent Propulsion</i>
ASuW	<i>Anti-Surface Warfare</i>
ASW	<i>Anti-Submarine Warfare</i>
AR	à ré
AV	à vante
BCC	<i>basic cost of construction</i> (custo básico de construção)
C3	<i>Command, Control, Communications</i>
CPM	corpo paralelo médio
CR	casco resistente
DC	<i>Design Criteria</i> (norma de projeto)
DG	Diesel-Gerador
EAP	Estrutura Analítica de Projeto
GA	<i>genetic algorithm</i> (algoritmo genético)
IRS	<i>Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
ITTC	<i>International Towing Tank Conference</i>
MAGE	Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica
MBT	<i>main ballast tanks</i> (tanques de lastro)
MEDC	<i>Mission External Design Constraint</i> (restrições de projeto externas ao sistema)
MEP	Motor Elétrico de Propulsão
MESMA	<i>Module d'Energie Sous-Marin</i>
MIDC	<i>Mission Internal Design Constraint</i> (restrições de projeto internas ao sistema)
MIW	<i>Mine Warfare</i>
MOD	<i>Maximum Operating Depth</i> (profundidade máxima de operação)
MOP	<i>Multi-objective Optimization Problem</i> (Problema de Otimização Multiobjetivo)
MN	milha náutica
NSGA II	<i>Non Dominating Sorting Genetic Algorithm</i>
OMOE	<i>Overall Measure of Effectiveness</i> (Medida Geral de Efetividade)
PPAR	perpendicular de ré
PPAV	perpendicular de vante
RANS	Requisitos de Alto Nível de Sistemas
REM	Requisitos de Estado Maior
ROB	<i>reserve of buoyancy</i> (reserva de flutuabilidade)
SPW	<i>Special Warfare</i>
SSBN	<i>Ship Submersible Ballistic Nuclear</i>
SSGN	<i>Ship Submersible Guided Nuclear</i>
SSK	<i>Ship Submersible (conventional)</i>
SSN	<i>Ship Submersible Nuclear</i>
SWBS	<i>Ship Work Breakdown Structure</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

Variável	Definição
[a b c d]	espaços de acesso e manutenção
[B h] _{sail}	vetor de dimensões da vela
[L B h] _{bat}	dimensões das células de baterias
[L B h] _{DG}	dimensões dos DG's
[l b h] _{inv}	dimensões dos inversores do MEP
[L D] _{MEP}	dimensões do MEP
[L _{sa} L _{sp} L _{sf}]	vetor de comprimentos da vela
A _{app}	área total de apêndices
A _{cont}	área de convés para o compartimento do comando
A _{gab}	demanda de área de convés para gabinetes
A _L	coeficiente de custo de montagem - mão de obra
A _{iq}	área de convés para habitáveis
A _M	coeficiente de custo de montagem - material
A _s	área total da vela
A _{sf}	demanda de área de convés para funções de plataforma associadas a <i>payload</i>
A _{sprint}	alcance submerso mínimo
A _{sub}	alcance submerso (em velocidade de patrulha)
A _{total}	área de conveses
aux _i	variável auxiliar
B	centro de carena
B ₂	largura do compartimento de gabinetes do MEP
B ₃	largura do compartimento dos DG's
BAT	bateria
b _f	largura do flange
BG	altura metacêntrica (transversal e longitudinal) em condição submersa
BG _{min}	altura metacêntrica mínima
BM _L	raio metacêntrico longitudinal
BM _T	raio metacêntrico transversal
CA	sonar cilíndrico
C _a	coeficiente de correlação
CBCC	custo do submarino
CD	profundidade de colapso

Variável	Definição
C_{da}	coeficiente de resistência de apêndices
C_{ds}	coeficiente de resistência da vela
C_f	coeficiente de resistência friccional
CI	índice de consistência
CL	custo direto total de mão de obra
CL_{1-7}	custo direto de mão de obra (grupos 1 a 7)
CL_8	custo integração (mão de obra)
CL_9	custo de montagem (mão de obra)
CLi	custo direto de mão de obra (grupo 'i')
CM	custo direto total de material
CM_{1-7}	custo direto de material (grupos 1 a 7)
CM_8	custo integração (material)
CM_9	custo de montagem (material)
C_{man}	coeficiente de automação do submarino
CMi	custo direto de material (grupo 'i')
COM	sistema de comunicações
C_p	coeficiente prismático
CP	centro de pressão
C_{pa}	coeficiente prismático AR
C_{pf}	coeficiente prismático AV
C_r	coeficiente de resistência de forma
CR	taxa de consistência
C_s	coeficiente de área molhada
C_t	coeficiente de resistência total
C_v	coeficiente de resistência viscosa
C_{v_ap}	coeficiente de resistência viscosa de apêndices
C_w	coeficiente de resistência de ondas
C_{wsa}	coeficiente prismático de área AR
C_{wsf}	coeficiente prismático de área AV
D	diâmetro do submarino
d	espessura do flange
Δ	força de flutuação
$\Delta \uparrow$	deslocamento de superfície
D_1	diâmetro crítico (compartimento do MEP)

Variável	Definição
D_2	diâmetro crítico (compartimento de baterias + compartimento dos DG's)
D_3	diâmetro crítico (compartimento de baterias + compartimento de torpedos)
DA	sonar distribuído
DC	custo direto total
Dem_i	demanda elétrica (patrulha, trânsito, esnorquel)
Dem_{MEP}	demanda elétrica do MEP
Dem_{MEP_snk}	demanda elétrica do MEP em esnorquel
Δ_{max}	máximo deslocamento de superfície
ΔR_{av}	parcela de resistência de ondas
D_{stack}	diâmetro crítico
Δ_{sup}	força de flutuação na superfície
D_{wep}	diâmetro das armas (torpedos, mísseis e minas)
E	energia armazenada nas baterias
EHP	potência efetiva
EHP_{snk}	potência efetiva em esnorquel
E_{total}	energia total disponível na comissão
EW	sistema MAGE
Fav	fator de resistência ao avanço
F_D	força de arrasto
F_L	força de sustentação
F_n	Número de Froude (calculado na velocidade de esnorquel)
FTA	sonar de flanco/rebocado
fuel	quantidade de combustível embarcado
g	aceleração da gravidade
G	centro de gravidade
GM_L	raio metacêntrico longitudinal
GM_{min}	raio metacêntrico mínimo
GM_T	raio metacêntrico transversal
GZ	braço de endireitamento
h_3	altura do compartimento dos DG's
H_{DK}	altura entre conveses
HL	vetor de carga hotel
HL_3	carga hotel em trânsito
HL_p	carga hotel em patrulha

Variável	Definição
HL_{snk}	carga hotel em esnorquel
h_w	altura da alma
IC	custo indireto total
I_L	coeficiente de custo de integração - mão de obra
I_M	coeficiente de custo de integração - material
IR	taxa de indiscrição
IR_{max}	taxa de indiscrição máxima
I_x	momento de inércia (eixo longitudinal)
I_y	momento de inércia (eixo transversal)
K	intersecção entre a linha de base e o plano transversal que contém B e G
K1	fator de volume
k_{11}	fator de volume de combustível não aspirável
K2	fator de área molhada
k_{21}	diferença entre o diâmetro externo e D^*
k_{22}	diferença entre D e o diâmetro externo
k_{31}	área de convés por tripulante – comandante
k_{32}	área de convés por tripulante – oficiais
k_{33}	área de convés por tripulante – praças
k_{34}	área de convés por tripulante – comandos
k_{35}	área de convés por gabinete
k_{36}	fator de perda de volume útil nos tanques (estruturas)
k_{61}	fator de segurança (profundidade de colapso)
k_{62}	parâmetro de redução (espessura do casco)
k_{63}	parâmetro do peso estrutural
k_{64}	parâmetro de lastro de comissionamento
k_{71}	fator de área - AR (vela)
k_{72}	fator de área - AV (vela)
k_{73}	fator de área - topo (vela)
k_{81}	fator de descarga das baterias
KB	posição vertical, a partir da linha de base, do centro de carena
KG	posição vertical, a partir da linha de base, do centro de gravidade
KM_i	parâmetro de custo de material do grupo "i"
KM_L	posição longitudinal, a partir da PPAR, do metacentro (condição de superfície)
KM_T	posição vertical, a partir da linha de base, do metacentro (condição de superfície)

Variável	Definição
K_{Ni}	parâmetro de custo de mão de obra do grupo "i"
K_p	constante de proporcionalidade
KW_1	demanda elétrica do aparelho de governo
KW_2	demanda elétrica da planta elétrica e de iluminação
KW_{24}	demanda elétrica média
KW_3	demanda elétrica de cargas diversas
KW_4	demanda elétrica do sistema de monitoramento e controle de avarias
KW_5	demanda elétrica do sistema de manejo de combustível
KW_6	demanda elétrica de sistemas auxiliares
KW_7	demanda elétrica de habitabilidade
KW_8	demanda elétrica dos inv. do MEP
KW_{ac}	demanda elétrica do sistema de ar condicionado
kW_{cons}	demanda elétrica dos consoles
KW_{DG}	demanda elétrica associada ao funcionamento dos DG's
KW_{fl}	demanda elétrica funcional máxima (sem margens)
kW_{gab}	demanda elétrica dos gabinetes
kW_{inv}	demanda elétrica unitária dos inversores do MEP
KW_{max}	demanda elétrica máxima
KW_{MEP}	demanda elétrica associada ao funcionamento do MEP
kW_{misc}	demanda elétrica das estações de manobra
KW_{np}	demanda elétrica não associada aos itens de <i>payload</i>
KW_{pay}	demanda elétrica associada aos itens de <i>payload</i>
KW_{prop}	vetor de demanda elétrica da propulsão
KW_v	demanda elétrica do sistema de ventilação
L	comprimento do submarino
L/D	razão comprimento diâmetro
L_1	comprimento do compartimento do MEP
L_2	comprimento do compartimento de gabinetes do MEP
L_3	comprimento do compartimento dos DG's
L_4	comprimento total estimado dos compartimentos associados a <i>payload</i>
L_5	comprimento total estimado dos compartimentos habitáveis
L_6	comprimento do compartimento de torpedos
L_a	comprimento da seção de ré
LCB	posição longitudinal, a partir da perpendicular de ré, do centro de carena

Variável	Definição
L _{CG}	posição longitudinal, a partir da perpendicular de ré, do centro de gravidade
L _{cil}	comprimento assumido do trecho cilíndrico do CR
L _{cra}	comprimento do CR AR
L _{crf}	comprimento do CR AV
L _{DT}	carga de itens da missão
L _f	comprimento da seção de vante
L _f	espaçamento de cavernas
L _{MB}	peso de água nos tanques de lastro
L _{pmb}	comprimento do corpo paralelo médio
L _{sail}	comprimento total da vela
L _{stack}	comprimento crítico
L _{TS}	carga para submergir
L _{wep}	comprimento das armas (torpedos, mísseis e minas)
m ₁₁	margem sobre <i>SFC</i>
m ₅₁	margem elétrica funcional
m ₅₂	margem elétrica de projeto
m ₅₃	margem da média de consumo
m ₇₁	margem sobre EHP
M _h	custo de homem-hora
MI	momento de inclinação
M _L	metacentro longitudinal
MOA	sonar de detecção de minas
MOD	profundidade de operação
MR	momento de restauração
M _T	metacentro transversal
∇	volume de superfície
n _a	fator de forma AR
n _{cell}	número de células de bateria
n _{cons}	número de consoles dos itens de <i>payload</i>
n _{DG}	número de DG's
NE	número de praças (valor inteiro imediatamente superior ao resultado da fórmula)
N _{esp}	número de membros de forças especiais
n _f	fator de forma AV
∇ _f	volume de forma

Variável	Definição
n_{gab}	número de gabinetes dos itens de <i>payload</i>
n_{inv}	número de inversores do MEP
NO	número de oficiais (incluindo o comandante)
n_{rit}	número de torpedos a bordo (exceto em tubos)
NT	número de tripulantes
n_{wlt}	número de tubos lançadores de armas
OPT	mastro oprônico
ovhd	percentual de custos indiretos
PC	coeficiente propulsivo
P_{carga}	potência de carga das baterias
p_{cl}	pressão de colapso da esfera
p_{col}	pressão de colapso
P_{inst}	potência instalada (n_{DG} x potência unitária do DG)
PM	sistema integrado de gerenciamento da plataforma
P_{MEP}	potência do MEP
profit	margem de lucro do estaleiro
R	raio do submarino
RA_{mix}	raio de ação misto (em velocidade média trânsito/patrolha)
R_{APP}	parcela de resistência devida aos apêndices.
R_{av}	resistência ao avanço
R_{av_snk}	resistência ao avanço em esnorquel
RD	radar
Re	Número de Reynolds
R_H	parcela de resistência devida ao casco;
ROB	<i>reserve of buoyancy</i> (reserva de flutuabilidade)
S	área projetada da superfície de controle
S_a	área molhada de apêndices
sail	configuração da vela
SAT	sistema de comunicações satélite
sC_f	coeficiente de correlação
SFC	taxa de consumo específico de combustível
SHP	potência no eixo
SHP_{snk}	potência no eixo em esnorquel
S_{veloc}	velocidade de trânsito

Variável	Definição
t	espessura do casco
T	empuxo
T_1	tempo total submerso em trânsito em velocidade de patrulha
T_2	tempo total submerso em trânsito misto
T_{pat}	tempo de patrulha
T_s	duração da comissão
T_{snk}	tempo total de carga (esnorquel)
T_{sub}	tempo submerso entre duas operações de esnorquel
T_{trans}	tempo de trânsito até a área de operações
t_w	espessura da alma
v	velocidade
V_{app}	volume de apêndices
V_{aux}	volume das praças de auxiliares
V_{bat}	volume dos compartimentos de bateria
V_{cr}	volume estimado do casco resistente
V_{CR}	volume do casco resistente
V_{ct}	volume dos tanques de compensação e trim
V_{DG}	volume do compartimento dos DG's
V_{env}	volume de envelope do casco externo
vet_a	vetor de coeficientes
vet_{Fn}	vetor de potências do Número de Froude.
V_{fuel}	volume dos tanques de óleo combustível
V_{fw}	volume dos tanques de aguada
V_{gab}	volume do compartimento de gabinetes do MEP
V_{hab}	volume total de habitáveis
V_{int}	vetor com demanda de volumes internos
V_{lo}	volume do tanque de óleo lubrificante
V_{Iq}	volume para habitáveis
V_{max}	velocidade máxima do submarino
V_{max_req}	mínimo valor de v_{max} requerido
V_{mb}	volume dos compartimentos do MEP + DG's
V_{mbt}	volume dos tanques de lastro
V_{MBT}	volume bruto dos tanques de lastro
V_{MEP}	volume do compartimento do MEP

Variável	Definição
V_{mix}	velocidade em transito misto
V_{pay}	demandas específicas de volume dos itens de <i>payload</i>
V_{pay}	volume total associado a <i>payload</i>
V_{RD}	volumes estanques acima da linha d'água
V_{sew}	volume do tanque sanitário
V_{st}	volume para suprimentos
V_{tank}	vetor com demanda de volumes de tanques
V_{wep}	volume do compartimento de torpedos
V_{wot}	volume dos tanques de operação do armamento
W	peso
W	vetor com os grupos de pesos
W_1	peso do grupo 1
W_{180}	peso de jazes
W_{191}	peso do lastro de comissionamento
W_2	peso do grupo 2
W_{240}	peso da linha de eixo
W_3	peso do grupo 3
W_4	peso do grupo 4
W_{400}	peso de gabinetes e consoles
W_5	peso do grupo 5
W_{593}	peso dos sistemas de prevenção de poluição
W_{598}	peso de fluidos dos sistemas auxiliares
W_6	peso do grupo 6
W_7	peso do grupo 7
W_A	peso de "navio leve" (Condição A)
W_{A1}	peso total dos grupos (1 a 7)
W_{aux}	peso dos sistemas auxiliares
W_{bat}	peso de uma célula de bateria
W_{bat}	peso das baterias
W_{bm}	peso básico da propulsão
W_{casco}	peso do casco
W_{cc}	peso dos sistemas de comando e controle
W_{co}	peso dos sistemas de controle do navio
W_{crew}	peso de itens associados à tripulação

Variável	Definição
W_{ct}	peso de água embarcada nos tanques de compensação e trim
w_{DG}	peso unitário do DG
W_{disc}	taxa de descarga
W_{dist}	peso do sistema de distribuição elétrica
W_{F10}	peso da tripulação e pertences
W_{F31}	peso de víveres
W_{F32}	peso de itens associados a mantimentos
W_{fb}	peso de lastro fixo
W_{fw}	peso de água doce embarcada
w_{gab}	peso unitário de gabinetes e consoles
W_{ic}	peso do sistema de comunicações interiores
W_{inv}	peso unitário dos inversores do MEP
W_{LDT}	peso das cargas variáveis
\vec{W}_{LDT}	vetor de pesos das cargas variáveis
W_{light}	peso do sistema de iluminação
W_{lo}	quantidade de óleo lubrificante embarcado
w_{MEP}	peso unitário do MEP
W_{misc}	peso das estações de manobra
W_N	Condição Normal de Superfície
W_{of1}	peso de acessórios e acabamento (casco)
W_{of2}	peso de acessórios e acabamento (habitáveis)
WS	área molhada do casco externo
W_{sew}	peso de efluentes
W_{tank}	vetor com demanda de pesos de fluidos
W_{wep}	peso unitário dos torpedos
W_{wep}	peso total do armamento
W_{wot}	peso de água embarcada nos tanques de operação do armamento
x_a	abscissa da meia baliza da seção de ré
x_f	abscissa da meia baliza da seção de vante
X_{veloc}	velocidade de patrulha
y_a	altura de meia baliza da seção de ré
y_f	altura de meia baliza da seção de vante
y_{pmb}	altura de meia baliza no CPM
η_{carga}	eficiência de carga das baterias

Variável	Definição
η_{conv}	eficiência de conversão do combustível
η_{ele}	eficiência elétrica do MEP
ν	viscosidade cinemática da água
ρ_{fo}	densidade do óleo combustível
ρ_{fw}	densidade da água doce
ρ_{lo}	densidade do óleo lubrificante
ρ_{s}	densidade do aço HY-80
ρ_{sw}	densidade da água do mar
σ_y	tensão de escoamento do aço
φ	metade do ângulo do setor circular da calota

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	Contextualização	27
1.2	Descrição do problema	28
1.3	Objetivo	30
1.4	Abordagem proposta	31
1.5	Organização da dissertação	33
2	SUBMARINOS – ASPECTOS HISTÓRICOS E SITUAÇÃO ATUAL.....	35
2.1	Antecedentes históricos	35
2.2	Os precursores dos submarinos modernos	39
2.3	A Primeira Grande Guerra.....	41
2.4	A Segunda Grande Guerra.....	43
2.5	O Pós-Segunda Guerra	46
2.6	Os submarinos modernos – Principais avanços.....	50
2.6.1	Deslocamento	51
2.6.2	Velocidade	51
2.6.3	Discrição acústica.....	52
2.7	Submarinos convencionais modernos	52
2.8	Atuais Forças de Submarinos	53
2.9	O mercado internacional de submarinos convencionais.....	55
3	SUBMARINOS – ASPECTOS OPERATIVOS.....	57
3.1	Operações oceânicas.....	58
3.1.1	Dissuasão estratégica.....	58
3.1.2	Guerra antissubmarina.....	59
3.1.3	Guerra antissuperfície.....	59
3.2	Operações litorâneas.....	59
3.2.1	Negação do uso do mar	60
3.2.2	Operações conjuntas com a Força-Tarefa	61
3.2.3	Operações de inteligência, monitoramento e reconhecimento	61
3.2.4	Operações Especiais	62
3.2.5	Operações de minagem e reconhecimento de áreas minadas	62
3.2.6	Projeção de poder sobre terra	62
3.3	Perspectivas futuras – cenários de conflito, tecnologias e emprego tático.....	63

3.3.1	Os cenários de conflito	64
3.3.2	Avanços tecnológicos	65
3.3.2.1	Sistemas de combate.....	65
3.3.2.2	Propulsão Independente do Ar (<i>Air Independent Propulsion - AIP</i>)	66
3.3.2.3	Torpedos e minas.....	68
3.3.2.4	Mísseis	69
3.3.2.5	Minissubmarinos	69
3.3.3	Emprego tático.....	70
4	A ABORDAGEM DE PROJETO DE SUBMARINOS CONVENCIONAIS.....	73
4.1	Definição de Projeto	73
4.2	Objetivos de Projeto	75
4.3	Alguns conceitos fundamentais	76
4.3.1	A missão e o <i>macrossistema</i>	76
4.3.2	O sistema submarino	77
4.3.3	Desempenho do sistema	79
4.3.4	Otimização do projeto	79
4.3.5	As restrições de projeto	80
4.3.5.1	Restrições de projeto externas ao sistema (<i>MEDC</i>)	80
4.3.5.2	Restrições de projeto internas ao sistema (<i>MIDC</i>).....	81
4.3.5.3	Normas de projeto	81
4.4	O desenvolvimento de submarinos convencionais.....	82
4.4.1	Etapas do desenvolvimento	82
4.4.1.1	Período de Preparação	83
4.4.1.2	Projeto.....	83
4.4.1.3	Pós - Projeto	84
4.4.2	Projeto - subetapas iniciais (Projetos de Concepção e Preliminar)	84
4.4.2.1	O Projeto de Concepção	85
4.4.2.2	O Projeto Preliminar	86
4.4.3	Projeto - subetapas finais (Projetos de Contrato e Detalhamento)	87
4.4.3.1	O Projeto de Contrato	87
4.4.3.2	O Projeto de Detalhamento	87
4.5	A Espiral de Projeto.....	87
4.6	Força de trabalho, quantitativos e prazos envolvidos.....	90

5	O PROJETO DE SUBMARINOS CONVENCIONAIS – ESPECIFICIDADES.....	93
5.1	O ambiente de operação	93
5.1.1	A atmosfera	94
5.1.2	A interface atmosfera/oceano	94
5.1.3	A coluna d'água	95
5.2	Hidrostática e Hidrodinâmica.....	96
5.2.1	Hidrostática.....	97
5.2.1.1	Estabilidade Estática.....	98
5.2.1.2	Estabilidade Dinâmica.....	105
5.2.2	Hidrodinâmica	107
5.2.2.1	Equações dinâmicas do movimento	107
5.2.2.2	Resistência ao avanço e propulsão	109
5.2.2.3	Configuração e projeto do hélice.....	112
5.2.2.4	Estabilidade Direcional e Manobrabilidade	113
5.2.2.5	Superfícies de controle	115
5.2.2.6	Sistemas de controle da plataforma.....	117
5.3	Pesos e volumes.....	120
5.3.1	Componentes da força peso.....	121
5.3.2	Componentes da força de flutuação.....	123
5.3.3	Deslocamento submerso e de superfície.....	123
5.3.4	Percentuais típicos de peso dos sistemas e de volume interno ocupado	124
5.3.5	Controle de pesos	126
5.4	Estruturas	128
5.4.1	Cascos resistente e não resistente	128
5.4.2	Profundidade de operação	130
5.4.3	Modos de falha	130
5.4.4	Fluxograma de projeto do CR	132
5.4.5	Outras considerações	132
5.5	Arranjo.....	134
5.5.1	Estabelecimento das formas do submarino	135
5.5.2	Alinhamento e adjacência.....	135
5.5.3	Equilíbrio e estabilidade	136
5.5.4	Tráfego a bordo, manutenção/operação e rotas de acesso e remoção	137
5.5.5	Habitabilidade e ergonomia.....	137

5.5.6	Considerações específicas	138
5.6	Propulsão	139
5.6.1	Motor Elétrico Principal (MEP)	140
5.6.2	Baterias	140
5.6.3	Diesel-Geradores	141
5.6.4	Combustível.....	141
5.7	Sistemas Auxiliares	141
5.7.1	Sistemas hidráulicos	142
5.7.2	Sistemas de ar de alta pressão.....	142
5.7.3	Sistemas de produção e distribuição de água	143
5.7.4	Sistemas de compensação e trimagem	143
5.7.5	Sistemas de ventilação e condicionamento de ar.....	144
5.7.6	Sistemas elétricos	144
5.8	Construção	145
5.8.1	Etapas de fabricação das estruturas principais	146
5.8.2	Preparação dos módulos de equipamentos	147
5.8.3	Integração das seções e fechamento do casco	148
5.9	Custos	148
5.9.1	Custo de Ciclo de Vida.....	148
5.9.2	Modelos de custo	150
6	OTIMIZAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL.....	153
6.1	O conceito de otimização	153
6.2	Definições preliminares	154
6.3	O problema de otimização	155
6.4	Técnicas de otimização.....	157
6.4.1	Programação matemática.....	158
6.4.2	Métodos probabilísticos.....	160
6.5	O problema de otimização em Engenharia Naval	161
6.6	Algoritmos Genéticos	162
6.6.1	O <i>NSGA II</i>	164
6.6.2	Exemplo de aplicação (<i>GA</i> "clássico" x <i>NSGA II</i>)	167

7	MODELO DE SÍNTESE.....	171
7.1	Considerações preliminares.....	171
7.2	Variáveis de projeto e parâmetros globais do modelo.....	172
7.3	Módulos do modelo de síntese	174
7.3.1	Tempo de comissão e quantidade de combustível	175
7.3.2	Definição geométrica do navio – casco externo e casco resistente	176
7.3.3	Tripulação.....	181
7.3.4	Volumes e Deslocamento	182
7.3.5	Volumes de tanques e peso de fluidos associados.....	186
7.3.6	Carga Hotel.....	188
7.3.7	Grupos de pesos.....	191
7.3.8	Resistência ao Avanço e Potência	196
7.3.9	Raio de ação, alcances e taxa de indiscrição	200
7.3.10	Manobrabilidade.....	203
7.3.11	Custo.....	204
7.4	Estrutura de integração dos módulos.....	207
8	MODELO DE OTIMIZAÇÃO	209
8.1	Especificidades do problema abordado	209
8.2	Modelo de otimização proposto	210
8.2.1	Restrições	210
8.2.2	Medida geral de Efetividade (OMOE)	212
8.2.3	Escopo da determinação da OMOE.....	216
8.2.4	O problema de otimização tratado.....	217
8.3	Estrutura utilizada para a otimização.....	217
9	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	219
9.1	Análise conduzida	219
9.2	Otimização multiobjetivo	220
9.2.1	Exploração inicial do espaço de soluções – Bateria 1	220
9.2.2	Análise dos resultados obtidos – Bateria 1	222
9.2.3	Nova exploração do espaço de soluções – Bateria 2.....	227
9.2.4	Análise dos resultados obtidos – Bateria 2.....	228
9.2.5	Exploração detalhada do espaço de soluções – Bateria 3.....	231
9.2.6	Análise dos resultados obtidos – Bateria 3.....	233
9.3	Otimização estrutural.....	243

9.4	Detalhamento preliminar da configuração base	247
9.5	Comparação do S4 com navios existentes.....	249
10	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	253
10.1	Conclusões.....	253
10.2	Recomendações para trabalhos futuros	255
	GLOSSÁRIO.....	257
	REFERÊNCIAS	263
	APÊNDICE A - <i>SHIP WORK BREAKDOWN STRUCTURE (SWBS)</i>	269
A-1)	Grupo 1 - Casco e Estruturas	269
A-2)	Grupo 2 - Sistemas de Propulsão.....	269
A-3)	Grupo 3 - Sistemas Elétricos	270
A-4)	Grupo 4 - Comando e Controle	270
A-5)	Grupo 5 - Sistemas Auxiliares.....	271
A-6)	Grupo 6 - Acessórios e Acabamento	271
A-7)	Grupo 7 - Armamento	272
	APÊNDICE B - REQUISITOS DE ESTADO MAIOR (REM)	273
B-1)	Itens típicos.....	273
B-2)	REM para esta dissertação.....	275
	APÊNDICE C - FORÇAS E MOMENTOS	279
C-1)	Fontes e natureza das forças e momentos atuantes.....	279
C-2)	Forças Estáticas	280
C-3)	Forças Dinâmicas	282
C-4)	Condições de equilíbrio	285
	APÊNDICE D - EFICIÊNCIA PROPULSIVA	289
	APÊNDICE E - MODELO DE ANÁLISE ESTRUTURAL	293
E-1)	Apresentação do equacionamento	293
E-2)	Estimativa de peso do casco	298
	APÊNDICE F – ALTERNATIVAS DE PROPULSÃO E PAYLOAD	301
F-1)	Sistemas de Propulsão e <i>Payload</i>	301
F-2)	Propulsão	301
F-3)	Abordagem adotada para os itens de <i>payload</i>	304
F-4)	Configurações da vela	304
F-5)	Itens de <i>payload</i>	305
F-6)	Considerações adicionais.....	309

APÊNDICE G - GEOMETRIAS (AR E AV) E VALORES TABULARES DE K1 E K2...	311
APÊNDICE H - PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO - <i>AHP</i>	313
H-1) O Processo Analítico Hierárquico	313
H-2) Consistência da matriz de julgamento	316
APÊNDICE I – QUESTIONÁRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA <i>OMOE</i>	319
APÊNDICE J – CÁLCULO DA <i>OMOE</i>	327
J-1) Medidas de Performance (MP).....	327
J-2) Valores de Performance (VP).....	328
J-3) Medida Geral de Efetividade.....	329
APÊNDICE K – SOLUÇÕES ALTERNATIVAS	331
APÊNDICE L – DETALHAMENTO PRELIMINAR DA CONFIGURAÇÃO BASE.....	333
L-1) Escantilhamento	333
L-2) Dimensões de lemes e hidroplanos.....	333
L-3) Arranjo.....	335
L-4) Plano preliminar de capacidades	341
L-5) Equilíbrio hidrostático e estabilidade	343
L-6) Polígono de Equilíbrio.....	350
L-7) Estimativa de calado e GM.....	358
APÊNDICE M – MODELOS PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE MÁXIMA	359
APÊNDICE N – ARRANJO GERAL – S4	363

1 INTRODUÇÃO

The design of an effective system rests upon understanding how to measure system effectiveness, how to draw an appropriate boundary to define the extent of the system to include in the analysis, how to clearly and accurately represent this and other design information to decision-makers and how to make rational design decisions ¹.

John C. Hootman

Este capítulo contextualiza o presente estudo, descreve o problema tratado e expõe os objetivos e a estrutura de organização deste trabalho.

1.1 Contextualização

Os conceitos e métodos de condução das Operações Navais evoluíram vertiginosamente desde início do último século. Parcela apreciável desta evolução deve-se ao advento de diversas novas tecnologias e sua gradual assimilação pelas Marinhas. Tais tecnologias acabam por influenciar decisivamente a formulação das estratégias e táticas de emprego do Poder Naval, tanto em tempos de paz quanto em cenários de conflito.

Especificamente, o surgimento e o aprimoramento dos submarinos muito influenciaram o desenvolvimento da atual doutrina de aplicação do Poder Naval. Historicamente, o componente submarino das forças navais ganhou papel de crescente destaque e figura hoje como um dos pilares da composição das principais Marinhas [1].

¹ “O projeto de um sistema efetivo se alicerça na compreensão de como medir a efetividade desse sistema, de como traçar apropriadamente as fronteiras que definirão a extensão do sistema a ser incluída na análise, de como representar clara e precisamente as informações de projeto para os tomadores de decisão e de como tomar decisões racionais.” (Tradução livre).

No Brasil, a Estratégia Nacional de Defesa [2] prioriza a tarefa estratégica de negação do uso do mar². Sobre esse aspecto, o documento é explícito quanto à importância do componente submarino para assegurar a consecução dos objetivos ora 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. O Brasil manterá e desenvolverá sua capacidade de projetar e de fabricar tanto submarinos de propulsão convencional como de propulsão nuclear.

A configuração da realidade planejada no documento, muito provavelmente, será acompanhada de um interesse crescente pelos assuntos relativos ao projeto e à construção de submarinos, tanto por certos setores da Indústria Nacional quanto por nossa Academia.

No que concerne aos aspectos técnicos envolvidos, o projeto de submarinos se posiciona entre os empreendimentos mais desafiadores da engenharia de sistemas complexos [3] [4] [5]. Mesmo as considerações gerais e preliminares, comuns nas etapas iniciais do projeto (i.e. estudos de exequibilidade e projeto de concepção), já evidenciam o elevado grau de integração e interdependência dos sistemas de bordo e, sobretudo, a forma como variações a princípio pequenas nos requisitos, ou nas opções tecnológicas e de arquitetura, podem acarretar impactos significativos e sistêmicos no projeto do navio³.

1.2 Descrição do problema

O projeto de sistemas complexos de engenharia geralmente apresenta pelo menos duas características que dificultam a avaliação e escolha das possíveis soluções:

- a) A existência de objetivos de projeto múltiplos e, não raro, conflitantes;

² 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.

³ Aqui, o termo “navio” é aplicado em seu sentido amplo (i.e. um veículo de grande porte capaz de empreender navegação no meio oceânico/fluvial) e é empregado para denominar o submarino. Nesta dissertação, o termo é usado indistintamente e o contexto permitirá determinar se se refere ao submarino ou a navios de superfície.

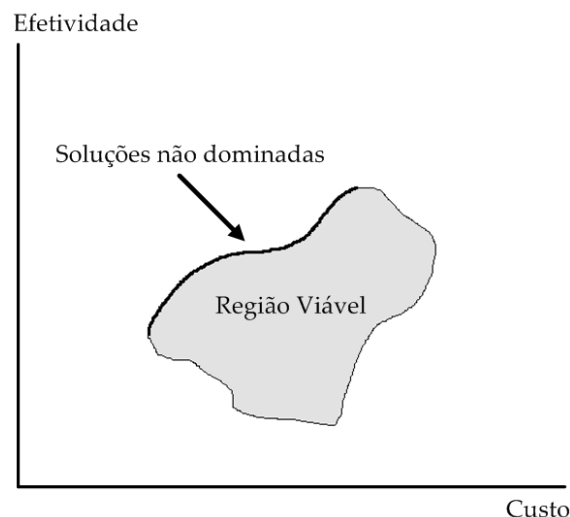
b) A complexidade e considerável amplitude do espaço de soluções.

A multiplicidade e a natureza antagônica de certos objetivos, e/ou certos requisitos de projeto, torna complexa a hierarquização das diversas soluções viáveis.

Além disso, é comum que as soluções difiram entre si quanto ao grau de atendimento dos requisitos e de determinados atributos de desempenho. Em diversos casos, não é possível estabelecer categoricamente se dada solução é superior às outras. Nesses casos, o estabelecimento de soluções de compromisso e o estudo dos *tradeoffs* envolvidos geralmente norteiam a escolha da solução de projeto a ser adotada [6].

Este é precisamente o caso das soluções situadas na chamada “Fronteira de Pareto”, ou soluções “não dominadas”. Nesta região do espaço de soluções, a tentativa de melhorar o desempenho em um objetivo/requisito específico vem necessariamente acompanhada de uma redução ou degradação de desempenho em outro(s) objetivo(s)/requisito(s). Um exemplo de Fronteira de Pareto, para um problema a dois objetivos, é mostrado a seguir (Figura 1).

Figura 1 - Espaço de atributos e Fronteira de Pareto (problema com dois objetivos)



Fonte: adaptado [6]

A complexidade do espaço de soluções pode tornar proibitivo (ou mesmo impraticável) o estabelecimento de um modelo analítico que descreva o sistema em sua totalidade. Dessa forma, a utilização de rotinas “clássicas” de otimização (métodos baseados em gradientes, por exemplo) pode não ser possível.

Outros fatores de ordem prática limitam a complexidade do modelo analítico empregado. Por exemplo, a adoção de modelos de alta fidelidade para representação da solução pode se revelar computacionalmente onerosa, sobretudo nas etapas iniciais do projeto. Em realidade, a viabilidade computacional de um processo de otimização pode ser comprometida muito rapidamente quando modelos de alta fidelidade são usados em tais etapas [7].

O projeto de navios de guerra, e mais especificamente de submarinos convencionais⁴, geralmente enquadra-se na descrição anterior [3] [4].

Naturalmente, muitas decisões tomadas nas fases iniciais do projeto têm impacto significativo no restante da sua condução. A fase do projeto de concepção, em especial, contempla a definição da arquitetura dos sistemas, a escolha de equipamentos, o estudo comparativo de alternativas, etc. Segundo Brown [6], cerca de 80% do custo final do meio naval estará associado a decisões tomadas nessa etapa do projeto. Dessarte, durante a etapa de concepção, um processo responsável de tomada de decisões não pode prescindir de ferramentas que permitam a avaliação efetiva de um amplo conjunto de soluções [8].

Diante do exposto, esta dissertação aborda o problema de projeto de concepção de submarinos convencionais, formulado como um problema de otimização multiobjetivo, e propõe sua solução por meio de um modelo de síntese/otimização.

1.3 Objetivo

O objetivo principal desta dissertação é propor um modelo de síntese e otimização com múltiplos objetivos adequado ao projeto de concepção de submarinos convencionais.

Embora tais embarcações sejam sistemas de altíssima complexidade, pretende-se demonstrar que o modelo simplificado (síntese/otimização) proposto é adequado para a avaliação de soluções na fase de concepção. Neste sentido, a adequabilidade do modelo será testada pela avaliação crítica de seus resultados e pela posterior comparação destes com informações documentadas em literatura aberta.

⁴ Para o escopo deste trabalho, o termo “submarinos convencionais” se refere a navios de propulsão diesel-elétrica (convencional).

Pretende-se, ainda, demonstrar que as conclusões advindas do trabalho possuem aplicação mais ampla, permitindo uma maior compreensão do processo de projeto, da relação entre requisitos e espaço de soluções e da multidisciplinaridade do problema.

Assim, o modelo será elaborado de forma a permitir:

- 1) A obtenção rápida de alternativas de projeto viáveis, e a investigação de soluções de compromisso envolvendo objetivos conflitantes, durante as etapas iniciais de projeto de submarinos convencionais;
- 2) A análise do impacto de variações nos requisitos operativos e técnicos sobre o espaço de soluções viáveis;
- 3) A identificação dos requisitos e parâmetros de projeto que possuem maior impacto sobre o desempenho do navio;

Além disso, com base na revisão bibliográfica empreendida, é objetivo secundário do trabalho registrar os principais aspectos de interesse ligados ao projeto de concepção de submarinos (aspectos históricos/operativos, processo de projeto e arquitetura naval aplicada). Isto permite que o modelo de síntese/otimização proposto, e os resultados obtidos, sejam avaliados e interpretados em contexto mais amplo.

1.4 Abordagem proposta

A abordagem proposta para a elaboração do modelo de síntese/otimização, e sua posterior validação, consiste em:

- a) Efetuar análise da bibliografia existente sobre o assunto e registrar os aspectos de interesse para a contextualização, compreensão e resolução do problema tratado (aspectos históricos/operativos, processo de projeto e arquitetura naval aplicada);
- b) Desenvolver/adaptar modelos de baixa e média fidelidade, baseados em equações paramétricas e formulações preliminares simplificadas, para a representação das principais características do submarino (Modelo de Síntese);

- c) Estabelecer a Medida Geral de Efetividade do submarino (*Overall Measure of Effectiveness – OMOE*), com base na técnica de Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process – AHP*);
- d) Adaptar e aplicar um modelo de custo, baseado nos grupos de peso da embarcação (*Ship Work Breakdown Structure – SWBS*), com refinamentos relativos à complexidade de integração e aspectos construtivos do navio;
- e) Aplicar técnicas de otimização, baseadas em Algoritmos Evolutivos, para a análise multiobjetivo do desempenho das soluções e para o estabelecimento da fronteira de soluções não dominadas. Especificamente, procura-se a maximização da efetividade e a minimização do custo das soluções (*OMOE x Custo*);
- f) Escolher uma solução candidata e efetuar seu detalhamento, de forma a explorar alguns aspectos de projeto julgados de interesse.

O uso de modelos paramétricos no projeto de concepção de embarcações já é prática consagrada [9]. Em se tratando de navios de guerra, o método também é conveniente [10] [11].

Muito embora não haja grande quantidade de informações detalhadas publicadas sobre o assunto, no caso do projeto de concepção de submarinos convencionais, a bibliografia aberta ora disponível é suficiente para subsidiar a elaboração de um modelo de síntese satisfatório para os propósitos almejados nesta pesquisa.

No que concerne ao modelo de otimização, a opção pelo uso de Algoritmos Evolutivos (mais especificamente, Algoritmos Genéticos) decorre da extensa bibliografia na qual estes algoritmos têm sido utilizados em conjunto com modelos de síntese e de sua particular adequação a problemas de otimização aplicada à Engenharia Naval [6]⁵.

Por fim, o modelo de síntese/otimização proposto será elaborado de forma a permitir a inserção de novos módulos, mais refinados, ou o refinamento dos módulos pré-existentes. Ao final do trabalho, tal modelo será testado de forma a demonstrar

⁵ Neste sentido, ver Capítulo 6 item 6.5.

sua aplicabilidade ao problema de projeto de concepção de submarinos convencionais.

1.5 Organização da dissertação

O capítulo 2 discute a evolução histórica dos submarinos e sua aplicação como meio naval. Também são resumidamente abordados os principais avanços tecnológicos e de projeto relacionados a estes navios. Considerações sobre a composição das atuais Forças de Submarinos e sobre o mercado internacional de submarinos convencionais finalizam o capítulo.

O capítulo 3 apresenta um breve resumo sobre a atual filosofia de emprego operativo de submarinos (com ênfase em submarinos convencionais engajados em operações litorâneas). Adicionalmente, as perspectivas futuras relacionadas ao emprego de submarinos convencionais são brevemente apresentadas.

O capítulo 4 apresenta uma descrição geral do projeto de submarinos convencionais.

O capítulo 5 apresenta algumas especificidades relacionadas ao projeto de submarinos convencionais (em termos de arquitetura naval e engenharia aplicada).

O capítulo 6 expõe o conceito de otimização e apresenta resumo das principais técnicas de otimização. A aplicabilidade destas técnicas a problemas de engenharia naval é discutida. Segue-se explicação sucinta sobre algoritmos genéticos, com ênfase no algoritmo *NSGA II (Non Dominating Sorting Genetic Algorithm)*.

O capítulo 7 estabelece o modelo de síntese utilizado. Neste capítulo, a ênfase recai sobre a descrição dos módulos, as principais premissas e hipóteses adotadas para sua elaboração e as eventuais limitações de aplicação do modelo. A interligação entre os diversos módulos e a estrutura final do modelo de síntese são também apresentadas.

O capítulo 8 descreve a integração entre os modelos de otimização e síntese. Nele, as restrições são enunciadas, o conceito de *OMOE* é delimitado e o problema de otimização analisado é formulado. A estrutura de integração implementada (softwares) é também apresentada.

No capítulo 9 são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 10 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

O trabalho também possui, além de um Glossário, 13 Apêndices que compreendem:

- A) Apresentação da estrutura *SWBS* – *Ship Work Breakdown Structure*;
- B) Formulação típica dos Requisitos de Estado Maior (REM);
- C) Descrição das principais forças e momentos atuando sobre o submarino;
- D) Discussão do conceito de eficiência propulsiva;
- E) Modelo de análise estrutural empregado;
- F) Alternativas de propulsão e *payload* usadas neste trabalho;
- G) Geometrias associadas aos parâmetros n_a e n_f e valores tabulares de $K1$ e $K2$;
- H) Apresentação do Processo Analítico Hierárquico (*AHP*);
- I) Questionários empregados para a determinação da *OMOE*;
- J) Método de cálculo da *OMOE*;
- K) Variáveis de descrição das soluções alternativas estudadas;
- L) Detalhamento preliminar da configuração base;
- M) Modelos alternativos para cálculo da velocidade máxima;
- N) Arranjo Geral da solução selecionada para detalhamento.

2 SUBMARINOS – ASPECTOS HISTÓRICOS E SITUAÇÃO ATUAL

*But technology alone cannot prevail without skill and courage*⁶.

Stan Zimmerman

Este capítulo fornece um breve panorama sobre evolução histórica dos submarinos, das tecnologias associadas e dos conceitos operativos relacionados ao emprego dessas embarcações. O desenvolvimento histórico dos submarinos é discutido, sendo elencados alguns detalhes das tecnologias que o motivaram. Também é tratada a forma como o emprego operativo de tais armas foi estabelecido/reformulado ao longo do tempo. Adicionalmente, são discutidos os principais avanços tecnológicos e de projeto relacionados a esses navios.

Por fim, apresenta-se a composição das atuais Forças de Submarinos, além de uma breve análise do atual mercado internacional de submarinos convencionais.

2.1 Antecedentes históricos

Registros históricos de operações subaquáticas, durante conflitos, remontam à Antiguidade Clássica. Tucídides, o historiador grego, em sua *História da Guerra do Peloponeso*, relata o uso de mergulhadores tanto por Espartanos quanto por Atenienses no século V a.C (durante o cerco a Esfacteria e durante a batalha de Siracusa, respectivamente). Aristóteles menciona⁷, no século IV a.C., o uso de aparatos para respiração subaquática pelos gregos. Na mesma época, há relatos do uso de sinos de mergulho por Alexandre Magno, durante o cerco de Tiro, em 332 a.C.

⁶ “A tecnologia, por si só, não pode prevalecer na ausência de coragem e habilidade.” (Tradução livre).

⁷ Em sua obra *Partes dos Animais*.

Entretanto, quase dois milênios seriam necessários para que as primeiras embarcações submersíveis⁸ fossem construídas e viessem a ser aplicadas com propósitos militares.

O primeiro submersível tripulado surgiu com o trabalho de Van Drebbel⁹, um físico holandês, entre 1620 e 1624. Seu modelo, movido por remos, era capaz de transportar até 16 passageiros e de empreender travessias submersas de até 3 horas, a 5 metros de profundidade (Figura 2).

No início do século XVIII um número considerável de projetos de veículos submersíveis já havia aparecido. Por volta de 1727, apenas na Inglaterra, já existiam pelo menos 14 patentes de submersíveis registradas [12].

Figura 2 – O submersível de Van Drebbel (modelo 3D e réplica) - 1624



Fonte: Internet¹⁰

Não tardou para que o emprego militar dessas embarcações se concretizasse. Em 1776, o americano David Bushnell desenvolveu o *Turtle*, o primeiro submersível aplicado em operações militares de que se tem registro. O submersível era monotripulado e possuía hélices em parafuso operados manualmente (Figura 3). Esse submersível foi projetado para permitir que cargas explosivas fossem implantadas, furtivamente, sob o casco de navios fundeados (ancorados).

⁸ Neste trabalho, o termo submersível será aplicado para denominar embarcações (de propósito civil ou militar) capazes de submergir e de projeto anterior ao *Type XXI* alemão, a primeira embarcação projetada para alto desempenho em condição submersa.

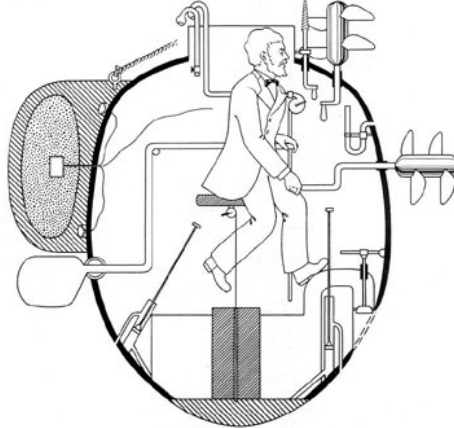
⁹ O trabalho de Cornelis Drebbel foi grandemente influenciado pelas idéias de Willian Bourne, um matemático inglês, que publicou em 1578 a descrição de um veículo submersível em seu livro *Inventions or Devises*.

¹⁰ Disponíveis em:

<http://www.turbosquid.com/3d-models/3d-submarine-drebbel-model/636509> e
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Drebbel_-_geograph.org.uk_-_7165.jpg.
 Acesso em Julho/2014.

Essa embarcação empreendeu um ataque, que não logrou êxito, contra o *HMS Eagle*, navio inglês que liderava um bloqueio ao porto de Nova Iorque durante a Guerra de Independência Americana.

Figura 3 – O *Turtle* de Bushnell - 1776

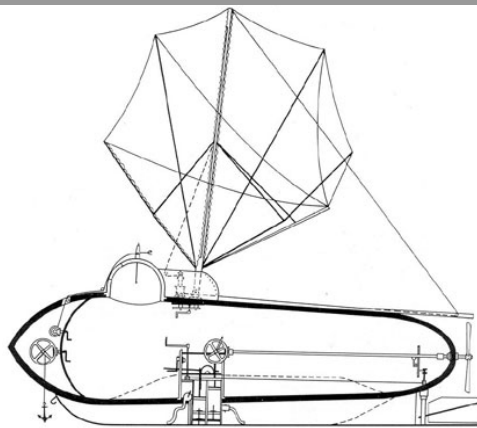


Fonte: [12]

Entre 1793 e 1797, o inventor americano, radicado na França, Robert Fulton construiu e conduziu testes bem sucedidos de um submersível: o *Nautilus*.

A embarcação, feita de metal, era propelida por um hélice em parafuso operado manualmente. O governo do navio, em condição submersa, era feito por estabilizadores semelhantes aos hidroplanos dos navios modernos. O domo de observação possuía uma vigia para visualização da superfície. A embarcação contava com uma vela retrátil, usada para navegação na superfície (Figura 4).

Figura 4 – O *Nautilus* de Fulton - 1800



Fonte: [12]

O submersível era tripulado por 3 pessoas e tinha autonomia submersa de até 4 horas e meia. A embarcação foi projetada para transportar uma espécie de mina, de explosão por contato, que deveria ser lançada próxima aos navios alvo.

Embora os testes na França tenham corrido satisfatoriamente, a Marinha Francesa não demonstrou interesse em produzir o submersível em série. Posteriormente, Fulton tentou convencer autoridades inglesas e americanas a financiar a continuidade de seu projeto, porém sem sucesso.

Entre 1859 e 1863 os franceses Siméon Bourgeois (oficial de marinha) e Charles Brun (engenheiro) concluíram a construção do *Plongeur*, um submersível de 463 toneladas de deslocamento. Este foi o primeiro submersível propulso por força mecânica ao invés de manual (o navio possuía um motor de ar comprimido alimentado por 23 tanques de armazenamento de ar existentes a bordo). O *Plongeur* possuía um alcance submerso de 5 milhas náuticas¹¹ (MN) e velocidade submersa de 4 nós¹² (kt). Devido, sobretudo, a problemas de estabilidade, o submersível foi descomissionado em 1867.

Na época, a ausência de motores adequados para a aplicação a bordo de submersíveis era um obstáculo tecnológico considerável. Assim, o desenvolvimento de submersíveis propulso por força humana continuaria por algum tempo.

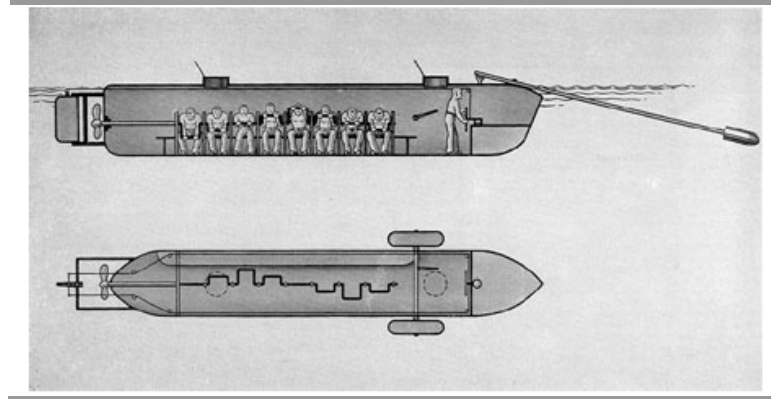
Em 1864, durante a Guerra de Secessão americana, um submersível Confederado, o *Hunley*, afundou uma corveta da União, a *Housatonic*. Este é o primeiro registro histórico do emprego militar bem sucedido de um submersível.

O *Hunley* fora batizado segundo o nome de seu idealizador, Horace Lawson Hunley, um engenheiro naval americano. O submersível era operado por uma tripulação de 9 membros (8 para operar as manivelas de propulsão e 1 para o governo do navio). O navio tinha aproximadamente 12 metros de comprimento. Seu armamento consistia em uma carga explosiva que era anexada ao próprio submersível por meio de uma haste de madeira (Figura 5). A carga era acionada por contato com o navio alvo, em uma arriscada manobra de abalroamento proposital¹³.

¹¹ Aproximadamente 9,2 km.

¹² Aproximadamente 7,4 km/h.

¹³ O histórico de operação do *Hunley* é trágico. O submersível afundou por duas vezes durante treinamentos, matando cinco tripulantes na primeira vez e nove, incluindo o próprio Horace Hunley, na segunda. O navio foi recuperado em ambas as ocasiões e colocado em serviço novamente. Por fim, logo após o ataque à *Housatonic*, o submersível acabou afundando definitivamente. O *Hunley* só foi encontrado em 1995 e recuperado em 2000. Estudos indicaram que, muito provavelmente, o *Hunley* foi vitimado por sua própria carga explosiva.

Figura 5 – O Hunley - 1864

Fonte: [12]

2.2 Os precursores dos submarinos modernos

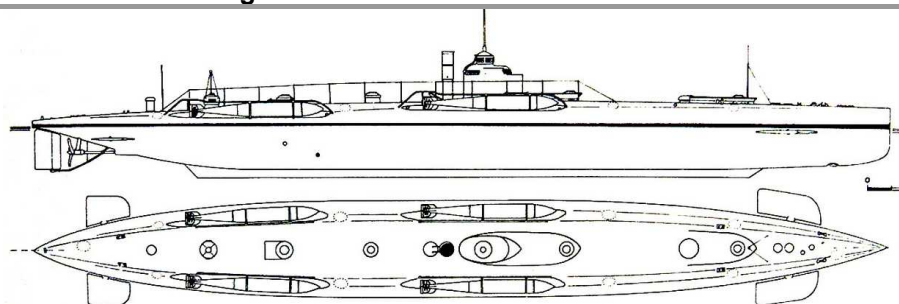
Ao final do século XIX, algumas tecnologias tinham amadurecido o suficiente para permitir o desenvolvimento dos primeiros submersíveis modernos. Dentre tais tecnologias, destacam-se:

- a) O surgimento de instalações propulsoras adaptáveis ao emprego em submersíveis, como instalações a vapor e motores de combustão interna;
- b) O desenvolvimento de torpedos autopropelidos;
- c) O desenvolvimento de baterias chumbo-ácido para o armazenamento de energia.

Dois projetos de submersíveis podem ser considerados como os precursores dos modernos submarinos [4], o *Narval* do francês Laubeuf e o *USS Holland*, de Jonh Holland.

O projeto de Laubeuf consistia em uma embarcação de casco duplo. Em essência, tratava-se de um torpedeiro de superfície capaz de submergir para se ocultar durante o ataque e/ou evasão. Esta solução técnica foi posteriormente adotada por projetistas alemães e italianos [13] e se firmou como a configuração típica dos submersíveis militares da primeira metade do século XX [4].

Figura 6 – O Narval de Laubeuf – 1899



Deslocamento de Superfície: 116 t	Comprimento: 34,1 m	Velocidade sup: 6,5 nós
Deslocamento Submerso: 200 t	Boca: 3,8 m	Velocidade sub: 3,3 nós

Fonte: arranjo (internet)¹⁴ e dados [13] [14]

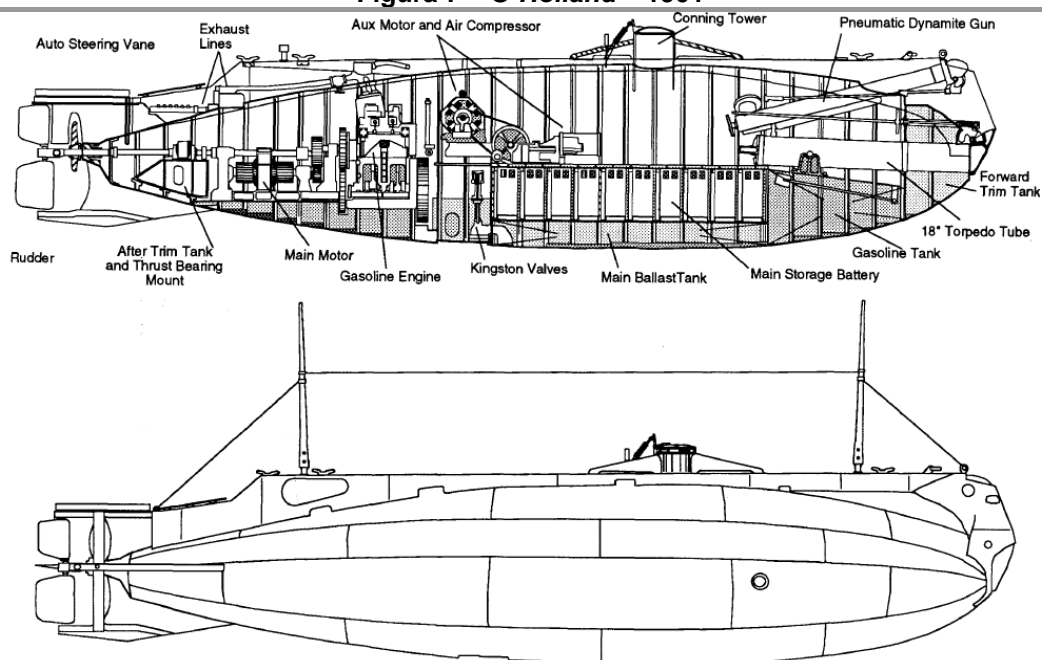
Por sua vez, o projeto de Holland¹⁵ combinava harmoniosamente as tecnologias disponíveis na época (motor de combustão interna, torpedos e baterias) em uma embarcação de casco simples, que priorizava o desempenho submerso. Essa embarcação foi adotada pela Marinha Americana e posteriormente pela Marinha Real Britânica [13]. Embora o conceito de Laubeuf viesse a influenciar predominantemente o projeto de submersíveis militares por décadas, Holland teve o mérito de antecipar, em seu projeto, diversas das características presentes nos submarinos modernos [4] [13], como:

- a) Baixa razão comprimento/diâmetro;
- b) Forma circular axissimétrica;
- c) Superestrutura pequena;
- d) Presença de um único eixo e um único hélice.

¹⁴ Disponível em http://www.graptolite.net/Facta_Nautica/submarines/Narval-1896.html. Acesso em Julho/2014.

¹⁵ Jonh Phillip Holland, de origem irlandesa, dedicou mais de 25 anos de sua vida ao estudo e desenvolvimento de veículos submersos. Antes do *Holland*, já havia concluído alguns projetos de submersíveis, como o *Fenian Ram* e o *Plunger*. Entretanto, foi o *Holland* seu projeto mais importante e que o colocou entre os principais, e talvez como o mais proeminente, pioneiros do desenvolvimento de submarinos. Jonh Holland viria a se tornar engenheiro chefe da Electric Boat Company, que em 1900 produziu seis submersíveis de grande porte, baseados neste projeto, para a Marinha Americana. O projeto foi posteriormente desenvolvido também para a Marinha Britânica pela Vickers, sob licença da Electric Boat. Detalhes da história da vida e do trabalho de Jonh Holland são interessantes, mas fogem ao escopo desta dissertação. Um bom resumo está disponível em http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_19/holland.htm. Acesso em Julho/2014.

Figura 7 – O Holland – 1901



Deslocamento de Superfície: 63,3 t	Comprimento: 16,2 m	Velocidade sup: 6 nós
Deslocamento Submerso: 74 t	Boca: 3,1 m	Velocidade sub: 5 nós

Fonte: arranjo [13] e dados [4]

2.3 A Primeira Grande Guerra

Por ocasião do início da Primeira Guerra Mundial, em 1914, os Estados Unidos, a França, o Reino Unido e, sobretudo, a Alemanha possuíam um número substancial de submersíveis em suas Marinhas. Conquanto restassem incertezas, no início da Guerra, sobre o papel destas embarcações em um cenário tático dominado por encouraçados, não tardou para que a filosofia de emprego dos submersíveis fosse estabelecida [4].

Embora submersíveis alemães tenham destruído navios de guerra ingleses no início das hostilidades, foi a campanha alemã contra o tráfego marítimo mercante destinado à Inglaterra que definiu, sem sombra de dúvida, qual seria emprego majoritário de tais embarcações durante o conflito. Por volta de 1917, submersíveis alemães ameaçavam seriamente as linhas de suprimento para a Grã-Bretanha.

Os submersíveis realizavam seus ataques na superfície, geralmente empregando artilharia. Os torpedos só eram usados contra navios de maior porte.

O conceito de guerra antissubmarina ainda não existia quando o conflito se iniciou. Ao longo da guerra, foram desenvolvidas algumas táticas para fazer frente à ameaça representada pelos submersíveis, como:

- a) A navegação em comboios de navios mercantes escoltados por navios de guerra;
- b) O desenvolvimento de cargas de profundidade;
- c) O uso de dirigíveis para patrulha e detecção visual antecipada dos submersíveis, quando operando na superfície.

Por outro lado, dentre as principais tecnologias aplicadas aos submersíveis, pode-se listar:

- a) O desenvolvimento de osciladores, utilizados para detecção de navios de superfície e para comunicações;
- b) A adoção e o aprimoramento de motores diesel (mais seguros que os motores a gasolina e melhores que as instalações a vapor);
- c) O desenvolvimento de agulhas giroscópicas¹⁶ (auxílio à navegação);
- d) O aprimoramento da tecnologia de torpedos.

Um projeto que pode ser destacado neste período é o do *U-Boat*¹⁷ alemão, *U35* [4]¹⁸. Tratava-se de um barco simples, robusto e muito confiável. Seu projeto priorizava o desempenho em superfície. O trânsito, nessa condição, era feito com propulsão diesel. Em condição submersa, a embarcação usava um grupo de baterias para propulsão (porém com pequeno alcance submerso).

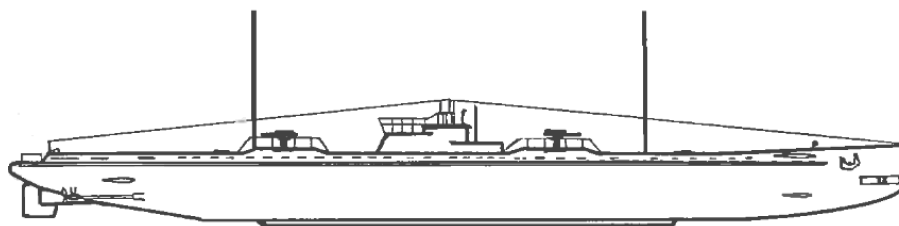
O projeto tinha uma proa semelhante à de um navio de superfície, uma vela, uma superestrutura de dimensões consideráveis e dois hélices. Além disso, contava com torretas de artilharia externas e inúmeros suspiros para a operação dos tanques de lastro (Figura 8). Esses apêndices aumentavam substancialmente a resistência ao avanço em condição submersa, reduzindo a velocidade nessa condição de operação.

¹⁶ O termo náutico "agulha" é sinônimo de bússola. Tratam-se de bússolas que empregam o princípio de inércia giroscópica em seu funcionamento.

¹⁷ A grafia usada no texto é inglesa. A grafia original alemã é *U-Boot* (*Unterseeboot*), que significa "barco submersível".

¹⁸ Em rigor, o U35 era o quinto navio da classe U31. Este navio foi o mais bem sucedido *U-boat* durante a campanha da Primeira Guerra, tendo afundado 224 navios.

Figura 8 – O U35 – 1912



Deslocamento de Superfície: 702 t	Comprimento: 64,7 m	Velocidade sup: 16,4 nós
Deslocamento Submerso: 865 t	Boca: 6,3 m	Velocidade sub: 9,7 nós

Fonte: arranjo [13] e dados [4]

Ao final da guerra, foi possível mensurar a efetividade da campanha alemã [4]. Uma quantidade apreciável de tráfego mercante havia sido destruída pelos *U-Boat* (mais de 11 milhões de toneladas) e centenas de navios de guerra ficaram impedidos de desempenhar outros papéis no Teatro de Operações, por estarem dedicados às escoltas de comboios. Não restavam mais dúvidas sobre a efetividade dos submersíveis e sobre seu papel na Guerra Naval.

2.4 A Segunda Grande Guerra

Entre as duas grandes guerras, o desenvolvimento de submersíveis militares prosseguiu aceleradamente. Por ocasião do início da Segunda Guerra, as principais potências envolvidas contavam com frotas de submersíveis de tamanho apreciável.

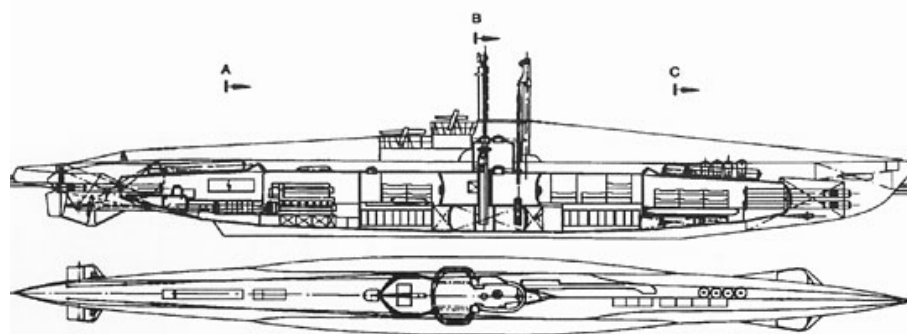
Para a Grã-Bretanha, estava claro que, mais uma vez, a estratégia de ataque alemã se voltaria contra o tráfego mercante. A necessidade de aprimorar as técnicas de escolta de comboios e a necessidade de desenvolver um sistema de detecção de submersíveis eram nítidas. Nesse sentido, um sistema pioneiro de sonar, conhecido como *ASDIC*¹⁹ e que havia sido desenvolvido no período entre guerras, era considerado de fundamental importância.

Os alemães, por outro lado, também haviam aprimorado suas táticas de ataque. Operavam agora sob o conceito de “matilhas” de submersíveis, no qual um grupo de *U-Boats* perpetrava um ataque noturno simultâneo contra um dado comboio, a partir de várias direções.

¹⁹ O dicionário Oxford aponta que o acrônimo surgiu a partir da expressão “*Allied Submarine Detection Investigation Committee*”, embora haja controvérsias sobre a real origem e significado do termo.

É interessante notar que, como os ataques ocorriam com os *U-Boats* na superfície, o sistema *ASDIC* era de pouca utilidade naquele momento. Além disso, os *U-Boats* eram rápidos o suficiente para se evadir em meio à confusão de um ataque noturno bem sucedido a um comboio. Os submersíveis alemães em serviço no início da guerra eram muito semelhantes aos seus predecessores da Primeira Guerra (Figura 9).

Figura 9 – O *U-Boat* Type VIIC – 1939



Deslocamento de Superfície: 781 t	Comprimento: 67,1 m	Velocidade sup: 17 nós
Deslocamento Submerso: 893 t	Diâmetro: 6,2 m	Velocidade sub: 7,6 nós

Fonte: arranjo [15] e dados [4]

O sucesso dos ataques em matilha, conduzidos por submersíveis que operavam a maior parte do tempo na superfície, fomentou o desenvolvimento de uma nova tática de guerra antissubmarina capaz de fazer frente à ameaça dos *U-Boat*; a patrulha aérea de combate com emprego de radar [4]. Com isso, os aviões eram capazes de detectar os submersíveis na superfície, durante a noite, alertar os comboios e conduzir ataques aéreos contra os *U-Boat*.

Os alemães, então, desenvolveram um sistema de detecção de pulsos radar. Tal sistema permitia aos submersíveis saber se estavam recebendo irradiação dos sistemas radar das aeronaves. Isso dava liberdade ao *U-Boat* para mergulhar e escapar antecipadamente, mas antes de poder concluir qualquer ataque efetivo.

Por volta de 1943, a eficácia da campanha alemã tinha se reduzido consideravelmente, sobretudo devido aos seguintes fatores:

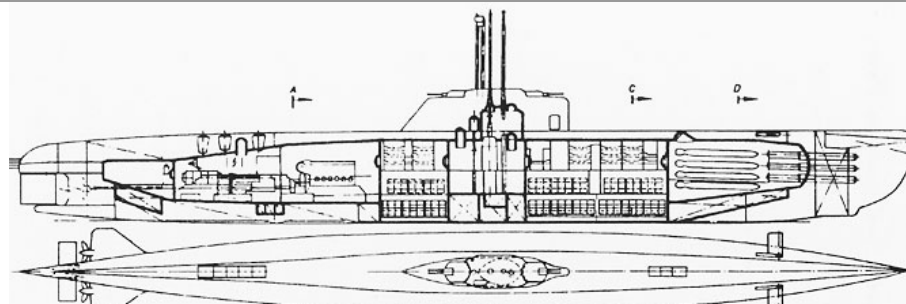
- a) O desenvolvimento de melhores radares e sonares;
- b) A ampliação das patrulhas aéreas e marítimas contra os submersíveis alemães;
- c) O aprimoramento das táticas de guerra antissubmarina.

Uma tentativa alemã de recuperar a iniciativa nos ataques ocorreu com o desenvolvimento do esnorquel, um dispositivo que permitia aos submersíveis vir à cota periscópica²⁰, operar seus motores diesel e carregar suas baterias enquanto navegando em condição submersa.

Entretanto, os submersíveis de então tinham sido concebidos para melhor desempenho em superfície. A operação em cota periscópica reduzia suas velocidades de trânsito, antes de 16 nós ou mais na superfície, para uma média de 5 nós em condição submersa. Isso impunha limitações táticas severas ao seu emprego.

Diante dos avanços técnicos e dos conceitos operativos da época (guerra antissubmarina) tornou-se evidente que a operação submersa teria que ser priorizada. A resposta alemã a este desafio técnico veio muito tarde para poder ser colocada em prática durante a guerra, mas representou o conceito de projeto que definiu os submarinos modernos: o *Type XXI* (Figura 10).

Figura 10 – O U-Boat Type XXI – 1943



Deslocamento de Superfície: 1088 t	Comprimento: 76,7 m	Velocidade sup: 15,5 nós
Deslocamento Submerso: 1845 t	Diâmetro: 6,6 m	Velocidade sub: 17 nós

Fonte: arranjo [15] e dados [4]

Este projeto colocava o desempenho submerso do navio em primeiro plano. O carenamento do casco foi cuidadosamente elaborado e os apêndices externos reduzidos. A capacidade de armazenamento das baterias e dos tanques de combustível foi ampliada consideravelmente, o que dava ao navio raio de ação e alcances muito maiores do que os de seus predecessores. A velocidade submersa máxima podia chegar a 18 nós.

²⁰ Uma profundidade pequena, próxima à superfície do mar, que permite ao submarino içar seus mastros de comunicação, periscópios e, sobretudo, o mastro de esnorquel para admissão de ar durante a operação dos motores diesel para a carga de baterias.

O conceito dessa embarcação representou uma mudança sensível na filosofia de projeto de submersíveis, sendo a resposta natural aos avanços técnicos e às novas táticas de guerra antissubmarina. O *Type XXI* pode ser considerado o primeiro submarino, no sentido estrito do termo, por priorizar as características de desempenho submerso que se tornariam a referência para os projetos futuros de outras Marinhas [4].

Embora derrotada no fim da guerra, a Alemanha novamente conseguira impor consideráveis perdas e restrições a seus oponentes no Teatro de Operações do Atlântico. Ao fim da guerra, cerca de 1200 *U-Boats* tinham sido construídos. Eles foram responsáveis pelo afundamento de mais de 14 milhões de toneladas de tráfego mercante, além de manterem centenas de navios de guerra e milhares de aeronaves de patrulha comprometidos com as escoltas de comboios e com a guerra antissubmarina [4]. Embora cerca de 800 submersíveis alemães tenham sido perdidos, o custo imposto aos aliados pela campanha alemã não pode ser negligenciado.

Além dos *U-Boat* no Teatro do Atlântico, o Teatro do Pacífico também foi palco do uso extensivo de submersíveis, pelos americanos, contra as frotas de guerra e mercante japonesas. Aproximadamente 5 milhões de toneladas de tráfego mercante²¹ foram afundadas pelos submersíveis americanos.

2.5 O Pós-Segunda Guerra

No início da década de 1950, os Estados Unidos assumiram a posição, antes ocupada pela Alemanha, de liderança mundial em projeto de submarinos [4].

Logo após o final da Segunda Guerra, os americanos converteram seus *Fleet Type*²² para a chamada classe *Guppy* (*Greater Underwater Propulsive Power*). O reprojeto foi intensamente influenciado pelas inovações constantes no *Type XXI* alemão (carenamento, redução de apêndices e baterias de maior capacidade).

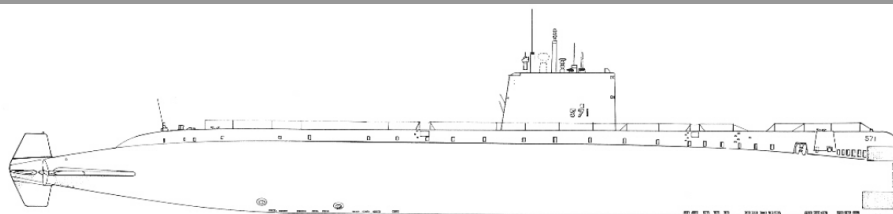
²¹ Um resumo sobre a campanha americana está disponível em <http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/history/wwii-campaigns.html>. Acesso em Agosto/2014.

²² O projeto dos *Fleet Type* datava de antes da Segunda Guerra. Ainda assim, prova da versatilidade do projeto, esses submersíveis foram empregados com bastante êxito no Teatro do Pacífico.

Entretanto, o custo de conversão relativamente elevado dos *Guppy* motivou os Estados Unidos a iniciarem um novo projeto, a Classe *Tang*, no qual a performance submersa era priorizada.

A partir de 1948, os americanos iniciaram o desenvolvimento do primeiro submarino de propulsão nuclear, o *Nautilus* (Figura 11). O navio foi comissionado em 1954. O projeto permitia a manutenção de grandes velocidades por longos períodos, além de possuir alcance submerso virtualmente ilimitado (residindo os limites na autonomia: impostos pela duração dos víveres e por fatores de desgaste humano em longas missões).

Figura 11 – O *Nautilus* – 1954



Deslocamento de Superfície: 3530 t	Comprimento: 98,8 m	Velocidade sup: 22 nós
Deslocamento Submerso: 4090 t	Diâmetro: 8,5 m	Velocidade sub: > 20 nós

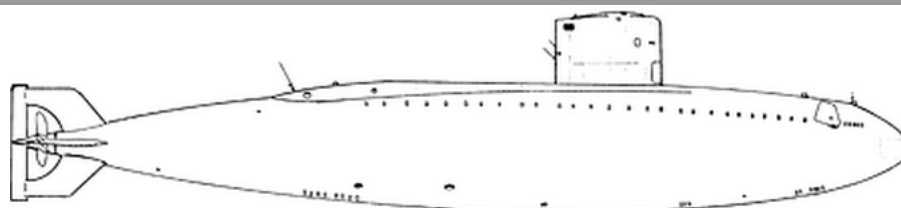
Fonte: arranjo [13] e dados (internet)²³

Na mesma época, uma série de investigações experimentais realizadas no David Taylor Model Basin motivou o projeto de um submarino convencional idealizado para altíssima performance propulsiva, o *Albacore* (Figura 12). O navio foi comissionado em 1953. O projeto recuperava muitas das idéias pioneiras antecipadas por J. Holland, em termos de maximização da performance submersa:

- Baixa razão comprimento/diâmetro;
- Forma axissimétrica;
- Um único eixo acoplado a um único hélice de grande diâmetro e baixa rotação;
- Superestrutura e vela de dimensões reduzidas;
- Diminuição do número de apêndices externos.

²³ Disponíveis em <http://navysite.de/ssn/ssn571.htm>. Acesso em Agosto/2014.

Figura 12 – O *Albacore* – 1953



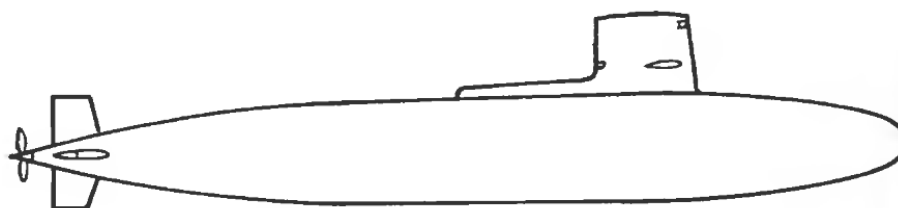
Deslocamento de Superfície: 1500 t	Comprimento: 64,2 m	Velocidade sup: 25 nós
Deslocamento Submerso: 1850 t	Diâmetro: 8,4 m	Velocidade sub: 33 nós

Fonte: arranjo (internet)²⁴ e dados [4]

O projeto do *Nautilus* demonstrou a viabilidade da integração de um Reator Nuclear a Água Pressurizada (*PWR – Pressurized Water Reactor*) em um submarino, além de provar a adequação de tal planta às condições de serviço no mar. O projeto do *Albacore* mostrara que, ao preço de uma degradação no desempenho em superfície, grandes ganhos em termos de performance propulsiva e manobrabilidade eram possíveis por meio das escolhas adotadas naquele projeto.

As vantagens de ambos os projetos foram efetivamente combinadas em um único projeto, com o advento da Classe *Skipjack*. Esse navio foi comissionado em 1959. Seu projeto tinha logrado uma redução do deslocamento, em comparação com o *Nautilus*, enquanto mantinha uma instalação propulsora de mesma potência. Isto conferiu ao navio um aumento substancial de velocidade. Além disso, as características de boa manobrabilidade do *Albacore* foram mantidas. A classe *Skipjack* pode ser considerada como a precursora dos modernos submarinos nucleares de ataque americanos (ela foi sucedida pelas Classes *Permit*, *Sturgeon*, *Los Angeles*, *Sea Wolf* e *Virginia*).

Figura 13 – O *Skipjack* – 1959



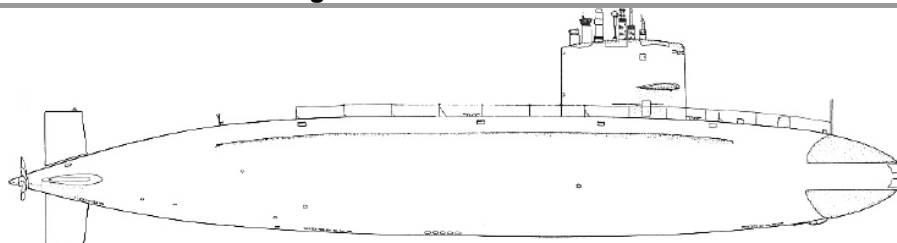
Deslocamento de Superfície: 3075 t	Comprimento: 76.7 m	Velocidade sup: 16 nós
Deslocamento Submerso: 3513 t	Diâmetro: 9.6 m	Velocidade sub: > 30 nós

Fonte: [4]

²⁴ Disponível em http://www.ussalbacore.org/html/albacore_story.html. Acesso em Agosto/2014.

Ainda em 1959, os Estados Unidos lançaram seu último projeto de submarino convencional, a Classe *Barbel* (Figura 14), que incorporava muitos dos conceitos consagrados pelo *Albacore*.

Figura 14 – O *Barbel* – 1959



Deslocamento de Superfície: 2570 t	Comprimento: 66.9 m	Velocidade sup: 15 nós
Deslocamento Submerso: 2895 t	Diâmetro: 8.8 m	Velocidade sub: 25 nós

Fonte: arranjo [13] e dados [4]

A partir da década de 1960, o projeto de submarinos dos anos subsequentes não sofreu nenhuma grande alteração em relação às tendências iniciadas com os projetos anteriormente descritos. Em que pesem alguns avanços em áreas específicas, que serão tratados no tópico seguinte, não ocorreu nenhuma mudança profunda em termos da arquitetura naval dessas embarcações. Entretanto, antes de prosseguir com a discussão sobre os submarinos modernos, alguns tópicos de interesse subsidiário devem ser tratados.

Primeiramente, devido ao escopo desta dissertação (submarinos convencionais), a discussão histórica se reteve aos submarinos de ataque. Independentemente do tipo de propulsão, convencional ou nuclear, as missões típicas de submarinos de ataque são relativamente semelhantes (guardadas as devidas proporções quanto a diferenças de alcance, raio de ação e velocidade).

Submarinos nucleares balísticos – *SSBN* – (ou seja, submarinos de propulsão nuclear armados com mísseis balísticos intercontinentais de ogivas termonucleares), são essencialmente armas de dissuasão estratégica²⁵. Sua filosofia de emprego é inteiramente distinta daquela atribuída aos submarinos de ataque e sua evolução

²⁵ Este termo, consagrado no jargão militar, é, na melhor das hipóteses, um eufemismo. Um único *SSBN* contemporâneo tem um poder de destruição absolutamente inimaginável. Tomando os *SSBN* Classe Ohio da Marinha Americana, por exemplo: cada submarino pode transportar 24 mísseis *Trident II*; cada míssil pode estar armado com 14 cabeças de combate termonucleares independentes (elas podem ser direcionadas para alvos diferentes); cada cabeça de combate tem a potência de 475 kilotons (1 kiloton equivale a 1000 toneladas de TNT). Isso totaliza, para cada submarino, 159600 kilotons (aproximadamente 160 megatons). A bomba de Hiroshima, por exemplo, tinha uma potência de 15 kilotons. A potência de todos os explosivos detonados na Segunda Guerra, segundo alguns estudiosos, foi de aproximadamente 3 megatons.

histórica durante a Guerra Fria é digna de capítulo à parte. O assunto, embora de interesse, não será explorado aqui.

Outro tópico a ressaltar, muito embora apenas submarinos americanos tenham sido tratados neste item, se refere à Escola Russa de projeto. Após a Segunda Guerra, o legado representado pelo *Type XXI* também influenciou projetistas do Bloco Soviético. Desde a Guerra Fria, os russos disputam competentemente com os americanos a liderança no Projeto de Submarinos. O texto a seguir, constante na introdução da referência [16], corrobora essa afirmação:

“Russia’s submarine development community, despite very hard economic times, is a national priority. Rumors of its demise – heard so often inside and outside of Russia after the collapse of Communism – proved false. Its nuclear attack submarines are now the fastest, deepest diving and quietest in the world; even the U.S. Navy Secretary has admitted such. In pure performance, Russian submarines are now the benchmark against which all others are measured.”²⁶

Embora detalhes não sejam explorados nesta dissertação, o histórico do projeto de submarinos russos, da Segunda Guerra até a década de 90, é apresentado em profundidade na referência [17]. Pormenores de sua metodologia de projeto são apresentados por Kormilitisin e Khazilev em [3] e [18].

2.6 Os submarinos modernos – Principais avanços

Segundo Burcher e Rydill [4], embora não tenham ocorrido grandes alterações na arquitetura naval de submarinos desde o início da década de 1960,

²⁶ "A comunidade russa de desenvolvimento de submarinos, apesar deste momento de difícil situação econômica, é uma prioridade nacional. Rumores de seu desaparecimento – tão frequentemente ouvidos dentro e fora da Rússia, após o colapso do comunismo – mostraram-se infundados. Os submarinos nucleares de ataque russos são agora os mais rápidos, os com maior profundidade de operação e os mais silenciosos do mundo; até mesmo o Secretário da Marinha dos Estados Unidos já admitiu tal fato. Em termos de desempenho, os submarinos russos são neste momento o padrão com o qual os demais submarinos são comparados." (Tradução livre).

progressos significativos foram alcançados, sobretudo no que concerne às características de deslocamento, velocidade e discríção acústica²⁷.

2.6.1 Deslocamento²⁸

A adoção da propulsão nuclear motivou uma tendência de aumento do deslocamento dos submarinos. Para submarinos nucleares de ataque, deslocamentos submersos superiores a 5000 t não são atípicos. Em se tratando de submarinos balísticos esse número virtualmente se triplica. Por seu turno, os submarinos convencionais têm mantido um deslocamento relativamente constante (na faixa de 1500 t a 3000 t de deslocamento submerso²⁹).

2.6.2 Velocidade

A combinação da propulsão nuclear com as formas dos modernos submarinos faz com que a velocidade submersa destas embarcações exceda a de muitos navios de superfície (há relatos de que os Classe *Alfa*, russos, seriam capazes de velocidades submersas superiores a 42 nós). Entretanto, no caso dos navios nucleares, plantas de altíssima potência e de complexa integração a bordo são requeridas (o que se traduz em impactos em sua discríção acústica, dificuldade de construção/manutenção e em aumentos de custo). Atualmente, a obtenção de velocidades maiores com plantas de menor potência (nucleares e, sobretudo, convencionais) é um desafio técnico de grande interesse. No caso de submarinos

²⁷ Grosso modo, a discríção acústica se refere à característica desejável de que o submarino irradie baixo ruído durante sua operação. O funcionamento dos equipamentos de bordo, da planta de propulsão e o próprio descolamento do submarino no meio fluido são fontes de irradiação de ruído (que pode ser detectado por sonares passivos).

²⁸ O aumento em deslocamento não se caracteriza em um avanço em si mesmo. Em realidade, esses maiores deslocamentos traduzem a integração de um número cada vez maior de sistemas, plantas de maior complexidade e navios de maior sofisticação e custo. Aspectos de construção modular e integração/teste das plantas ainda em terra, antes de sua instalação a bordo, também alicerçam a recente tendência de aumento de deslocamento. De qualquer modo, os valores atuais parecem se constituir em patamar superior para o deslocamento dos submarinos, pelo menos no médio prazo.

²⁹ Embora algumas Marinhas optem por listar o deslocamento máximo como um requisito de estado maior, em geral o deslocamento não é um "requisito" em si; mas sim um resultado de um dado conjunto de requisitos. Para dois submarinos de mesmo desempenho operativo, um submarino menor terá (por ser mais difícil de detectar), em tese, uma vantagem operativa sobre um maior. Por seu turno, maiores deslocamentos podem se traduzir, no longo prazo, em maior flexibilidade para futuras adaptações e modernizações do navio, além de maior facilidade para a construção e a manutenção do submarino.

convencionais, as velocidades máximas atuais se situam na faixa dos 20 nós. Há, entretanto, submarinos convencionais russos que atingem velocidades submersas de até 25 nós.

2.6.3 Descrição acústica

Os sonares passivos modernos, sensores preferencialmente usados em navios de superfície para a detecção de submarinos³⁰, também avançaram consideravelmente. Assim, esforços no sentido de diminuir o ruído irradiado dos submarinos são frequentemente empreendidos. Os modernos submarinos diesel-elétricos podem adotar regimes de operação reduzida das instalações de bordo. Esses regimes, aliados a uma baixa velocidade de patrulha (modo silencioso), tornam muito difícil a detecção passiva de tais embarcações³¹.

2.7 Submarinos convencionais modernos

As características gerais de dois submarinos convencionais modernos, a classe *Kilo* russa (Figura 15) e a classe 212A alemã (Figura 16) são a seguir apresentadas.

Figura 15 – O *Kilo* – 1982



Deslocamento de Superfície: 2300 t	Comprimento: 70 m	Velocidade sup: 12 nós
Deslocamento Submerso: 3000 t	Diâmetro: 9,9 m	Velocidade sub: 25 nós

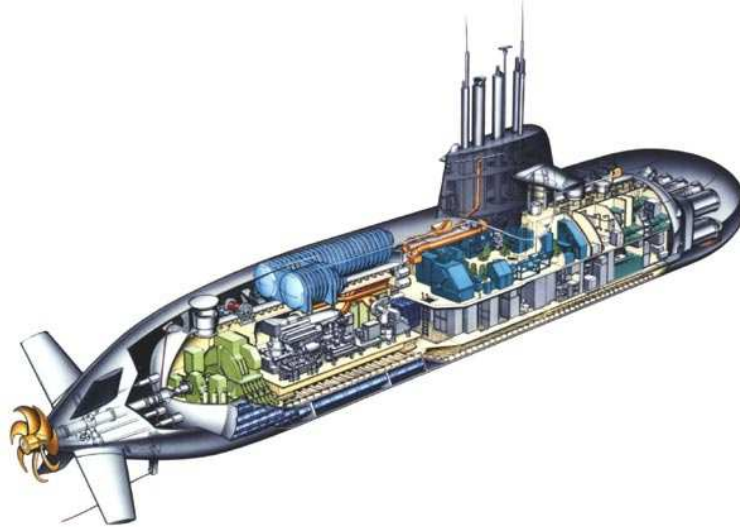
Fonte: arranjo e dados (internet)³²

³⁰ Sonares ativos também podem ser usados, mas têm o inconveniente de revelar o navio fonte da irradiação ao submarino alvo, que geralmente estará operando um sonar passivo. Os submarinos atuais dispõem de sonares passivos bastante sensíveis, capazes de detectar navios de superfície a grandes distâncias.

³¹ Uma vantagem da qual os submarinos nucleares não dispõem em totalidade. Por operarem plantas de alta potência e de grande complexidade (muitos sistemas auxiliares à operação do reator precisam funcionar permanentemente), essas embarcações tendem a irradiar mais ruído que os submarinos convencionais. Como esperado, o alto desempenho em velocidade não vem desacompanhado de degradações em outros desempenhos.

³² Arranjo obtido em <http://www.defenseindustrydaily.com/vietnam-reportedly-set-to-buy-russian-kilo-class-subs-05396> e dados obtidos em http://en.wikipedia.org/wiki/Kilo-class_submarine. Acesso em Outubro/2014.

Figura 16 – O HDW 212A – 2002



Deslocamento de Superfície: 1500 t	Comprimento: 57,2 m	Velocidade sup: 12 nós
Deslocamento Submerso: 1800 t	Diâmetro: 8,8 m	Velocidade sub: 20 nós

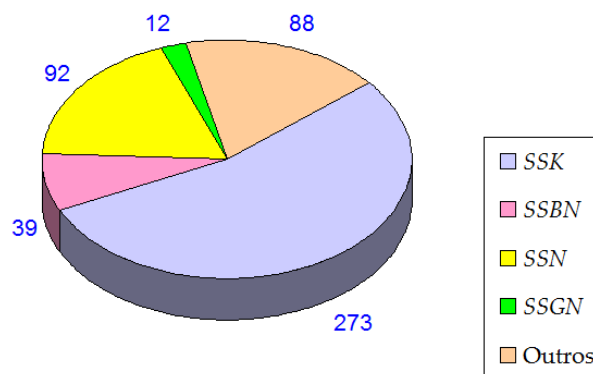
Fonte: arranjo e dados (internet)³³

2.8 Atuais Forças de Submarinos

Nos dias atuais, cerca de 40 países operam submarinos. Hoje, há aproximadamente 500 destas embarcações em serviço. China, Rússia, Estados Unidos, Inglaterra e França operam submarinos nucleares de ataque e balísticos. Os dois primeiros países também operam submarinos de propulsão convencional, enquanto os três últimos operam apenas submarinos nucleares.

O total de submarinos em operação, ao final de 2010, é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Submarinos em operação (2010)



Fonte: autor³⁴

³³ Arranjo obtido <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/hdw-class-212a.html> e dados obtidos em http://en.wikipedia.org/wiki/Type_212_submarine. Acesso em Outubro/2014.

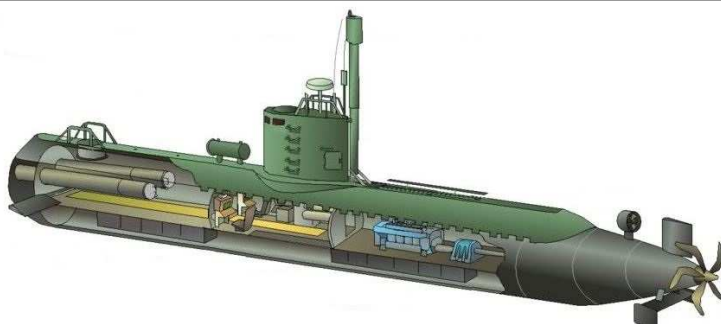
Um total de 273 submarinos convencionais (SSK) se encontra em serviço ativo. Além deles, a frota de submarinos nucleares de ataque (SSN) totaliza 92 navios; em sua maioria americanos, russos e chineses. Submarinos nucleares balísticos (SSBN) totalizam 39 navios³⁵.

Alguns submarinos nucleares (SSGN) foram convertidos, ou originalmente projetados, para o emprego de mísseis táticos convencionais (não nucleares) de longo alcance. Há 12 navios dessa categoria em operação (Rússia e EUA).

Há outros 88 submarinos em serviço ativo que não se enquadram nas descrições anteriores. A grande maioria destes (81) é constituída por embarcações de pequeno porte e propulsão convencional: conhecidas como *midget submarines*³⁶.

Esse é o caso da classe *Ghadir*, iraniana, apresentada na Figura 18. O uso desse tipo de embarcação tem crescido consideravelmente nos últimos anos³⁷.

Figura 18 – O *Ghadir* – 2004(?)



Deslocamento de Superfície: 115 t	Comprimento: 29 m	Velocidade sup: ?? nós
Deslocamento Submerso: 123 t	Diâmetro: 2,5 m	Velocidade sub: ?? nós

Fonte: arranjo (internet)³⁸ e dados [1]

Há ainda 6 submarinos de pesquisa e/ou teste usados pelos russos e 1 submarino de propulsão convencional armado com mísseis balísticos, operado pela China.

³⁴ Os números foram compilados a partir das informações da referência [1].

³⁵ As siglas utilizadas derivam da classificação, em inglês, adotada pela Marinha Americana: *Ship Submersible, Conventional* - SSK; *Ship Submersible, Nuclear* - SSN; *Ship Submersible Balistic* [mísseis estratégicos balísticos], *Nuclear* - SSBN; *Ship Submersible Guided* [mísseis de cruzeiro guiados], *Nuclear* - SSGN;

³⁶ *Submarinos-anões* (Tradução livre). Alguns autores os chamam de *minissubmarinos*.

³⁷ É o caso das Marinhas do Irã e da Coreia do Norte que desenvolveram capacidade independente de produção deste tipo de embarcação e têm investido pesadamente em sua construção e comissionamento.

³⁸ Arranjo obtido <http://www.allmilitaryweapons.com/2011/09/ghadir-class-submarine.html>. Acesso em Outubro/2014.

2.9 O mercado internacional de submarinos convencionais

Alemanha e Rússia são os líderes no mercado de exportação de submarinos convencionais modernos. Entre 1960 e 2000, os alemães haviam exportado cerca de 80 submarinos, em sua maioria de projeto *Type 209*. Entre 1985 e 2000, os russos exportaram 20 submarinos da classe *Kilo* para seis clientes diferentes [19].

Submarinos convencionais projetados por alemães e russos podem ser considerados como os melhores hoje existentes [19]. Tais projetos (o *Type 212*, o *Kilo* e as derivações de ambos) incluem tecnologias avançadas de discriminação acústica, térmica e magnética, além de sistemas de combate e gerenciamento integrado da plataforma que representam o atual estado da arte para submarinos convencionais.

Outras nações que atualmente detêm capacidade de projeto, construção e exportação³⁹ de submarinos convencionais são França, Suécia, Reino Unido, Japão, Austrália, Holanda, China e Espanha.

O mercado internacional de submarinos convencionais, e de tecnologias associadas, deve permanecer com movimentação razoável nos próximos anos, na medida em que há crescente interesse das Marinhas de muitos países em desenvolver ou ampliar suas forças de submarinos. Necessidades de reaparelhamento, e de modernização das frotas já existentes, também devem manter a demanda desse mercado relativamente aquecida.

³⁹ A capacidade de exportação é corrente ou potencial. Suécia e França mantêm pequena fatia do mercado atual. Entretanto, algumas das nações listadas não estão, no momento, engajadas de maneira mais agressiva no negócio de produção para exportação.

(página deixada intencionalmente em branco)

3 SUBMARINOS – ASPECTOS OPERATIVOS

U.S Navy exercises with diesel submarines since mid-1990s have often proved humbling. South African Daphné-class, Chilean Type 209, Australian Collins-class, and other diesel submarines have penetrated battlegroup defenses and simulated attacks on surface ships, including aircraft carriers, often without ever being detected⁴⁰.

John R. Benedict Jr.

Diesel submarines are a cost-efficient method of ensuring localized maritime superiority, or at least guaranteeing the ability of exert some measure of sea control in the face of an overwhelming adversary such as the United States. The relative cost (compared to nuclear submarines), combined with technological advances in submarine design, are making SSKs a very real threat in the littoral regions of the world⁴¹.

Jason C. Pittman

Neste capítulo, um pequeno resumo sobre o atual conceito de emprego operativo de submarinos é fornecido. Longe de esgotar o assunto, o resumo tem o objetivo de fornecer ao leitor uma introdução sobre alguns conceitos chave associados ao emprego moderno desses navios. Após uma pequena introdução sobre os aspectos gerais de operação em águas oceânicas, a discussão se foca no emprego de submarinos convencionais em operações litorâneas.

São também apresentadas as perspectivas futuras relacionadas ao uso de submarinos convencionais. Neste tópico, ressaltam-se os cenários de conflito

⁴⁰ "Exercícios da Marinha Americana com submarinos convencionais, desde meados da década de 1990, têm se demonstrado humilhantes. A classe *Daphné* sul africana, os *Type 209* chilenos, a classe *Collins* australiana e outros submarinos convencionais penetraram as defesas do Grupo-Tarefa [norte americano] e simularam ataques contra navios de superfície, incluindo porta-aviões, em geral sem nunca terem sido detectados" [20]. (Tradução livre).

⁴¹ "Submarinos convencionais são um método economicamente eficiente de assegurar superioridade marítima localizada, ou de pelo menos garantir o exercício de algum grau de controle marítimo diante de um adversário absolutamente superior como os Estados Unidos. Seu custo relativo (quando comparados com os submarinos nucleares), combinado com os avanços tecnológicos em projeto de submarinos, faz dos submarinos convencionais uma ameaça real nas regiões litorâneas do globo" [21]. (Tradução livre).

esperados, as novas tecnologias que se apresentam e a possível evolução do emprego tático de tais embarcações.

3.1 Operações oceânicas

O conceito atual de operação de submarinos em águas oceânicas (ou águas azuis) foi consolidado durante a Guerra Fria. Nesse Teatro de Operações, embora os submarinos convencionais ainda possam ser empregados, os submarinos nucleares se destacam por sua velocidade, alcance submerso e raio de ação.

As missões típicas em águas azuis podem ser divididas em:

1. Dissuasão estratégica;
2. Guerra antissubmarina;
3. Guerra antissuperfície.

3.1.1 Dissuasão estratégica

A deterrência estratégica das potências nucleares se apóia em três pilares: mísseis balísticos intercontinentais baseados em terra, bombardeiros estratégicos de longo alcance e submarinos nucleares balísticos (*SSBN*). A dissuasão estratégica naval é desempenhada pelos submarinos nucleares balísticos.

A Rússia opera atualmente 15 destes submarinos (classes *Typhoon*, *Delta III*, *Delta IV* e *Borey*), enquanto os Estados Unidos operam 14 (Classe *Ohio*). A autonomia e o raio de ação desses navios e o alcance de suas armas permitem projeção de poder sobre qualquer lugar do globo⁴².

Eles também podem ser armados com torpedos e mísseis antinavio convencionais, para autodefesa. Alternativamente, esses mísseis e torpedos podem ser armados com ogivas nucleares táticas, de menor potência.

⁴² O raio de ação, conferido pela propulsão nuclear, é tal que os submarinos podem operar em praticamente todos os oceanos do planeta. Além disso, o alcance das armas é suficiente para permitir que eles ataquem alvos em qualquer lugar do mundo sem nem mesmo ter que deixar as águas vizinhas a seus portos base.

3.1.2 Guerra antissubmarina

Durante a Guerra Fria, a missão principal dos submarinos nucleares de ataque era a localização e o acompanhamento dos submarinos balísticos do adversário.

Nos dias atuais, tal missão continua. Entretanto, as operações navais de apoio à Força-Tarefa se tornaram mais comuns. Nesse caso, os submarinos empreendem ações contra os submarinos oponentes de forma a impedir que navios da Força sejam engajados pelos submarinos inimigos.

3.1.3 Guerra antissuperfície

São ações empreendidas pelos submarinos contra os navios da Força Naval oponente. Os torpedos e mísseis antinavio são as armas empregadas neste tipo de operações.

3.2 Operações litorâneas

O fim da Guerra Fria motivou profundas mudanças na doutrina de emprego de submarinos. O cenário bipolar, de embate entre duas superpotências, deu lugar a um panorama multipolar com crescentes crises e conflitos regionais. É produto de tal transição a atual ênfase sobre cenários de emprego das forças navais em operações litorâneas [22] [19].

No caso brasileiro, pelo menos três aspectos que norteiam a formulação das hipóteses de emprego do poder naval podem levar a cenários de operações litorâneas [2]:

1. A ameaça de penetração nas fronteiras terrestres ou abordagem nas águas jurisdicionais brasileiras;
2. A ameaça de forças militares muito superiores na região amazônica;
3. Ameaça de conflito naval no Atlântico Sul.

A partir de tais itens, é possível derivar hipóteses de emprego nas quais operações litorâneas adquiram relevância (e.g. operações navais para garantir a integridade das fronteiras marítimas – 1; operações de negação do uso do mar na

área litorânea ao norte do Brasil – 2; operações navais cuja condução ou desdobramentos levem a hostilidades na área próxima à costa brasileira – 3).

Submarinos convencionais são adequados em operações litorâneas, sobretudo pois:

- a) O perfil de propagação do som e os altos níveis de ruído de fundo em águas litorâneas favorecem a ocultação dos submarinos convencionais (principalmente dos mais modernos, que possuem excelente discricção acústica);
- b) Submarinos convencionais são armas valiosas em cenários de guerra assimétrica (i.e. o embate de forças navais de grande envergadura contra uma força naval de defesa numérica e/ou tecnologicamente inferior)⁴³.

As missões atribuídas aos submarinos convencionais, engajados em operações litorâneas, podem ser divididas em:

1. Negação do uso do mar
2. Operações conjuntas com a Força-Tarefa;
3. Operações de inteligência, monitoramento e reconhecimento;
4. Operações especiais;
5. Operações de minagem e reconhecimento de áreas minadas;
6. Projeção de poder sobre terra.

3.2.1 Negação do uso do mar

Uma força de submarinos convencionais de tamanho adequado pode apoiar a condução de operações de negação do uso do mar. Nesse caso, eles podem ser usados em operações de bloqueio aos portos inimigos, ataque contra forças navais e tráfego mercante, etc.

⁴³ Tomemos o exemplo da Guerra das Malvinas, ocorrida em 1982. Um único submarino convencional argentino (*Type 209*), o *San Luis*, operou próximo à Força-Tarefa inglesa por quase um mês. Apesar do envio de cinco submarinos nucleares de ataque ao Teatro de Operações, da patrulha aérea antissubmarino conduzida 24 horas por dia e do disparo de mais de 200 armas antissubmarino inglesas (torpedos e cargas de profundidade) contra falsos contatos, a Força inglesa jamais detectou o submarino argentino. Por outro lado, o *San Luis* conduziu diversos ataques a navios ingleses; todos mal sucedidos por falha dos sistemas de direção de tiro (ultrapassados e sem manutenção) e por torpedos de baixa qualidade. Caso um dos ataques tivesse sido bem sucedido, o preço tático e, sobretudo, político para a Marinha Inglesa teria sido considerável [23].

3.2.2 Operações conjuntas com a Força-Tarefa

Submarinos convencionais podem operar em apoio à Força-Tarefa. Nesse caso, o comando tático dos submarinos é geralmente de responsabilidade do Comandante da Força-Tarefa. Durante tais operações, os submarinos podem conduzir ações antissubmarino ou antissuperfície, conforme anteriormente descrito.

A dificuldade de comunicação dos submarinos com outras plataformas deve ser levada em consideração. Não é desejável que os submarinos mantenham contato com a força durante todo o tempo, pois nesse caso eles precisariam vir à cota periscópica para içar os mastros de comunicação; e isso comprometeria sua discrição.

Em geral, os submarinos são posicionados em setores específicos, distantes do corpo principal da força a que pertencem, e executam atividade de patrulha avançada.

3.2.3 Operações de inteligência, monitoramento e reconhecimento

Os submarinos podem ser empregados em operações de inteligência, monitoramento e reconhecimento de áreas litorâneas específicas. Por meio de seus periscópios e sensores, eles podem empreender o reconhecimento visual (imagens e fotografias) de áreas de interesse e podem realizar o monitoramento das emissões eletromagnéticas do inimigo (radar e comunicações). Podem também realizar vigilância sonar próxima às áreas portuárias e bases navais inimigas.

Assim, é possível avaliar a infraestrutura de comando e controle inimiga, bem como determinar detalhes técnicos e operacionais de suas plataformas de combate.

Os dados coletados constituem importante informação de inteligência a ser usada no planejamento de operações navais ou na condução diplomática de crises (verificação antecipada de provável movimentação militar do adversário).

Além disso, os submarinos possuem capacidade militar ofensiva, caso ataques sejam ordenados. Essa opção não está disponível a algumas outras plataformas de coleta de informações e monitoramento, como satélites por exemplo.

3.2.4 Operações Especiais

Submarinos podem transportar, lançar e recolher equipes especializadas (mergulhadores de combate e/ou comandos anfíbios), encarregadas da condução de operações especiais. Uma vez infiltradas na área de objetivo, tais equipes podem executar missões de reconhecimento, monitoramento, ataque, retomada e resgate, sabotagem, etc. Após as missões, as equipes podem ser recolhidas pelo submarino.

3.2.5 Operações de minagem e reconhecimento de áreas minadas

Operações de minagem e de reconhecimento de áreas minadas podem ser empreendidas por submarinos.

Na minagem ofensiva, o submarino pode minar áreas de interesse sem que o inimigo perceba a ação. Nesse caso, o risco da operação de minagem é menor do que se ela fosse conduzida por forças de superfície ou aéreas.

O reconhecimento de áreas minadas, por submarinos, pode ser feito com o uso de sensores específicos⁴⁴.

3.2.6 Projeção de poder sobre terra

Submarinos podem conduzir ataques contra alvos de terra por meio de mísseis de cruzeiro. Mísseis de cruzeiro são geralmente empregados em submarinos nucleares (e.g. o *BGM-109 Tomahawk* americano e o russo *Novator 3M-14*).

Muitos submarinos convencionais modernos também operam mísseis que podem ser lançados a partir dos tubos de torpedo. Entretanto, em sua maioria são mísseis antinavio e não mísseis para ataque a alvos em terra. De qualquer modo, no caso de submarinos convencionais, mísseis de cruzeiro para ataque a alvos em terra já estão disponíveis no mercado de exportação (o *Novator 3M-14E*, russo, possui um

⁴⁴ Marinhadas modernas possuem veículos submersíveis não tripulados que podem ser lançados pelo submarino para a condução de missões de reconhecimento de áreas minadas.

alcance de 300 km, ogiva de 450 kg e velocidade terminal de 0,8 mach). A tendência é de que este tipo de arma se torne cada vez mais comum⁴⁵.

Os submarinos, devido a sua capacidade de ocultação, podem penetrar e operar em ambientes inacessíveis às forças navais de superfície ou às forças aéreas. Há vantagens óbvias em armar o submarino com mísseis de cruzeiro, dentre as quais se destacam:

- a) Não há necessidade de estabelecer supremacia aérea na região dos ataques;
- b) Maior flexibilidade de tempo para avaliação e realização do ataque (o submarino pode permanecer por mais tempo na região do alvo do que poderia um avião, por exemplo);
- c) Menor risco, quando em comparação com operações aéreas tripuladas (perda de aviões e pilotos).

Obviamente, os submarinos não substituem a capacidade de projeção de poder de uma força naval de superfície. Navios podem, em geral, carregar uma quantidade maior de mísseis e uma força aeronaval embarcada tem uma amplitude operacional muito maior para a condução de ataques sobre terra. Os submarinos são adequados para a realização dos ataques de vanguarda; destruindo as instalações inimigas de radar, de defesa antiaérea e de comunicações. Isso reduz as capacidades adversárias de opor resistência a ações posteriores da força naval.

3.3 Perspectivas futuras – cenários de conflito, tecnologias e emprego tático

O futuro uso dos submarinos convencionais poderá ser influenciado por mudanças em, essencialmente, três campos:

- a) Os cenários de conflito que se delineiam em médio e longo prazo;
- b) Os avanços de tecnologias específicas;
- c) A evolução de seu emprego tático.

⁴⁵ A projeção de poder depende fundamentalmente do alcance e da potência do armamento empregado. Há relatos, por exemplo, de que os *Dolphin* israelenses são capazes de operar mísseis de cruzeiro equipados com ogivas nucleares. O alcance destes mísseis seria de 1500 km [20].

3.3.1 Os cenários de conflito

O projeto de um submarino eficiente se alicerça, primordialmente, no estabelecimento de requisitos operativos consistentes com o espectro de missões e cenários de emprego atribuídos ao submarino. Entender tais cenários e missões é essencial à elaboração de requisitos operativos realistas e efetivos; sem os quais o resultado do projeto será certamente inadequado à real necessidade operativa que o motivou.

A análise do cenário de emprego e missões fatalmente deverá se estender ao médio prazo. Isto se deve à longa vida operacional dos submarinos, cerca de três décadas, somada ao tempo necessário ao seu projeto e construção, cerca de uma década. Logo, os formuladores dos requisitos devem entender não só as necessidades atuais, mas também sua provável evolução no intervalo de meio século⁴⁶.

O ambiente operacional atual, e futuro, sofre(rá) influência de [24]:

- a) Interesses econômicos de nível global;
- b) Interesses nacionais ligados à soberania, zonas de influência e questões territoriais;
- c) Esgotamento de recursos naturais e energéticos;
- d) Mudanças climáticas;
- e) Terrorismo e fundamentalismo religioso;
- f) Tráfico de drogas e crime organizado.

Conflitos assimétricos e regionais tendem a se tornar mais frequentes. Há certo consenso entre os atuais analistas de que, neste século, os conflitos no mar sejam menos frequentes em águas azuis (águas oceânicas, longe da costa) e se concentrem em águas verdes (operações próximas ao litoral). A crescente importância das operações litorâneas tem sido ressaltada por muitos autores contemporâneos [19] [21] [24].

Dessa forma, o emprego de submarinos convencionais ganha renovada importância, dada a adequação deles às operações litorâneas.

⁴⁶ Não se espera, obviamente, que o navio seja desde o início adequado a todas as missões futuras. O que se espera é que o projeto seja versátil o suficiente para permitir a atualização e modernização do submarino a custos e prazos aceitáveis.

3.3.2 Avanços tecnológicos

Avanços tecnológicos que contribuem, ou contribuirão, para a ampliação da capacidade operativa de submarinos convencionais têm sido alcançados nas seguintes áreas [19]⁴⁷:

- a) Sistemas de combate;
- b) Propulsão independente do ar (*Air Independent Propulsion - AIP*);
- c) Torpedos e minas;
- d) Mísseis;
- e) Minissubmarinos.

3.3.2.1 Sistemas de combate

Sistemas integrados de combate, para submarinos convencionais, estão atualmente disponíveis no mercado. Esses sistemas podem ser incorporados aos novos submarinos e, em alguns casos, podem ser parcial ou totalmente implantados durante a modernização de navios já construídos. Tais sistemas incluem:

- a) Sensores acústicos: modernos sonares passivos (cilíndricos e de flanco), sonares rebocados e sonares de interceptação;
- b) Sensores óticos e eletromagnéticos: medidas de apoio à Guerra Eletrônica (interceptação e determinação de marcação⁴⁸), sensores óticos e de telemetria a laser, sensores infravermelhos e mastros optrônicos de rotação automática capazes de realizar gravações de imagens;
- c) Sistema de compilação de dados: sistemas de alta performance em tráfego de dados, gerenciamento da informação e compilação do quadro

⁴⁷ As áreas citadas são agrupadas conforme [19]. Em rigor, o armamento é parte do sistema de combate e não deveria aparecer dele dissociado. Entretanto, optou-se por manter a classificação proposta na referência, com vistas a ressaltar a importância deste tópico. Há também avanços consideráveis nas áreas de redução de assinatura acústica, magnética, etc. mas que não serão especificamente discutidos neste texto.

⁴⁸ Determinar a marcação consiste em identificar a direção da qual o sinal provém.

tático, além de acompanhamento automático de alvos e estabelecimento de soluções de tiro;

- d) Outros sistemas: sistemas de navegação inercial, navegação por GPS⁴⁹ e sistemas avançados de comunicações por satélite.

O grau de automação dos novos sistemas é considerável. Isto, aliado a uma interface homem-máquina amigável, tende a aumentar a proficiência dos operadores e reduzir o número de tripulantes necessários à operação do submarino.

3.3.2.2 Propulsão Independente do Ar (*Air Independent Propulsion - AIP*)

Propulsão Independente do Ar (*AIP*) é o termo utilizado para designar tecnologias que permitem ao submarino convencional carregar suas baterias sem a necessidade de aspirar oxigênio proveniente do ambiente externo (i.e. admissão de ar externo para a operação dos DG's). Esses sistemas são em geral silenciosos e produzem pouco calor (i.e. não comprometem as assinaturas acústica e térmica do submarino).

Sistemas *AIP* modernos são baseados em⁵⁰:

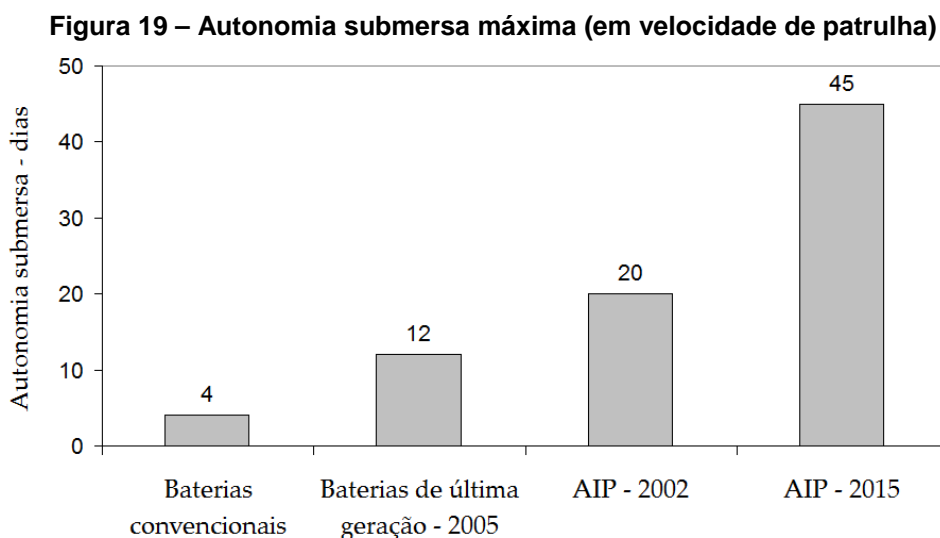
- a) Células de combustível (adotadas por alemães, russos e canadenses);
- b) Turbinas a vapor de ciclo Rankine (projeto francês, incorporado a submarinos paquistaneses da classe *Agosta*);
- c) Motores de combustão externa - *Stirling Engines* (adotados pelos suecos e japoneses);
- d) Motores diesel de ciclo fechado (adotados, entre outros, em projetos alemães, holandeses e italianos).

Atualmente, esses sistemas são usados em arquiteturas híbridas⁵¹ de propulsão e conferem ao submarino uma maior autonomia submersa, o que reduz

⁴⁹ Embora o Sistema de Posicionamento Global seja um avanço, há que se ressaltar o caráter proprietário de seu sinal. O Departamento de Defesa Americano controla a rede de satélites *GPS* e pode alterar o sinal, degradá-lo, ou interromper sua transmissão a qualquer tempo, caso haja interesse.

⁵⁰ Detalhes técnicos sobre as diversas tecnologias de *AIP* estão disponíveis em [16].

sua vulnerabilidade⁵². Autonomias submersas típicas são apresentadas na Figura 19. Ressalta-se que tais autonomias são alcançadas em velocidade de patrulha; em geral situada na faixa de 3 a 6 nós.



Fonte: adaptado [19]

Células de combustível são a forma mais popular de *AIP* atualmente utilizada [21]. O sistema alemão, por exemplo, usa células que combinam hidrogênio pressurizado e oxigênio líquido para criar calor, eletricidade e água. Esse tipo de tecnologia não aumenta a velocidade do submarino, mas aumenta o tempo em que o submarino pode empreender travessia submersa em alta velocidade (e.g. com as células atuais o submarino pode navegar por 4 horas a 20 nós).

Os alemães dotaram seus *Type 212A* (e suas variantes para exportação) com células de combustível e o sistema dá ao navio uma autonomia submersa de 20 dias a 4 nós. A Rússia oferece sistemas *AIP*, baseados em células de combustível, que podem ser implantados na classe *Kilo* e em sua derivação, a classe *Amur*. Em tese, esses sistemas confeririam ao navio uma autonomia submersa de 45 dias.

⁵¹ "Híbridas" no sentido de que os sistemas *AIP* podem ser usados em conjunto com os componentes de uma arquitetura tradicional (motores diesel, alternadores e baterias), que utilizará ar externo para promover a combustão. É possível, em tese, conceber uma arquitetura em que a propulsão é suportada apenas por sistemas *AIP*, sem aspiração de ar externo [16].

⁵² Em rigor, os sistemas permitem reduzir a **taxa de indiscrição** do submarino, termo técnico que será posteriormente definido neste trabalho. Por ora, é suficiente salientar que os sistemas permitem ao submarino carregar suas baterias sem ter que vir à cota periscópica, situação na qual o navio estará mais vulnerável à detecção e ao ataque pelo inimigo.

Os franceses desenvolveram o *MESMA (Module d'Énergie Sous-Marin Autonome)*⁵³, uma instalação a vapor de ciclo fechado que gera eletricidade a partir de um turbo alternador. O alternador é movimentado por vapor oriundo da queima de óleo diesel e oxigênio armazenados a bordo. O sistema, segundo o fabricante, pode ser incorporado a submarinos convencionais já construídos.

Motores *Stirling* foram introduzidos pelos Suecos em sua classe *Gotland* e nas classes posteriores. Essa tecnologia também é usada em alguns submarinos japoneses. O sistema queima oxigênio líquido e óleo diesel, gerando energia elétrica que pode ser empregada diretamente para a propulsão e/ou para a recarga das baterias. A queima ocorre em uma câmara de alta pressão (cujo valor é maior que a pressão do ambiente marinho externo) de forma que os gases da combustão podem ser expelidos com o submarino submerso.

Motores diesel de ciclo fechado operam por meio de uma "reciclagem" dos gases da exaustão, através de um processo de purificação. Esse processo envolve a remoção dos resíduos gasosos da combustão (como dióxido de carbono, vapor de água e óxidos nitrosos) e reinserção de oxigênio aos gases da exaustão, que são usados novamente para alimentar a combustão. O oxigênio é armazenado a bordo, na forma líquida, em tanques criogênicos. O processo também envolve a adição de um gás inerte, geralmente argônio, aos gases da exaustão⁵⁴. O gás inerte atua para preservar a eficiência termodinâmica do ciclo de combustão e para proteger os componentes internos do motor.

Estima-se que entre 2020 e 2025 o sistema *AIP* esteja presente em todos os novos submarinos convencionais [19].

3.3.2.3 Torpedos e minas

Recentemente, torpedos guiados a fio e com sistema de busca ativa/passiva são as armas mais comumente empregadas pelos submarinos convencionais. Alemanha, Rússia e Itália exportam modelos com alcance médio de 10 km [19].

Modelos mais avançados, como os desenvolvidos pela Alemanha, são extremamente silenciosos devido a avanços na forma do hélice e nos sistemas de

⁵³ Módulo Autônomo de Energia Submarina (Tradução Livre).

⁵⁴ O gás inerte é também usado para diluir o oxigênio durante a partida do motor, quando ainda não há gases de exaustão disponíveis para "reciclagem".

propulsão. Tais modelos possuem capacidade avançada de busca e são menos suscetíveis de serem neutralizados por eventuais contramedidas lançadas pelo alvo.

Os mesmos países mencionados são fornecedores de minas para mais de 50 clientes ao redor do globo [19]. Regiões litorâneas de interesse estratégico⁵⁵ podem ser minadas com facilidade, o que atrai o interesse de muitas Marinhas⁵⁶ em adquirir capacidade de minagem. Além disso, minas são armas de excelente relação custo benefício⁵⁷. Minas modernas podem operar a até 350 metros de profundidade. Alguns modelos são detonados por influência (sensores de pressão, magnéticos ou de contato direto). Outros modelos são minas ativas que, após detectar um alvo, passam a persegui-lo.

Grande parte dos submarinos modernos é capaz de operar tais minas e pode conduzir atividades furtivas de minagem no Teatro de Operações.

3.3.2.4 Mísseis

Mísseis antinavio que podem ser lançados por submarinos são fabricados por Estados Unidos (Harpoon), França (Exocet), Rússia (Novator) e China. Os mísseis têm alcance bem superior (centenas de quilômetros) ao dos torpedos e conferem capacidade tática adicional aos submarinos que os operam. Mísseis de cruzeiro para ataques a alvos de terra também têm se tornado frequentes (vide item 3.2.6).

A maioria dos submarinos convencionais modernos é capaz de lançar algum tipo de míssil antinavio [1].

3.3.2.5 Minissubmarinos

Minissubmarinos também estão disponíveis para exportação (por empresas russas e italianas). As características de tais embarcações são abaixo resumidas:

- a) Deslocamento submerso: 70 a 300 t;

⁵⁵ Como, por exemplo, o Golfo Pérsico, o Estreito de Ormuz, o Mar Vermelho, o Mar Amarelo, o Estreito da Coreia e algumas áreas costeiras do Mar do Japão.

⁵⁶ No Brasil, pesquisas voltadas para o desenvolvimento de minas são conduzidas pelo Instituto de Pesquisas da Marinha.

⁵⁷ Em 1988, durante as operações de escolta de navios kwatianos no Golfo Pérsico (operação *Earnest Will*), uma mina de 1500 dólares causou danos de quase 96 milhões de dólares a um destróier americano. Já em 1991, durante a Primeira Guerra do Golfo, a presença de áreas minadas na costa iraquiana fez com que a coalizão americana desistisse de um assalto e desembarque anfíbios [19].

- b) Tripulação: total de 10 a 14 militares (sendo 4 a 6 militares para a tripulação em si e 6 a 8 militares para operações especiais);
- c) Velocidade submersa: 6 a 12 nós;
- d) Máxima Profundidade de Operação (*Maximum Operating Depth - MOD*): 100 a 200 m;
- e) Alcance submerso: 60 a 190 milhas náuticas;
- f) Autonomia: 10 a 20 dias;

A Coreia do Norte possui hoje a maior frota de minissubmarinos do mundo (mais de 50) e tem capacidade autóctone de construção e comissionamento de tais meios navais. O Irã também tem investido consideravelmente na construção de tais embarcações.

Estes minissubmarinos podem ser transportados para longe de suas bases por navios de superfície e lançados nas áreas de operações. Eles são extremamente difíceis de detectar, sobretudo em regiões litorâneas.

3.3.3 Emprego tático

As seguintes tendências devem influenciar o emprego tático de submarinos convencionais nas próximas décadas:

- a) Forças de submarinos convencionais cada vez mais modernas;
- b) A maior ênfase em operações litorâneas;
- c) Adoção de *AIP*, mísseis de cruzeiro e outras tecnologias;
- d) Aumento das frotas de minissubmarinos;

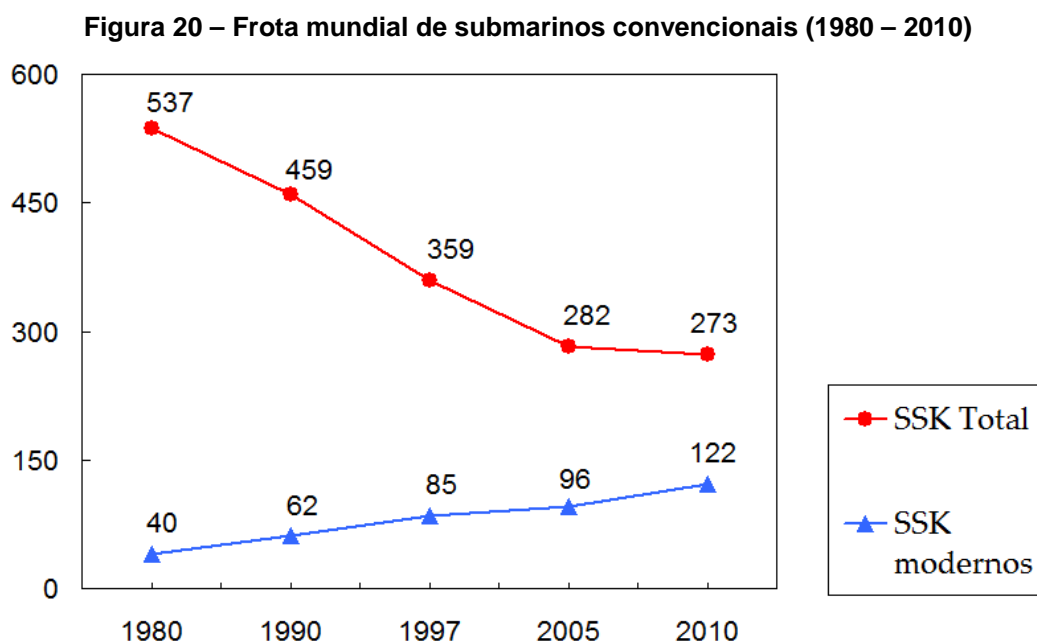
Os itens acima são resumidamente discutidos nos parágrafos seguintes.

Embora a frota mundial de submarinos convencionais tenha diminuído, após a guerra fria, o percentual de navios modernos na frota tem aumentado.

Este aumento do número de navios modernos pode ser explicado pela natural renovação da frota (i.e. descomissionamento de navios antigos, a maioria construída no início da guerra fria, e sua substituição por navios novos); pela diminuição dos orçamentos de defesa (dados os altos custos associados à manutenção de uma grande frota de submarinos); e pela proliferação, no mercado internacional, de

tecnologia militar (ou tecnologia comercial/civil, mas com aplicações militares) associada a submarinos convencionais.

A evolução da frota internacional de submarinos convencionais é apresentada na Figura 20.



Fonte: autor⁵⁸

A frota total representa todos os submarinos convencionais de grande porte existentes (minissubmarinos não foram incluídos). São considerados submarinos modernos os que incorporam tecnologias superiores àquelas presentes em seus contemporâneos (em termos de discriminação acústica, sistemas de armas, propulsão etc.). Observa-se que o total de submarinos modernos variou de cerca de 7% da frota, em 1980, para quase 45% da frota em 2010.

No que concerne ao Teatro de Operações, a ênfase em operações litorâneas, como anteriormente discutido, deve continuar nas próximas décadas. Como destacado na epígrafe deste capítulo, submarinos convencionais são armas de excelente relação custo/benefício; especialmente quando empregadas em missões de manutenção de superioridade marítima localizada ou em missões de negação do uso do mar em oposição a uma força naval numérica e/ou tecnologicamente superior. Seu baixo custo relativo (especialmente quando comparados com os

⁵⁸ Os dados foram compilados a partir das edições anuais da referência [1].

submarinos nucleares), combinado com os avanços tecnológicos antes citados, faz deles atores de proeminência em potenciais conflitos litorâneos.

Por seu turno, avanços tecnológicos relativos ao aumento da autonomia submersa, sistemas de combate e gerenciamento da plataforma e armamentos devem continuar em acentuada evolução.

Por fim, o emprego de minissubmarinos deve se intensificar. Devido as suas características, tais navios são virtualmente indetectáveis quando operando em águas litorâneas.

Como destacado anteriormente, a evolução do emprego tático será influenciada pelos fatores acima expostos. Os conflitos navais futuros tendem a ser predominantemente litorâneos e submarinos modernos e melhor armados lutarão nestes conflitos.

A maior discríção acústica aliada a uma maior autonomia submersa e armas mais letais, e de maior alcance, serão características valiosas para os submarinos convencionais. Embora essas características não alterem profundamente as formas atuais de emprego, elas ampliam as possibilidades táticas para os comandantes dos submarinos e inserem novas complexidades à condução da guerra antissubmarina pelas forças oponentes.

4 A ABORDAGEM DE PROJETO DE SUBMARINOS CONVENCIONAIS

If anyone doesn't agree that this amount of complex design cries out for an explanation, I give up⁵⁹.

Richard Dawkins

Este capítulo apresenta uma discussão sobre o projeto de submarinos convencionais, baseada em informações disponíveis em literatura aberta.

Conceitos gerais relativos ao projeto de engenharia são brevemente apresentados. Em seguida, uma descrição mais detalhada do desenvolvimento de submarinos convencionais é empreendida. As principais fases do projeto são definidas e o conceito de Espiral de Projeto é discutido. Por fim, são apresentados quantitativos típicos presentes no projeto de um moderno submarino convencional.

4.1 Definição de Projeto

Não há, na literatura técnica consultada para a elaboração desta dissertação, uma definição rigorosa da atividade de projeto de submarinos convencionais⁶⁰. Entretanto, as definições selecionadas a seguir, duas do projeto de engenharia e outra do projeto de meios navais, são adequadas ao presente escopo.

Van der Naat [8] define o projeto de engenharia como:

Engineering design can be looked upon as a process which transforms an operational need into a design description that satisfies

⁵⁹ “Se alguém discorda de que toda esta quantidade de projeto complexo clama por uma explicação, eu desisto.” (Tradução livre).

⁶⁰ Em que pese tal ausência, a consulta à literatura disponível permitiu estabelecer um contorno bastante razoável do processo de projeto de submarinos convencionais. Nesse sentido, a discussão empreendida neste capítulo baseia-se em grande parte, e com as devidas adaptações, na referência [5]. Essa obra é recomendada com empenho aos leitores que possuam maior interesse sobre o tema.

*this operational need and that submits sufficient information for subsequent stages such as tendering, detailed engineering or manufacturing*⁶¹.

Por seu turno, a RAND [25] define o projeto de engenharia naval segundo seus dois elementos principais:

*Typically, "design" is the creative activity encompassing naval architecture and all aspects of marine engineering necessary to produce a new concept or design a major modification to an existing one. In contrast, "engineering" is the application of engineering tools and principles to solve specific problems for the designer and to provide the support for the translation of the design to production. We group these two activities together in our discussion of the design process.*⁶².

Já o projeto de navios militares, conforme a definição do *Naval Sea Systems Command* (NAVSEA), é enunciado nos seguintes termos:

*Ship design, as practiced by the Naval Ship Engineering Center, is a multi-step process that is set in motion by the Navy's need for a new type of ship. The process ends with that ship defined precisely enough to solicit bids for its construction*⁶³.

Resumidamente, conforme as definições anteriores e adaptando ao caso de interesse desta discussão, depreende-se que o projeto se inicia a partir da

⁶¹ "O Projeto de Engenharia pode ser considerado como um processo que transforma uma necessidade operacional em uma descrição de projeto que satisfaz essa necessidade e submete informação suficiente para subsidiar os estágios subsequentes, como a análise de propostas/orçamentos, o detalhamento e a construção". (Tradução Livre)

⁶² "Tipicamente, "Projeto" é a atividade criativa que engloba todos os aspectos de arquitetura naval e engenharia naval necessários à produção de um novo conceito [meio naval], ou a uma modificação significativa de um conceito já existente. Em contraste, "Engenharia" é a aplicação de ferramentas e princípios de engenharia para a solução de problemas específicos de forma a apoiar a transição da etapa de projeto para a etapa de produção. Agrupamos essas duas atividades em nossa discussão do processo de projeto". (Tradução Livre).

⁶³ "O Projeto de Navios, como praticado no Centro de Engenharia Naval, é um processo de múltiplos passos, posto em movimento pela necessidade da Marinha por um novo tipo de navio. O processo termina com uma definição do navio precisa o suficiente para solicitar propostas de construção". (Tradução Livre)

identificação de uma determinada necessidade operativa do cliente. Segue-se, então, a condução de processos específicos, envolvendo conhecimentos e ferramentas multidisciplinares, que têm como resultados:

- a) A definição do conceito de um meio naval (submarino/navio) que atenda às demandas operativas originalmente estabelecidas e;
- b) A elaboração de documentação técnica em quantidade e nível de detalhe suficientes para subsidiar a etapa de produção.

4.2 Objetivos de Projeto

Segundo Burcher e Rydill [4], há três objetivos principais no processo de projeto, os quais devem ser observados ao longo de todo o seu transcorrer:

1. O produto deve atender ao propósito funcional definido pelo cliente/operador;
2. O projeto deve ser adequado à construção, respeitando as capacidades tecnológicas existentes e os recursos disponíveis;
3. O custo deve ser aceitável para o cliente.

Os autores ressaltam que estes objetivos interagem e podem se tornar, eventualmente, conflitantes. Sob determinadas circunstâncias, há ocasiões em que um dos objetivos poderá se tornar preponderante⁶⁴. De qualquer modo, é comum que todos os objetivos anteriores estejam presentes, sem que exista a dominância específica de um deles.

⁶⁴ Por exemplo:

1. Pode haver situações nas quais uma altíssima performance é exigida do produto. Ocorre que, em geral, tais níveis de performance se associam a custos elevados. Durante a Guerra Fria, por exemplo, algumas potências investiram pesadamente em projetos militares de grande envergadura (e.g. submarinos nucleares). Em tais ocasiões, o desempenho exigido era considerado primordial; pouco importando, em tese, os altos custos envolvidos. As atuais circunstâncias políticas mundiais tendem a restringir situações nas quais grande volume orçamentário seja dedicado a tais projetos.
2. Limitações tecnológicas e de infraestrutura podem tornar-se predominantes, sobretudo quando múltiplas companhias e/ou pólos de produção estão envolvidos no mesmo projeto. É necessário, por exemplo, que as limitações dos estaleiros de construção (infraestrutura e equipamentos de produção) sejam conhecidas pelos projetistas e consideradas desde as etapas iniciais do projeto.
3. Em outras circunstâncias, o custo pode ser a variável de maior importância. Nesses casos, haverá um limite de desempenho a partir do qual os custos podem tornar-se proibitivos.

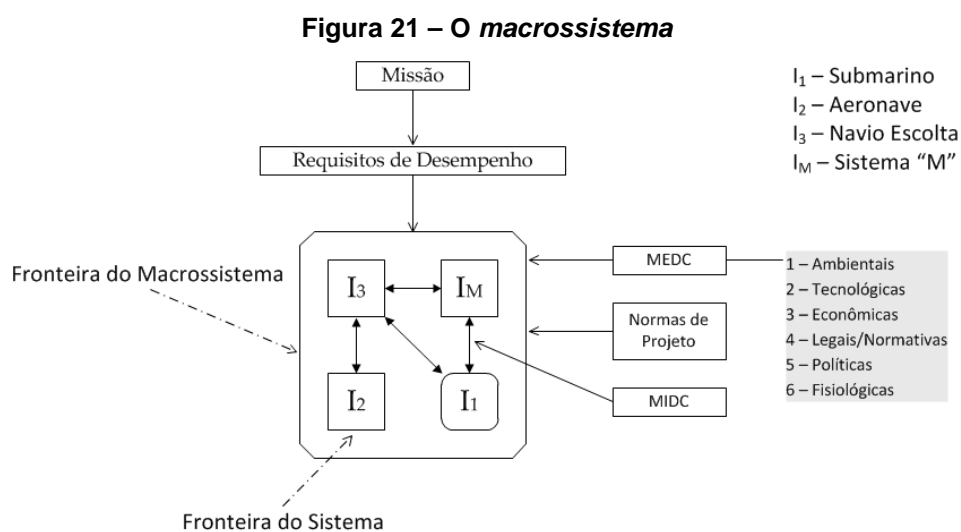
4.3 Alguns conceitos fundamentais

4.3.1 A missão e o *macrossistema*

Para o escopo desta dissertação, podemos definir um sistema como um objeto ou processo (ou grupo de objetos e/ou processos), concebido para o atendimento de um propósito ou missão específica. A missão é, em geral, definida por um conjunto de requisitos operativos. Estes são geralmente traduzidos em requisitos de desempenho para o(s) sistema(s).

O sistema concebido para o atendimento de uma dada missão pode ser vislumbrado em perspectiva mais abrangente; sobretudo quando composto por diversos sistemas individuais. Nesta dissertação, esse conjunto integrado de sistemas será denominado *macrossistema*⁶⁵.

O conceito é exemplificado na Figura 21. Observa-se que a fronteira do macrossistema engloba “M” sistemas individuais (I). Isto ilustra o fato de que, por exemplo, o submarino pode estar engajado em tarefas nas quais é apoiado por outros sistemas componentes de uma força naval e/ou infraestrutura de suporte. As tarefas individuais de cada sistema “I” são desempenhadas em prol da missão atribuída ao macrossistema. Na Figura 21, o submarino opera em conjunto com uma força naval composta de uma aeronave, um navio escolta, e outros sistemas (I_M); que podem ser bases, navios de apoio, etc.



Fonte: adaptado [5]

⁶⁵ A nomenclatura original [5] denomina tal sistema como *mission system*. A tradução literal do termo, "sistema missão", poderia gerar alguma confusão; daí a opção pela denominação *macrossistema*.

O projeto de macrossistemas geralmente envolve a utilização de sistemas já existentes e, por vezes, de sistemas ainda não existentes, mas necessários à execução da missão (eles podem ser adquiridos no mercado ou pode-se optar pelo seu desenvolvimento). Além disso, eventuais alterações em sistemas existentes podem ser necessárias (e.g. adaptação de um estaleiro/base naval à manutenção/operação de submarinos recém-adquiridos).

Os custos de alteração de sistemas existentes dependem, em geral, da magnitude das alterações. A aquisição, no mercado, de novos sistemas costuma ter um custo relativamente elevado. Por seu turno, o projeto e desenvolvimento de um novo sistema costumam ser mais caros que a aquisição de sistemas já disponíveis no mercado. É mister ressaltar que, por razões diversas, nem sempre haverá a disponibilidade ou liberdade de aquisição dos sistemas desejados no mercado (daí, diante de necessidade estratégica e/ou política substancial, seu desenvolvimento pode se tornar compulsório).

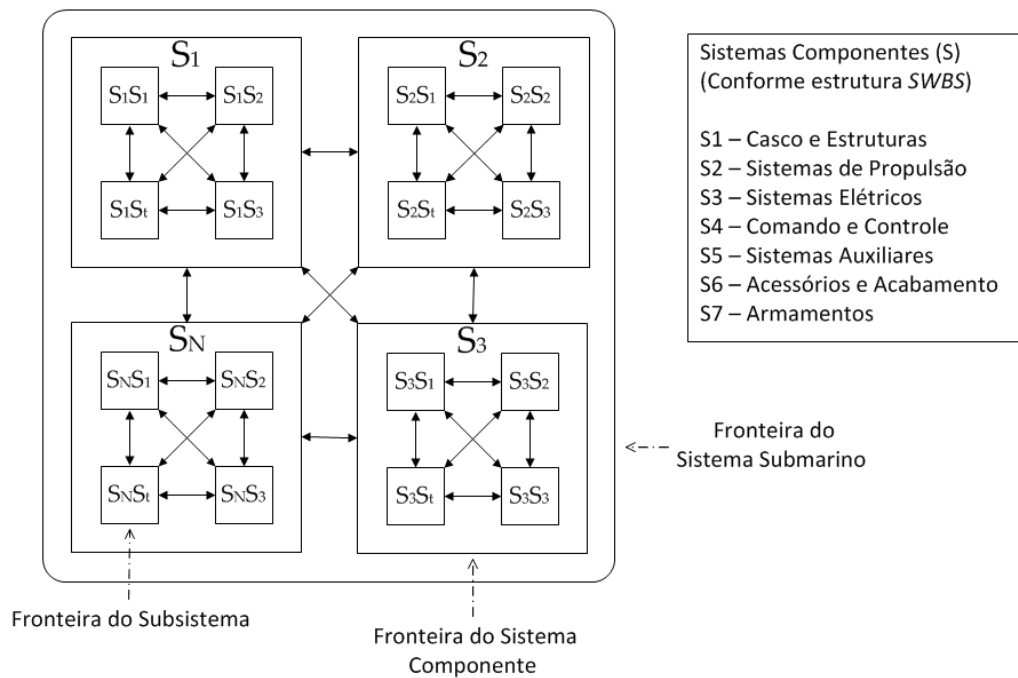
As definições acima evidenciam o fato de que o submarino não deve ser considerado isoladamente. O custo de cumprir a missão é o custo do macrossistema, e não apenas o custo do submarino em si.

O mesmo se dá em termos da efetividade militar do sistema (cumprimento da missão): é o desempenho do macrossistema (sua capacidade de conduzir as missões atribuídas), em sua totalidade, que deve ser considerado e não o desempenho de seus componentes individuais (ver itens 4.3.3 e 8.2.3).

4.3.2 O sistema submarino

Na Figura 22 temos o submarino, enquanto sistema individual, isolado do seu macrossistema. É possível notar que a fronteira do sistema submarino engloba “N” sistemas componentes (S). Exemplos de sistemas componentes são: casco e estruturas (S_1), propulsão (S_2), sistemas elétricos (S_3) etc. Cada um desses sistemas engloba “t” subsistemas (ss). Por exemplo, o sistema S_1 compreende o casco resistente, estruturas internas não resistentes, etc.

Figura 22 – O sistema submarino



Fonte: adaptado [5]

Novamente, o projeto de qualquer sistema ou subsistema do submarino pode levar à escolha de itens já existentes, que podem exigir ou não alterações. O uso de itens de mercado ou já existentes costuma reduzir o custo da embarcação. Por outro lado, o desenvolvimento de itens específicos para um dado projeto (*“made for equipment”*) costuma aumentar o custo.

Para a identificação dos sistemas/equipamentos/componentes de bordo, é conveniente estabelecer uma Estrutura Analítica de Projeto (EAP) (em inglês, *Work Breakdown Structure*). A estrutura de grupos da Marinha Americana – *Ship Work Breakdown Structure (SWBS)* – será utilizada nesta dissertação⁶⁶ e é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – *Ship Work Breakdown Structure (SWBS)*

Grupo 1	Casco e Estruturas
Grupo 2	Sistemas de Propulsão
Grupo 3	Sistemas Elétricos
Grupo 4	Comando e Controle
Grupo 5	Sistemas Auxiliares
Grupo 6	Acessórios e Acabamento
Grupo 7	Armamentos

⁶⁶ Maiores detalhes sobre o *SWBS* são apresentados no Apêndice A.

Os grupos, na tabela anterior, são mostrados em seus níveis mais abrangentes (um dígito). Aumentando o número de dígitos de cada grupo, eles podem ser desdobrados em subgrupos e assim sucessivamente. No limite e em tese, até os menores elementos individuais poderiam ser descritos pela estrutura. Ao longo do projeto, quanto maior o nível de detalhe mais desdobrada estará essa estrutura.

4.3.3 Desempenho do sistema

É o macrossistema, e não necessariamente um de seus sistemas componentes, que deve atender os objetivos da missão. Em geral, deseja-se *satisfazer um dado conjunto de requisitos de missão da maneira mais otimizada possível, considerando as restrições de projeto existentes* [5]. Otimizar o desempenho de um sistema individual não necessariamente contribuirá para a otimização do desempenho global do macrossistema.

O mesmo se dá com o submarino, quando considerado como sistema individual formado de sistemas componentes. Não é o desempenho ótimo, ou máximo, dos sistemas componentes que deve ser buscado. Isto poderá levar a um pobre desempenho do sistema submarino ou a uma solução desequilibrada (quando não levar à inviabilidade). O que se procura é a otimização do desempenho global do navio, consideradas as figuras de mérito estabelecidas e as restrições reinantes. Nesse processo, o estabelecimento de soluções de compromisso, entre o desempenho dos sistemas componentes, é praticamente inevitável. Nesta dissertação, o foco do estudo se deterá sobre o submarino enquanto sistema individual (sistema submarino)⁶⁷.

A discussão acima torna necessária uma melhor definição dos conceitos de *otimizar o projeto* e de *restrições de projeto*.

4.3.4 Otimização do projeto

O conceito de otimização será discutido e delimitado posteriormente, em capítulo específico desta dissertação. Por ora, basta salientar que, no presente

⁶⁷ Rigorosamente, o submarino não deveria ser isolado de seu macrossistema para a avaliação do desempenho, mas há razões práticas para fazê-lo. As limitações envolvidas nessa abordagem “isolada” do submarino são tratadas por alguns autores (e.g. [26]). Nesse sentido, ver item 8.2.3.

trabalho, otimizar o sistema submarino equivale a minimizar sua relação custo/efetividade, respeitadas as restrições vigentes.

Obviamente, minimizar a relação acima implica na busca de soluções de baixo custo e alta efetividade. O impasse reside no fato de serem estes atributos conflitantes: sistemas de alta/baixa efetividade tendem a possuir altos/baixos custos associados a sua produção. Em princípio, não é possível diminuir drasticamente os custos sem reduzir a efetividade. Tampouco é possível aumentar consideravelmente a efetividade sem aumentar os custos.

Assim, a otimização acaba por considerar dois objetivos conflitantes e uma solução de compromisso deve ser estabelecida.

4.3.5 As restrições de projeto

Pode haver inúmeras restrições impostas ao projeto do sistema submarino e de seus sistemas componentes (Figura 21). A classificação proposta em [5] divide as restrições em:

- a) Restrições de projeto externas ao sistema (*Mission External Design Constraints – MEDC*);
- b) Restrições de projeto internas ao sistema (*Mission Internal Design Constraints – MIDC*);
- c) Normas de Projeto (*Design Criteria – DC*);

Essas categorias são definidas nos itens seguintes.

4.3.5.1 Restrições de projeto externas ao sistema (MEDC)

Restrições de projeto externas ao sistema (*MEDC*) são restrições cujas fontes se situam fora das fronteiras do macrossistema ou do sistema submarino. Elas são independentes da missão (i.e. qualquer que seja a missão atribuída ao sistema, elas existirão). As *MEDC* podem ser de natureza ambiental, tecnológica, econômica, legal/normativa, política, fisiológica, etc.

O grau de controle de que o projetista dispõe sobre as *MEDC* é variável. Por exemplo, ele não detém controle sobre os parâmetros ambientais externos

(temperatura, pressão, densidade da água, etc.), restando apenas a opção de entender as restrições impostas ao sistema pelo ambiente externo. No caso das restrições tecnológicas, há algum controle possível durante a escolha das tecnologias a utilizar no projeto (a escolha do material do casco, por exemplo, permite a seleção das características físicas desejáveis). Após a escolha, entretanto, as características se tornam restrições.

Algumas *MEDC* podem variar com o tempo. Tecnologias, marcos legais/normativos e condições econômicas podem se alterar no período entre o início do projeto e a construção do submarino. A antecipação de potenciais alterações é desejável em termos de gerenciamento do projeto, já que seus impactos em custo/prazos podem ser significativos.

4.3.5.2 Restrições de projeto internas ao sistema (*MIDC*)

Restrições de projeto internas ao sistema (*MIDC*) possuem fontes situadas dentro das fronteiras do macrossistema ou do sistema submarino (ou de seus subsistemas). Elas decorrem da interação entre os sistemas e podem ter influência sobre o projeto. Na Figura 21 e na Figura 22, estas interações são indicadas por setas. O grau de interação entre sistemas pode variar. Alguns sistemas podem estar totalmente “desacoplados” (não interagem) enquanto outros podem possuir alto grau de interação⁶⁸. Observe, na situação hipotética da Figura 21, que o submarino (I_1) interage com o navio escolta (I_3), mas não interage com a aeronave (I_2).

4.3.5.3 Normas de projeto

Normas de projeto impõem padrões ao projeto dos sistemas e/ou à escolha de certos componentes. As normas de projeto estrutural e normas de desempenho para equipamentos críticos, entre outras, são exemplos de normas que podem impor

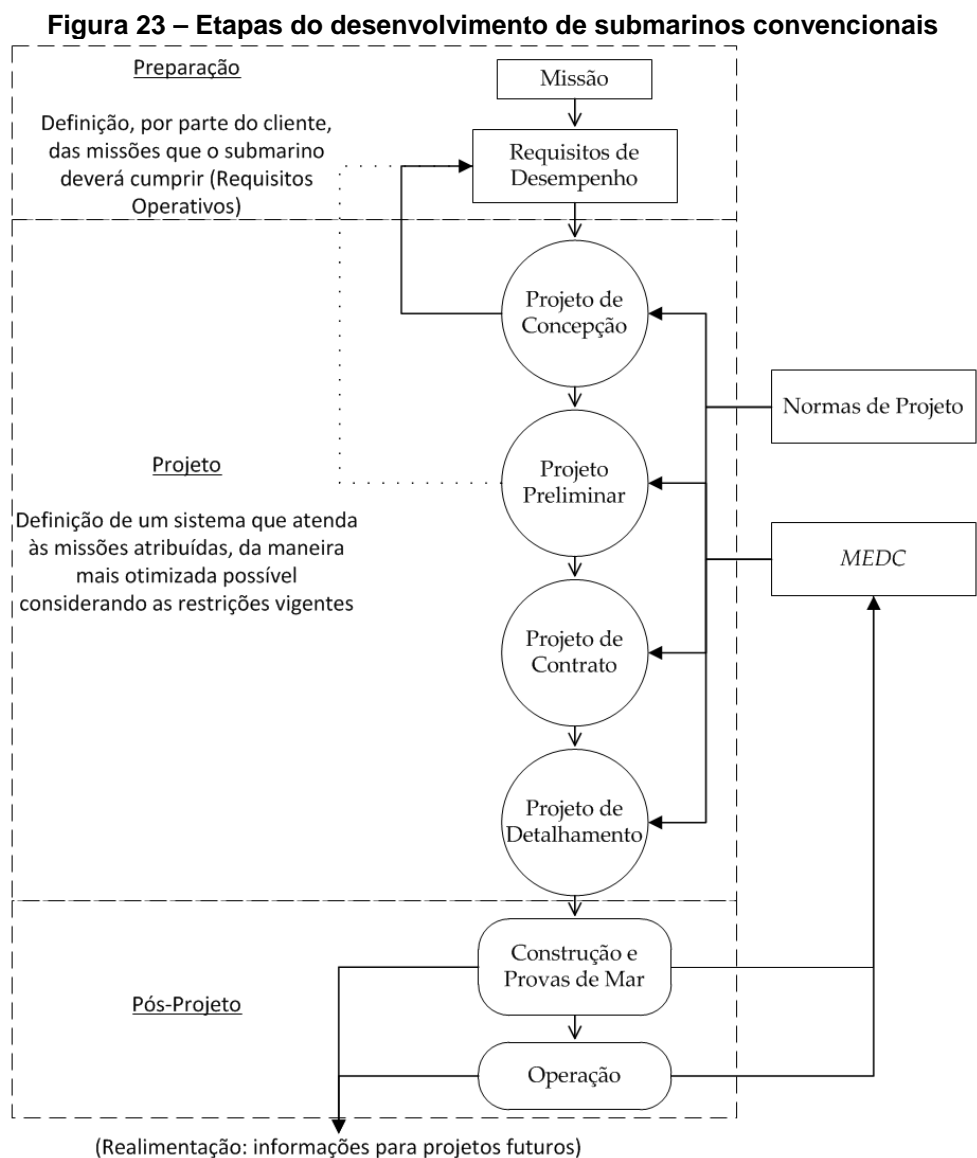
⁶⁸ Alguns exemplos, tomando o sistema submarino, podem tornar mais claros os conceitos expostos. A escolha das baterias do submarino, por exemplo, pode impor restrições, ou parâmetros de desempenho mínimo, ao projeto do sistema de ventilação do submarino. É necessário assegurar ventilação adequada nos compartimentos de baterias, para evitar a concentração indesejável de hidrogênio no compartimento, que pode ocorrer devido ao processo de carga e descarga das baterias. Em níveis críticos, essa concentração pode ocasionar explosões. Outro exemplo se refere à compatibilidade eletromagnética entre equipamentos, que pode resultar em restrições ao arranjo de compartimentos (segregação entre equipamentos) ou em restrições de projeto/performance para alguns equipamentos elétricos.

restrições ao projeto. As normas podem ser elaboradas pelo usuário/Marinha, por escritórios de projeto, por Sociedades Classificadoras, etc.

4.4 O desenvolvimento de submarinos convencionais

4.4.1 Etapas do desenvolvimento

O desenvolvimento de submarinos convencionais pode ser dividido em três etapas; a preparação, anterior ao projeto, o projeto em si e a etapa posterior ao projeto.



Fonte: adaptado [5]

Em cada uma dessas etapas, informações específicas serão produzidas. Essas informações servirão de subsídio às etapas futuras ou a atividades internas situadas na etapa em questão. As etapas são graficamente representadas na Figura 23 e brevemente descritas a seguir.

4.4.1.1 Período de Preparação

No período de preparação, com base em um conjunto de necessidades geradoras, é estabelecida a missão que será atribuída ao submarino e os requisitos a ele impostos [Requisitos de Estado Maior (REM) e Requisitos de Alto Nível de Sistemas (RANS)⁶⁹]. A formulação da missão e requisitos associados é geralmente conduzida pelo Setor Operativo, cliente final do submarino, com ou sem a participação de pessoal especializado em projeto⁷⁰.

O conjunto de requisitos tipicamente formulados⁷¹, e seu grau de detalhe, varia de acordo com o cliente. Em alguns casos, eles podem ser mais genéricos, deixando maior liberdade ao projetista para o estabelecimento das soluções. Em outros, podem ser mais detalhados, estabelecendo linhas gerais ou até mesmo, em casos extremos, disposições sobre quais soluções deverão ser adotadas (e.g. dimensões principais do navio, tipo de tecnologia a aplicar em dados sistemas, etc.)⁷².

4.4.1.2 Projeto

A etapa de projeto, em geral, engloba quatro subetapas:

- a) Projeto de Concepção (item 4.4.2.1);

⁶⁹ Essa nomenclatura, adotada na Marinha do Brasil, possui definição específica cuja discussão transcende os objetivos deste trabalho. Em termos extremamente simplificados, pode-se afirmar que os REM se situam em nível mais amplo, estando mais relacionados à missão do navio, enquanto os RANS são mais ligados às tecnologias e sistemas componentes. Tal fronteira, entretanto, não é rígida. Neste trabalho, o termo Requisitos de Estado Maior refere-se à totalidade dos requisitos, sendo empregado indistintamente.

⁷⁰ Embora não seja compulsória, a participação de pessoal especializado em projeto na elaboração dos requisitos é extremamente importante, por auxiliar na definição de requisitos sólidos, realistas e factíveis.

⁷¹ Baseado em literatura aberta, o Apêndice B apresenta os tópicos geralmente constantes nos REM para submarinos convencionais.

⁷² De qualquer modo, é desejável que os principais desempenhos do submarino (velocidade, armamento, assinaturas, etc.) estejam claramente definidos nos requisitos. Além disso, é preferível que os requisitos sejam enunciados em termos de seus limites (valor ideal desejável e limite mínimo aceitável).

- b) Projeto Preliminar;
- c) Projeto de Contrato;
- d) Projeto de Detalhamento.

A quantidade de recursos humanos e materiais necessários à condução do projeto cresce exponencialmente, à medida que essas etapas sucessivas são executadas [5]. A oportunidade para explorar configurações alternativas e soluções inovadoras se limita ao Projeto de Concepção e, muito raramente, aos estágios iniciais do Projeto Preliminar. Por ocasião do início do Projeto de Contrato, o sistema submarino deve estar solidamente definido.

4.4.1.3 Pós - Projeto

A etapa de pós-projeto compreende as atividades de construção/alteração, testes/provas de mar e operação/manutenção do submarino. A experiência adquirida na condução dessas atividades constitui fonte de informação preciosa para novos projetos. Problemas encontrados durante a construção, integração e operação servirão de realimentação, permitindo o aprimoramento dos projetos futuros.

4.4.2 Projeto - subetapas iniciais (Projetos de Concepção e Preliminar)

O foco das duas primeiras subetapas se detém sobre a definição de *“como atender da melhor maneira possível a necessidade expressa nos requisitos operacionais”* [5]. Em geral, essas fases envolvem:

1. A elaboração, a partir dos requisitos operativos expressos pelo cliente, de requisitos de engenharia e dos critérios de desempenho dos diversos sistemas de bordo;
2. A definição das principais características dos sistemas de bordo, necessárias para atingir os critérios de desempenho estabelecidos na etapa anterior. A partir dessa definição, é possível selecionar sistemas disponíveis no mercado ou iniciar o desenvolvimento de sistemas específicos para o projeto em questão;
3. A estimativa dos custos (de aquisição/desenvolvimento e de operação) dos sistemas;

4. A identificação de uma ou mais alternativas de solução que atendam o mais completamente possível as necessidades do cliente, consideradas as restrições vigentes;
5. O refinamento da alternativa selecionada e das estimativas de custo associadas. O resultado desse refinamento será utilizado para o prosseguimento das demais etapas.

O Projeto Conceção (item 4.4.2.1), se ocupa dos passos 1 a 4 acima. O passo 5 é coberto durante o Projeto Preliminar (item 4.4.2.2).

4.4.2.1 O Projeto de Conceção

O Projeto de Conceção se inicia após o estabelecimento da necessidade operativa que motivou o desenvolvimento do submarino. Em suma, analisa-se a missão atribuída ao submarino e as opções tecnológicas disponíveis para assegurar seu cumprimento.

Esta etapa envolve a tradução da necessidade operativa em requisitos de engenharia, o estabelecimento das variáveis de projeto apropriadas, a escolha das principais tecnologias (sistemas/equipamentos) aplicáveis e a identificação do espaço de projeto que será explorado (modelo de síntese/processo de otimização).

Nela, o diálogo entre o setor operativo, a equipe de projeto e certos especialistas em áreas chave⁷³, associadas aos sistemas de bordo, é essencial. O diálogo franco e objetivo entre tais atores tende a favorecer o estabelecimento de soluções robustas, versáteis e adequadas às necessidades operativas que motivaram o projeto.

Em regra, para a conclusão efetiva dessa fase de projeto, embora frequentemente o número de pessoas envolvidas seja reduzido, são necessários engenheiros/projetistas com amplo conhecimento sobre os sistemas de bordo, familiarizados com questões operativas e de planejamento e com experiência considerável na condução de projetos navais.

⁷³ Esses especialistas podem ser membros das equipes de engenharia com profundo conhecimento de certos sistemas, membros da Academia ou mesmo pessoal técnico ligado aos desenvolvedores de certos equipamentos de bordo (e.g. sistemas de combate, propulsão, etc.).

À medida que as potenciais alternativas de projeto são formuladas, soluções de compromisso são estabelecidas entre os diversos atributos do navio (e.g. desempenho militar do submarino, disponibilidade, custo, construtibilidade, etc.).

Ao final do Projeto de Concepção, a definição de uma solução de projeto candidata (ou de soluções de projeto candidatas) deverá ser resumidamente especificada, em termos de:

- a) Dimensões e características principais;
- b) Armamento, sensores e componentes principais;
- c) Desempenho militar (*OMOE*);
- d) Custo.

Documentação específica, associada a essa(s) solução(ões), também será produzida e disponibilizada ao final dessa fase (e.g. relatórios técnicos, memoriais de cálculo, arranjo geral preliminar, etc.).

O foco desta dissertação se detém sobre as considerações comuns a essa fase de projeto.

4.4.2.2 O Projeto Preliminar

Nesta fase, a solução candidata escolhida é refinada. Alternativas de configuração, leiaute do navio e arquitetura dos diversos sistemas são avaliados.

Soluções de compromisso são estudadas em um nível maior de detalhe e estabelecidas de maneira mais sólida. Estruturas, hidrodinâmica, discríção acústica e sistemas de combate são objeto de análise mais aprofundada.

Ao término desta fase, os requisitos de performance e integração dos diversos sistemas de bordo são estabelecidos em nível mais detalhado. O mesmo ocorre com a definição do submarino (características principais, *OMOE*, custo, etc.) e com a documentação técnica produzida.

4.4.3 Projeto - subetapas finais (Projetos de Contrato e Detalhamento)

4.4.3.1 O Projeto de Contrato

Nesta fase os requisitos de desempenho, a configuração do submarino e a arquitetura dos sistemas de bordo são definidos em nível de detalhe suficiente para permitir a avaliação de propostas e a negociação/celebração de contratos para a construção do navio.

Todos os subsistemas estarão suficientemente definidos e as estimativas de custo solidamente estabelecidas. Dessa forma, há informação suficiente para subsidiar as negociações e o estabelecimento das cláusulas contratuais definitivas.

Uma série de documentos técnicos e desenhos detalhados é produzida ao final desta fase (especificações e desenhos de contrato).

4.4.3.2 O Projeto de Detalhamento

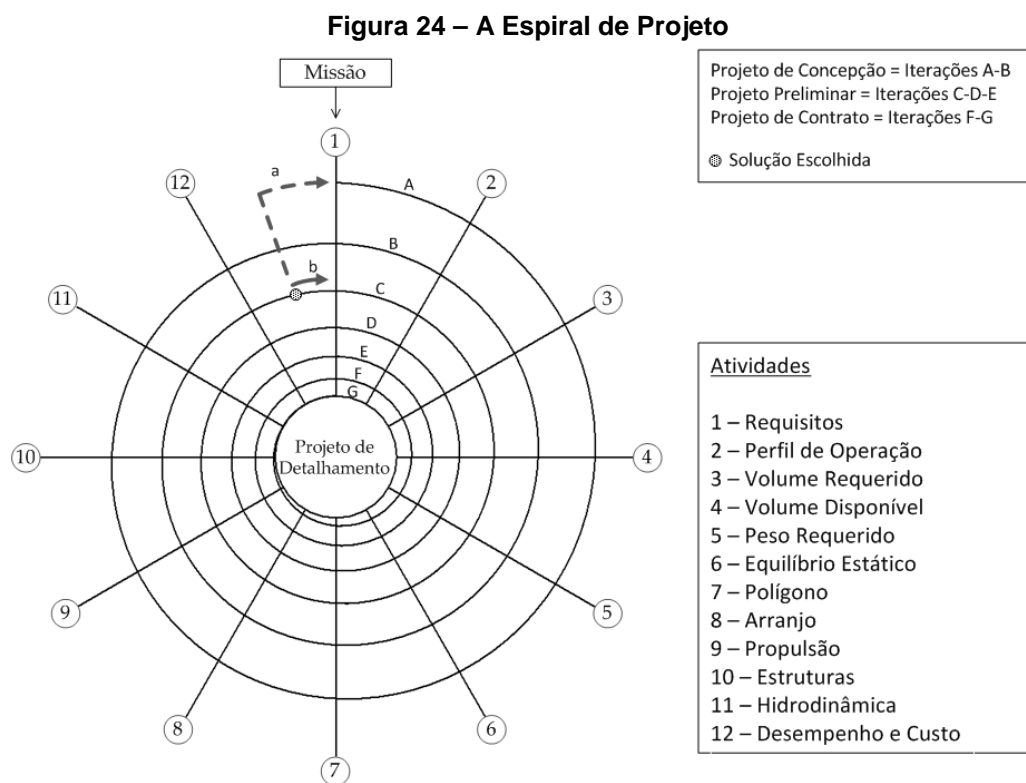
Esta fase consiste no desdobramento dos requisitos e arquiteturas estabelecidos nas subetapas anteriores. As arquiteturas dos sistemas são detalhadas e são elaborados desenhos e documentação técnica voltados à construção do submarino. Produtos típicos dessa fase são os desenhos de produção, ordens/especificações de construção, procedimentos de teste e verificação dos sistemas, documentos relacionados à lógica e sequência de construção, etc.

4.5 A Espiral de Projeto

As fases de projeto anteriormente descritas comportam processos e atividades em que múltiplos aspectos de engenharia naval são avaliados. O processo desenvolvido tem natureza essencialmente iterativa (i.e. as considerações não são vistas apenas em perspectiva isolada, mas também em termos de suas inter-relações e soluções de compromisso necessárias). Tal natureza iterativa é em geral ilustrada por uma Espiral de Projeto (Figura 24), conceito originalmente proposto por Evans [27].

Na espiral ilustrada, as atividades/considerações de engenharia são representadas por retas com extremidades numeradas. As diversas iterações, indicadas por letras maiúsculas, são representadas pelos *loops* da Espiral. Intersecções entre os *loops* e as retas formam pontos, que podem ser identificados alfanumericamente (1A, 3D, etc.) e indicam etapas específicas do projeto.

Em regra, as etapas são sucessivamente cumpridas, aumentando o grau de detalhamento do projeto à medida que as iterações se sucedem⁷⁴. Nas iterações iniciais, uma grande quantidade de informação é adicionada ao projeto entre dois *loops* consecutivos. Durante o processo, diversos ajustes são necessários para garantir a consistência da solução. Posteriormente, uma menor quantidade de informações é agregada ao projeto entre *loops* adjacentes e a quantidade de ajustes necessários tende a ser menor. Esses fatos são graficamente representados por distâncias decrescentes entre *loops* adjacentes da espiral.



Fonte: adaptado [5]

⁷⁴ Sobretudo nas iterações iniciais, uma ou mais etapas podem ser tratadas de forma bastante simplificada, ou mesmo não ser avaliadas, enquanto outras etapas podem ser executadas de forma mais minudente. O grau de refinamento das ferramentas de análise utilizadas também tende a variar, em geral aumentando conforme o projeto avança.

Por exemplo, o ponto 3A indica a atividade na qual o volume requerido é analisado durante a primeira iteração. Após diversas considerações envolvendo outros aspectos de projeto (4A, 5A, etc.), e respectivos ajustes, o volume requerido é novamente avaliado, agora em maior detalhe, na segunda iteração (ponto 3B). No limite, o número de ajustes no projeto diminui a tal ponto que a convergência é alcançada (há solidez suficiente na solução para que o projeto prossiga para a etapa de detalhamento). Isso é representado pela forma circular do *loop* mais interno da espiral.

Na Figura 24, o projeto de concepção engloba as iterações A e B. Após as análises típicas dessa fase, uma solução candidata deve ser selecionada para o prosseguimento do projeto. Nesse momento, a solução é analisada em termos de sua adequação (no presente trabalho, analisa-se sua viabilidade, seu desempenho militar e seu custo) diante dos requisitos originais e das restrições de projeto. A seleção da solução candidata é representada por um ponto sobre o *loop* B na Figura 24.

Após a seleção, há basicamente duas possibilidades: a solução é julgada adequada e prossegue-se para as iterações posteriores (representadas pela trajetória "b" na figura), ou é inadequada e o processo é reiniciado (trajetória "a" da figura)⁷⁵.

Prossegue-se então para as etapas de projeto preliminar (*loops* C-D-E) e projeto de contrato (*loops* F-G)⁷⁶. A iteração prosseguirá até que a solução convirja o suficiente para permitir o início do projeto de detalhamento⁷⁷.

⁷⁵ O leitor atento provavelmente questionará o que motivaria tal retorno ao início do processo, uma vez que a viabilidade das soluções candidatas já foi avaliada e, em tese, a solução selecionada é adequada aos requisitos e restrições de projeto. Entretanto, eventualmente, informações advindas do próprio processo de busca e estabelecimento das soluções podem levar à reformulação dos requisitos ou motivar a flexibilização de restrições (por exemplo, custos muito próximos dos patamares proibitivos para todas as soluções viáveis candidatas). Nesse caso, diante de novos requisitos/restrições, a solução pode deixar de ser adequada e uma nova busca pode ser necessária.

⁷⁶ Na discussão apresentada, o número de iterações por etapa de projeto foi definido arbitrariamente e tem caráter meramente ilustrativo. Na prática, esse número pode variar.

⁷⁷ Outra forma de abordagem do projeto, alternativa ou complementar ao conceito de Espiral de Projeto, é a abordagem de Engenharia Concorrente, originária da Engenharia de Sistemas e que tem adquirido relevância em Engenharia Naval, sobretudo nas escolas europeias de projeto [8], e na área de Engenharia Aeronáutica [28]. Ela divide o desenvolvimento e a operação do submarino em Fases (A, B, C, D, E e F) que englobam da concepção do navio ao seu descomissionamento. Nessa sistemática, as Fases de Projeto (Fases A a C) são divididas em atividades, que podem ser conduzidas em série ou paralelamente, cujo teor se assemelha aos aspectos abordados na Espiral de Projeto. Após cada atividade, há uma avaliação da solução em termos globais (verificação da consistência do projeto) e a decisão em favor do prosseguimento para as próximas atividades ou contrária ao prosseguimento (com a conseqüente repetição de atividades anteriores).

4.6 Força de trabalho, quantitativos e prazos envolvidos

A descrição sumária das etapas do desenvolvimento de submarinos convencionais, conforme apresentada nos itens anteriores, pode não fornecer uma idéia adequada das reais proporções que a atividade assume. Um contorno mais palpável, em termos de recursos e prazos envolvidos, pode ser delineado a partir da apresentação dos quantitativos típicos presentes no desenvolvimento de submarinos alemães modernos⁷⁸.

O desenvolvimento de um novo submarino convencional (da concepção às provas de mar) leva de 10 a 13 anos (Figura 25). A modificação de um projeto já existente, de acordo com necessidades específicas do cliente, exige um tempo de 7 anos (da adaptação do projeto às provas de mar). Quanto ao submarino em si, no caso de um modelo dotado de *AIP* e com cerca de 60 metros de comprimento, temos aproximadamente:

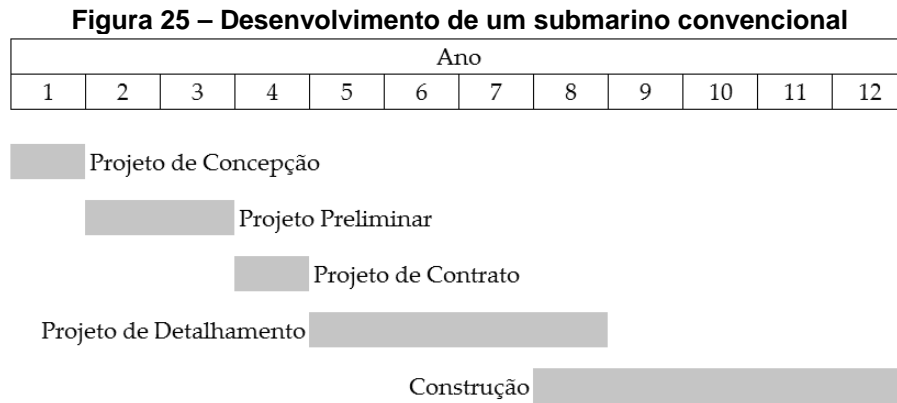
- 350 mil componentes;
- 300 equipamentos principais (grandes dimensões e peso);
- 500 metros de dutos de ventilação;
- 60 km de cabos;
- 25 km de tubulações.

Quanto à força de trabalho, prazos e documentação envolvida, temos cerca de:

- 700 engenheiros (não computado o pessoal de subcontratadas);
- 40 mil documentos de projeto;
- Duração do projeto de concepção = 1 ano;
- Duração do projeto preliminar/contrato = 3 anos;
- Duração do projeto de detalhamento = 4 anos;
- Duração da construção = 5 anos.

⁷⁸ Os dados foram disponibilizados por R. Budell, executivo da *TyssenKrupp Marine Systems*, em seu artigo "*Future Submarine Programmes: Observations/Lessons*" e respectiva palestra proferida durante a conferência *Warship 2014: Naval Submarines & UUV*, realizada em Bath (Reino Unido) em Junho/2014. O artigo citado consta dos anais da conferência.

O prazo do desenvolvimento de um submarino convencional típico, baseado nos dados acima, é apresentado na Figura 25.



Fonte: autor (elaborado com base em [29])

Naturalmente, esses prazos típicos podem sofrer variações apreciáveis (aumentos), sobretudo se o projeto é pioneiro e/ou conduzido por equipes não dotadas da experiência e/ou qualificação técnica apropriadas.

De forma semelhante, os prazos podem se dilatar consideravelmente na ausência de um planejamento adequado, na falta de aporte apropriado de recursos (financeiros/capital humano) e no caso de indisponibilidade ou imaturidade das tecnologias chave associadas (propulsão, sistemas de combate, softwares de integração e gerenciamento da plataforma, etc.).

(página deixada intencionalmente em branco)

5 O PROJETO DE SUBMARINOS CONVENCIONAIS – ESPECIFICIDADES

*If we are going to try to make some progress by boldly oversimplifying, we should at least alert ourselves to some of the complications we are temporarily setting aside.*⁷⁹

Daniel C. Dennett

Este capítulo aborda algumas especificidades relativas ao projeto de submarinos convencionais. Embora alguns destes aspectos não sejam detalhadamente considerados durante o projeto de concepção, é de interesse que o projetista tenha uma compreensão adequada de sua natureza e da forma como eles afetam globalmente o projeto.

Esgotar tais assuntos não é objetivo do capítulo. Essas especificidades são tratadas qualitativamente em [4], enquanto uma abordagem mais quantitativa é apresentada em [3] e, especialmente, em [5]. Esta última referência fundamenta boa parte da discussão aqui apresentada. Remete-se, a tais fontes, o leitor interessado em maiores aprofundamentos.

5.1 O ambiente de operação

Muitas características e propriedades do ambiente marinho são de interesse fundamental para os projetistas e operadores de submarinos. Em realidade, todos os aspectos do projeto de submarinos são afetados, em grau variado de intensidade, por fatores ambientais [5]. Como anteriormente notado, os fatores ambientais serão fontes de *MEDC* para o projeto (restrições que são independentes da missão ou externas à missão).

É conveniente analisar o ambiente marinho com base em seu perfil vertical. Dessa forma, três áreas podem ser delimitadas: atmosfera, coluna d'água e leito

⁷⁹ “Se vamos tentar fazer algum progresso por meio de simplificações audazes, deveríamos ao menos estar alertas quanto algumas das complicações que estamos deixando temporariamente de lado.” (Tradução livre)

marinho. As duas primeiras áreas, bem como a transição entre elas, são a seguir discutidas.

5.1.1 A atmosfera

Condições atmosféricas (temperatura, vento, precipitação, neblina, etc.) afetam a operação do submarino quando navegando em superfície. As considerações de projeto relacionadas a essa condição de navegação são muito semelhantes àsquelas presentes em navios de superfície. Por exemplo:

- a) Momentos de inclinação devidos à atuação de ventos devem ser considerados durante a análise de estabilidade dinâmica do submarino;
- b) Em regiões sujeitas a baixas temperaturas, a possibilidade de acúmulo de gelo nas áreas externas do navio deve ser considerada nos cálculos de estabilidade;
- c) A temperatura externa deve ser levada em consideração no cálculo da carga térmica durante a operação em superfície (dimensionamento das plantas de condicionamento de ar);
- d) O submarino deve possuir sistemas destinados à navegação (e.g. radar, *GPS*, luzes de navegação, etc.).

5.1.2 A interface atmosfera/oceano

A interface entre a atmosfera e o oceano é formada pela superfície do mar. As condições da superfície do mar (corrente, ondas, presença de gelo, etc.) afetam a operação de submarinos na superfície. Algumas considerações de projeto relacionadas a esse ambiente são:

- a) A ação de ondas na superfície (estado de mar) deve ser considerada. Ela afeta o projeto das estruturas externas (efeitos de *wave-slap*), os cálculos de estabilidade e as análises de comportamento no mar;
- b) A presença de gelo na superfície, caso o navio opere em águas polares, deve ser levada em conta para o cálculo estrutural da vela e superestrutura (i.e. devido à possibilidade de emersão sob a camada de gelo).

5.1.3 A coluna d'água

Durante a maior parte do tempo, os submarinos operam em condição submersa permanecendo no interior da coluna d'água. Dessarte, esse é o ambiente com maior influência no projeto.

As características da água do mar (e.g. temperatura, salinidade e densidade) variam significativamente entre a região próxima à superfície e uma profundidade de 1000 metros (a partir daí, tendem a manter-se constantes). Essas variações devem-se, em grande parte, às trocas de calor entre o ar e a superfície do mar, bem como às precipitações. Tais características ambientais, individual ou coletivamente, exercem influência sobre muitos aspectos do projeto e da operação de submarinos (e.g projeto estrutural, sonares, sistemas auxiliares, etc.) [5].

A densidade da água do mar é talvez a mais importante dessas características. Valores típicos de densidade da água do mar (ρ_{sw}) situam-se na faixa de 1020 a 1030 kg/m³. Sua influência no projeto do submarino alcança áreas como:

- a) Projeto estrutural (ver item 5.4) do casco resistente (CR), uma vez que a pressão hidrostática, principal carregamento ao qual o submarino está submetido, é função da densidade;
- b) Projeto do sistemas de compensação do navio (ver item 5.7.4), uma vez que esses sistemas devem prover capacidade de compensação adequada diante das variações de densidade encontradas durante a operação do submarino⁸⁰;

A variação dos fatores ambientais também afeta o perfil de propagação do som no interior da coluna d'água, pois a velocidade do som na água do mar é função da temperatura, salinidade e pressão (crescendo proporcionalmente aos fatores). Essa variação origina "dutos de propagação" e "zonas de sombra" e a presença dessas regiões afeta o desempenho dos sonares (alcance sonar). A compreensão desse fenômeno e a identificação dessas regiões são de interesse subsidiário no

⁸⁰ A força de flutuação (empuxo) também é função da densidade, daí o equilíbrio do navio (peso = empuxo) é afetado pelas variações de densidade. A admissão/expulsão de água pelo sistema de compensação permite variar o peso do submarino, diante das variações de empuxo, e reequilibrar o navio.

dimensionamento dos sistemas de bordo, mas de interesse fundamental na operação do submarino⁸¹.

Os processos dinâmicos de formação de ondas também afetam o projeto. Os efeitos de ondas na superfície se propagam para o interior da coluna d'água e são apreciáveis, sobretudo durante a operação em cota periscópica (e.g. tendência de "sucção" do navio em direção à superfície). O projeto dos sistemas de compensação e, mormente, dos sistemas de controle e governo do navio (manutenção de cota) é influenciado por tais efeitos⁸².

5.2 Hidrostática e Hidrodinâmica

A Mecânica dos Fluidos é um campo fundamental da engenharia aplicada ao projeto de estruturas flutuantes e alcança, naturalmente, o projeto de submarinos [5]. Em geral, o assunto é dividido em Hidrodinâmica e Hidrostática; esse último campo, em rigor, podendo ser considerado um caso especial do primeiro (i.e. na ausência de movimento relativo entre o submarino e o meio fluido circundante). Neste contexto, é de interesse o estudo dos principais esforços e momentos atuando sobre o submarino.

Tais forças e momentos atuantes podem ser de natureza gravitacional, hidrostática, hidrodinâmica, inercial e de contato. As forças, e seus momentos associados, podem ser classificadas como estáticas e dinâmicas, dependendo da ausência/presença de movimento relativo entre o submarino e fluido circundante. Uma discussão mais detalhada sobre o tema é exposta no Apêndice C⁸³.

Considerações relativas à Hidrodinâmica e Hidrostática englobam diferentes tópicos do projeto, em geral analisados sob distintas condições de operação. Um resumo é apresentado na Tabela 2 e alguns detalhes sobre tais considerações são discutidos nos subitens seguintes e nos Apêndices C e D.

⁸¹ Por meio da leitura de tais fatores (batitermografia) o submarino pode identificar a presença de uma zona de sombra e se posicionar convenientemente abaixo dela, de forma a dificultar a detecção sonar pelo inimigo.

⁸² Em rigor, esses efeitos de formação de onda também ocasionam um aumento da resistência ao avanço (devido ao aumento da parcela de resistência de ondas), afetando o desempenho do sistema de propulsão do navio.

⁸³ No Apêndice C também são brevemente discutidos alguns conceitos de interesse como fluotabilidade, estabilidade estática e massas adicionais. A discussão que segue (item 5.2.1) pressupõe familiaridade do leitor com certos conceitos fundamentais de arquitetura naval. Alguns desses conceitos são explicados no referido apêndice.

Tabela 2 – Hidrostática e Hidrodinâmica (Aspectos Técnicos e Condições de Operação)

	Aspectos Técnicos ⁸⁴	Condições de operação
Hidrostática	<ul style="list-style-type: none"> - Equilíbrio Hidrostático - Estabilidade Estática (intacta e em avaria) - Estabilidade Dinâmica - Propriedades hidrostáticas - Sistemas de compensação e trimagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Condição de Superfície - Transição - Condição Submersa
Hidrodinâmica	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência ao Avanço e Propulsão - Projeto e configuração do hélice - Estabilidade direcional e manobrabilidade - Superfícies de controle (lemes e hidroplanos) - Sistemas de controle da plataforma 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa velocidade - Alta velocidade - Movimento vertical/horizontal

5.2.1 Hidrostática

Os principais aspectos técnicos de interesse, no que concerne à Hidrostática, são listados na Tabela 2.

Para uma dada condição de operação, os estudos do Equilíbrio Hidrostático e da Estabilidade Estática (intacta e em avaria) consideram o submarino sob a ação de um sistema de duas forças estáticas; o peso total do submarino e a força de flutuação⁸⁵ (empuxo). Por seu turno, o estudo da Estabilidade Dinâmica amplia esse conjunto ao considerar forças dinâmicas (e.g. ação de vento, ondas, etc.). Por fim, é de interesse a determinação das curvas e características hidrostáticas do submarino; além da forma como as considerações típicas dos estudos anteriores influenciam o dimensionamento de seus sistemas de compensação e trimagem.

⁸⁴ As discussões sobre sistemas de compensação e trimagem constam do item 5.7.4.

Por sua vez, a determinação das propriedades hidrostáticas do submarino é bastante semelhante ao processo de levantamento desses dados para navios de superfície. Essas características e curvas dependem da forma do submarino e compreendem, entre outras:

1. Deslocamento e medidas de estabilidade como KB, LCB, KM_T e KM_L ;
2. Área de plano de linha d'água;
3. Toneladas por unidade de imersão;
4. Momento para trimar 1 cm;
5. Coeficientes hidrostáticos (Coeficiente de Bloco, Prismático, etc.).

Detalhes sobre essas propriedades e curvas não serão explorados neste texto.

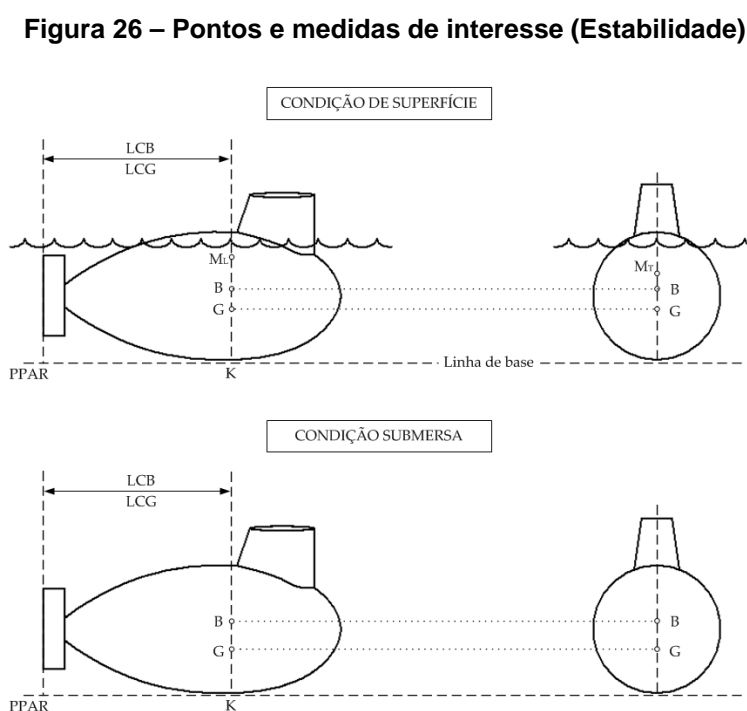
⁸⁵ A denominação "empuxo", embora consagrada, pode no presente contexto gerar certa confusão visto que, em Português, a força dinâmica proveniente da ação do hélice é também denominada "empuxo". Neste texto, será preferencialmente utilizado o termo "Força de Flutuação" para denominar a resultante da pressão hidrostática agindo sobre o submarino.

5.2.1.1 Estabilidade Estática

Os detalhes de estabilidade estática diferem consideravelmente para as diversas condições de operação (superfície, transição e submersa). A estabilidade intacta (no plano transversal e longitudinal) é avaliada em todas as condições. A estabilidade em avaria, em geral, é analisada apenas para a condição de superfície⁸⁶. Os itens seguintes discutem alguns aspectos pertinentes⁸⁷.

Pontos e medidas de interesse

Pontos e medidas de interesse para os cálculos de estabilidade são ilustrados na Figura 26 e definidos no texto seguinte ou na Tabela 3.



Fonte: adaptado [5]

⁸⁶ Diferentemente da análise para navios de superfície, a análise de estabilidade em avaria em submarinos não se foca no alagamento de compartimentos (em geral, assume-se que o CR não perderá sua integridade em caso de colisão). Os cenários de avaria consideram diferentes hipóteses de perda de integridade, e flutuação, de um ou mais tanques de lastro. Considerações de projeto sobre o tema geralmente envolvem a seleção do critério de estabilidade em avaria a ser adotado (braço de endireitamento mínimo e ângulos aceitáveis de banda e trim após a avaria), hipóteses de perda da integridade dos tanques (número e posição dos tanques comprometidos) e estudos de subdivisão adequada dos tanques de lastro. O assunto não será tratado nesta dissertação.

⁸⁷ Para simplificar a análise, efeitos que podem degradar a estabilidade (e.g. superfícies livres, variação e movimentos de peso, etc.) serão desconsiderados nas discussões sobre estabilidade em superfície/transição/avaría e comentados separadamente, em item específico.

Tabela 3 – Definições de interesse (Hidrostática)

Medida	Definição
B	Centro de Carena
G	Centro de Gravidade
M _T e M _L	Metacentros ⁸⁸ (transversal e longitudinal)
K	Intersecção entre a linha de base e o plano transversal que contém B e G
KG e LCG	Posição vertical, a partir da linha de base, e longitudinal, a partir da perpendicular de ré, do centro de gravidade
KB e LCB	Posição vertical, a partir da linha de base, e longitudinal, a partir da perpendicular de ré (PPAR), do centro de carena
BM _T e BM _L	Raio metacêntrico (transversal e longitudinal)
KM _T e KM _L	Posição vertical, a partir da linha de base, dos metacentros (condição de superfície)
GM _T e GM _L	Alturas metacênicas (transversal e longitudinal) em condição de superfície
BG	Altura metacêntrica (transversal e longitudinal) em condição submersa

Com base nas definições acima, a condição de equilíbrio estático a ser observada no projeto de submarinos, definida em termos simplificados no Apêndice C, pode agora ser formulada mais rigorosamente. Considerando a condição submersa, deve-se ter:

1. Flutuabilidade neutra $\rightarrow W = \Delta$;
2. Ausência de trim e banda $\rightarrow LCG = LCB$, com B e G contidos no plano vertical longitudinal;
3. Equilíbrio estável⁸⁹ $\rightarrow KG < KB$.

Estabilidade em superfície

Os conceitos envolvidos na análise de estabilidade em superfície são, em essência, os mesmos para qualquer estrutura flutuante que possua volumes estanques se projetando acima da linha d'água [5]. Há, dessa forma, certa

⁸⁸ Centros instantâneos de rotação da trajetória descrita por B quando o submarino é inclinado em torno dos eixos x e y, em condição de superfície. Na condição submersa, B não sofre alterações com as inclinações de forma que sua posição e as posições dos metacentros são consideradas coincidentes.

⁸⁹ A inequação apresentada refere-se à condição submersa. Para a análise de estabilidade em superfície a condição de equilíbrio estável é atendida desde que o centro de gravidade esteja abaixo do metacentro ($KG < KM$).

semelhança entre as considerações sobre equilíbrio e estabilidade aplicadas ao projeto de submarinos e ao projeto de navios de superfície. Entretanto, há diferenças dignas de nota sobretudo no que concerne à borda livre, à reserva de flutuabilidade⁹⁰ (*Reserve of Buoyancy - ROB*) e à análise de estabilidade em avaria.

Como discutido anteriormente, os submarinos modernos são projetados para operar predominantemente em condição submersa. Entretanto, há ocasiões em que o trânsito em superfície ocorre (e.g. entrada e saída de porto), daí a necessidade de prover o navio com índices de estabilidade e demais características que permitam sua operação segura [4]. Por exemplo:

- O submarino deve possuir borda livre suficiente para proteger escotilhas, eventualmente abertas, da entrada inadvertida de água (e.g. ondas durante o trânsito para atracação);
- O submarino deve possuir calado com dimensões adequadas à operação em águas restritas (regiões de pouca profundidade).

Para a análise de superfície, a estabilidade intacta transversal é de fundamental interesse⁹¹. Assumindo atendidas as condições de equilíbrio estático, essa estabilidade é representada pelo momento de endireitamento que resiste às inclinações do submarino em torno de seu eixo longitudinal (ângulo θ). Analogamente ao discutido no Apêndice C, a estabilidade intacta transversal é definida por⁹²:

$$M(\theta) = \Delta_{\text{sup}} GZ \quad \text{eq. (1)}$$

Acima, Δ_{sup} é a força de flutuação em superfície e GZ representa o braço de endireitamento e é dado por:

$$GZ = GM\text{sen}(\theta) \quad \text{eq. (2)}$$

⁹⁰ Quando comparado a um navio de superfície de mesmo deslocamento, o submarino em regra apresenta borda livre e reserva de flutuabilidade menores. A reserva de flutuabilidade é frequentemente enunciada como um percentual do deslocamento de superfície do navio. Para submarinos convencionais, este valor é de cerca de 10 a 20%.

⁹¹ A estabilidade longitudinal é menos crítica, dada a maior inércia do plano de linha d'água em relação ao eixo transversal do navio (I_y).

⁹² A discussão e o equacionamento apresentado acima se aplicam a pequenos ângulos de inclinação (tipicamente, até 10°). A estabilidade intacta em grandes ângulos geralmente envolve a análise das curvas cruzadas de estabilidade, assunto que foge ao escopo da presente discussão.

Para os presentes propósitos, é conveniente expressar GZ na forma:

$$GZ = (KB + BM_T - KG)\text{sen}(\theta) \quad \text{eq. (3)}$$

Além disso, pode ser demonstrado que a distância entre o centro de carena e o metacentro, para pequenos ângulos de inclinação, é dada pela eq. (4). Nesta equação, I_x é o momento de inércia do plano de linha d'água em relação ao eixo longitudinal do submarino e $\nabla \uparrow$ é o volume deslocado pelos elementos estanques abaixo da linha d'água:

$$BM_T = \frac{I_x}{\nabla \uparrow} \quad \text{eq. (4)}$$

As considerações de projeto associadas à estabilidade intacta em superfície estão em grande parte relacionadas a requisitos que determinam, em última análise, valores mínimos para GZ [eq. (3)]. Dessa forma, é interessante destacar as considerações de projeto relativas a cada um dos termos envolvidos.

A altura vertical de B decorre do conjunto de volumes estanques abaixo da linha d'água ($\nabla \uparrow$). Considerações de projeto determinantes para o estabelecimento desses volumes, em geral, não têm a estabilidade em superfície como foco principal. Entretanto, características como a borda livre e a reserva de flutuabilidade mínimas do submarino afetam implicitamente essa altura. Em tese, um valor alto de KB é desejável.

Da eq. (4), nota-se que o termo BM_T é função de $\nabla \uparrow$ e I_x . Assim, as discussões sobre $\nabla \uparrow$ (parágrafo anterior) são igualmente aplicáveis. Por seu turno, I_x decorre da área do plano de linha d'água. No caso de submarinos modernos, quando comparados com navios de superfície de mesmo deslocamento, essa área é pequena. Tal fato se relaciona às formas do submarino, geralmente projetadas para uma alta performance submersa; o que conduz a contornos mais estreitos para o plano de linha d'água, mesmo quando tomada a boca máxima do submarino. Isso, associado a bordas livres em geral pequenas, faz com que a contribuição da inércia de linha d'água para a estabilidade transversal não seja determinante⁹³.

⁹³ Neste sentido, convém destacar as formas externas dos submersíveis antigos. Conforme tratado no Capítulo 2, tais embarcações eram projetadas para melhor desempenho em superfície. Não raro, iniciativas de projeto no sentido de "alargar" o contorno do plano de linha d'água eram tomadas, com vistas a aumentar sua inércia e, conseqüentemente, a estabilidade intacta. Em alguns projetos, parte dos tanques de lastro era disposta

Por fim, diminuir o valor de KG é desejável. Dessa forma, haverá iniciativas de projeto no sentido de trazer o centro de gravidade do submarino para o mais próximo possível da linha de base (o que reduz o valor de KG). Na prática, de forma a reduzir KG, procura-se arranjar os itens e equipamentos de maior peso em posições mais baixas do CR.

Estabilidade na transição

A transição do submarino para a condição submersa ocorre por meio do alagamento dos tanques de lastro (o que pode ser considerado como um acréscimo de peso ou uma perda de flutuação da embarcação)⁹⁴. Durante a transição, os diversos pontos e distâncias relacionadas à estabilidade (Tabela 3) sofrem variações, de forma que a análise da estabilidade exige cálculo detalhado e específico. Em termos qualitativos, à medida que a transição ocorre, temos:

- a) Variação do volume estanque total abaixo da linha d'água (variação de KB);
- b) Variação da quantidade total de água nos tanques de lastro (variações em KG e/ou KB);
- c) Variação da área de plano de linha d'água (e correspondente variação da parcela BM_T , cujo valor é nulo quando o submarino se encontra totalmente submerso).

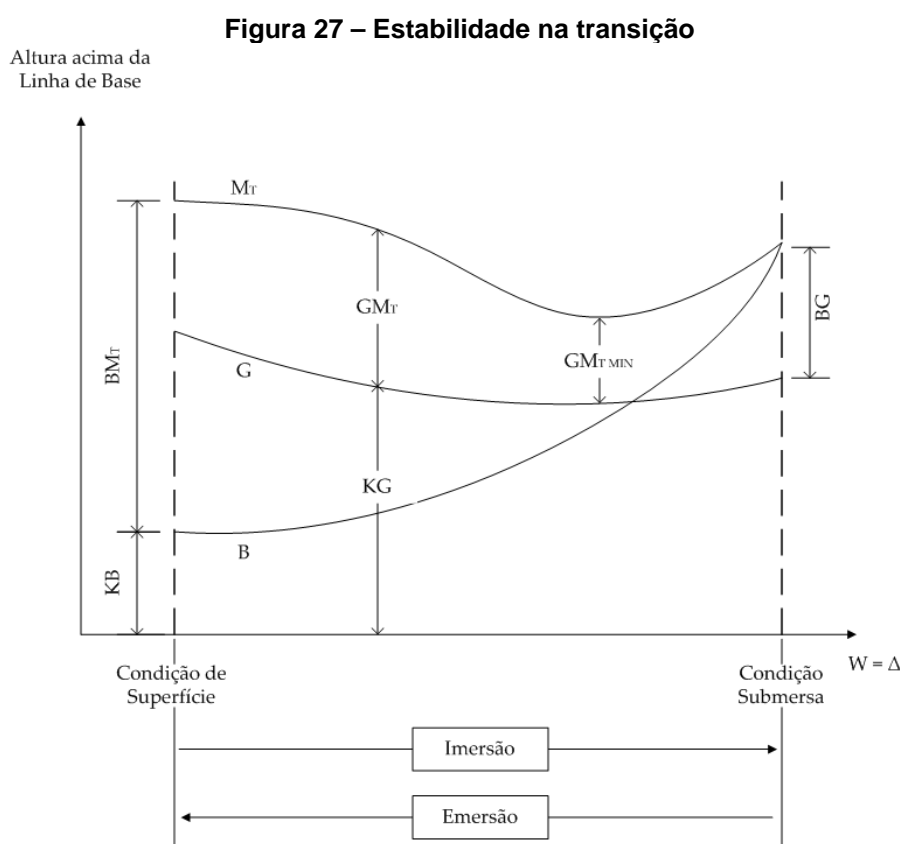
O objetivo dos estudos de estabilidade em transição é verificar a altura metacêntrica mínima adquirida pelo submarino durante as manobras de imersão/emersão. Sob determinadas circunstâncias, a estabilidade do navio pode até mesmo se tornar negativa. Como a transição de emersão em geral leva mais

lateralmente (*saddle tanks*), justamente com esse propósito [4]. De qualquer modo, com as dimensões atuais, as áreas do plano de linha d'água e bocas dos submarinos são em geral suficientes para garantir uma parcela razoável de estabilidade devida a BM_T [5].

⁹⁴ Processo inverso ocorre na emersão, quando a água dos tanques de lastros é expulsa por meio de ar comprimido (o que pode ser considerado como uma diminuição de peso ou um acréscimo de flutuação). Teoricamente, um corpo flutuante pode ser afundado por variação da densidade do fluido no qual está imerso, por variação de seu volume estanque ou por adição de peso. Para submarinos, a primeira opção é impraticável com as tecnologias atualmente disponíveis. Alguns submersíveis civis de menor porte utilizam materiais elásticos de alta resistência para criar apêndices flutuantes que podem ser (des)inflados convenientemente de forma a variar o volume estanque. A admissão/expulsão de peso (água de lastro) é a solução prática mais usual. Neste último caso, considerando os volumes dos tanques de lastro como volumes estanques quando vazios, o processo de admissão/expulsão de água também pode ser encarado como uma variação de volume.

tempo para ocorrer, essa condição é considerada mais crítica. Além disso, geralmente os estudos se detêm sobre a estabilidade transversal.

Para diferentes níveis de alagamento dos tanques de lastro, é possível plotar as diferentes posições dos pontos de interesse e obter uma curva semelhante à da Figura 27. Com isso, a GM_T mínima pode ser determinada. Há que se ressaltar que, nessa figura, por simplificação da discussão, não são considerados os efeitos de degradação da estabilidade (e.g. efeitos de superfície livre). Na prática, tais efeitos são tomados em consideração.



Fonte: adaptado [5]

Estabilidade em condição submersa

Na condição submersa, a posição dos metacentros transversal e longitudinal coincide com a posição do centro de carena. Além disso, a posição do centro de carena permanece fixa. Dessa forma, a estabilidade estática em condição submersa é função de BG . Assim, ao longo de todos os ângulos de inclinação temos:

$$GZ = BG \text{sen}(\beta) \quad \text{eq. (5)}$$

Na eq. (5) o ângulo β é usado genericamente para representar a inclinação transversal (θ) ou longitudinal (α). O resultado prático, é que as curvas de estabilidade transversal e longitudinal são, em tese, curvas senoidais idênticas. Em teoria, há estabilidade positiva para toda a faixa de inclinações de 0 a 180°. Entretanto, muito provavelmente a posição de G se alteraria diante de excursões tão extremas, modificando a forma da curva de estabilidade. Além disso, os ângulos máximos de inclinação devem ser, na prática, limitados por questões de conforto e segurança da tripulação e de operação segura e efetiva dos sistemas de bordo.

Alterações e degradação da estabilidade

Por simplificação, as discussões dos tópicos anteriores desconsideraram a presença de efeitos que podem afetar as condições de estabilidade, tais como: movimentação de pesos a bordo, variações de peso e a existência de superfícies-livres nos tanques do navio. Esses efeitos tendem a alterar a posição de G e, conseqüentemente, influenciar a estabilidade.

Variações e movimentações de peso a bordo são, em geral, contrabalanceadas pela atuação dos sistemas de compensação e trimagem do navio (item 5.7.4). A operação desses sistemas procura restabelecer a posição original de G, restaurando as condições de estabilidade de projeto. Ressalta-se que as operações de compensação e trimagem não são instantâneas; dessa forma pode haver, até seu término, degradação momentânea das condições de estabilidade.

Por outro lado, os efeitos de superfície-livre em tanques inspiram maior atenção. Esses efeitos estão presentes sempre que os líquidos confinados possuem liberdade de se movimentar horizontalmente (e.g. no caso de tanques parcialmente vazios, tanques contendo dois ou mais líquidos de diferentes densidades, escoamento deficiente da água acumulada em áreas de livre alagamento durante a emersão, etc.).

Pode-se demonstrar que esses movimentos geram um efeito equivalente ao deslocamento vertical de G para uma posição virtual situada acima de sua posição original (um aumento virtual de KG); o que implica em uma degradação da estabilidade.

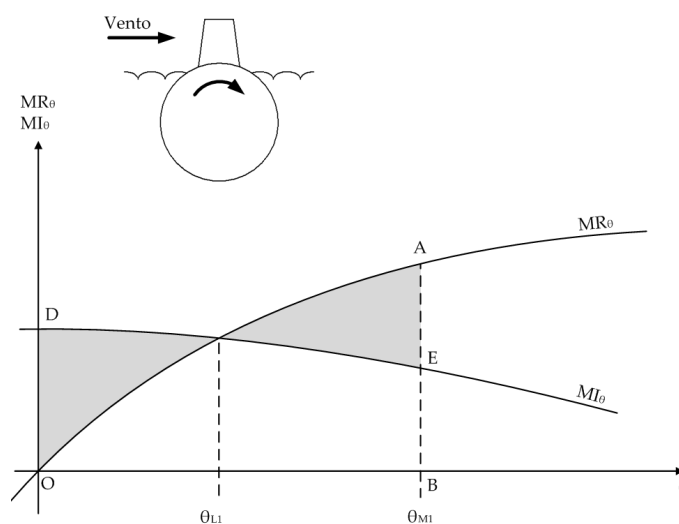
Esses efeitos estão predominantemente presentes durante as manobras de transição, devido à admissão/expulsão de água nos/dos tanques de lastro. Também

se evidenciam nos sistemas de compensação e trimagem (variações no nível e/ou transferência de líquido no interior de seus tanques) e durante o consumo de combustível (quando o sistema admite água salgada nos tanques de combustível à medida que o óleo combustível é consumido). Considerações de projeto no sentido de minimizar esses efeitos envolvem o estudo cuidadoso das geometrias dos tanques e de sua subdivisão interna. Além disso, as áreas externas de livre alagamento, sobretudo nas partes altas do submarino, devem possuir escalopes⁹⁵ adequados para permitir, durante a emersão, o escoamento rápido da água acumulada em seu interior.

5.2.1.2 Estabilidade Dinâmica

Em termos simplificados, a estabilidade dinâmica pode ser definida como a energia de endireitamento do submarino, ou seja, sua capacidade de resistir a momentos de inclinação provenientes de forças de contato/inerciais externas [5].

Figura 28 – Estabilidade Dinâmica

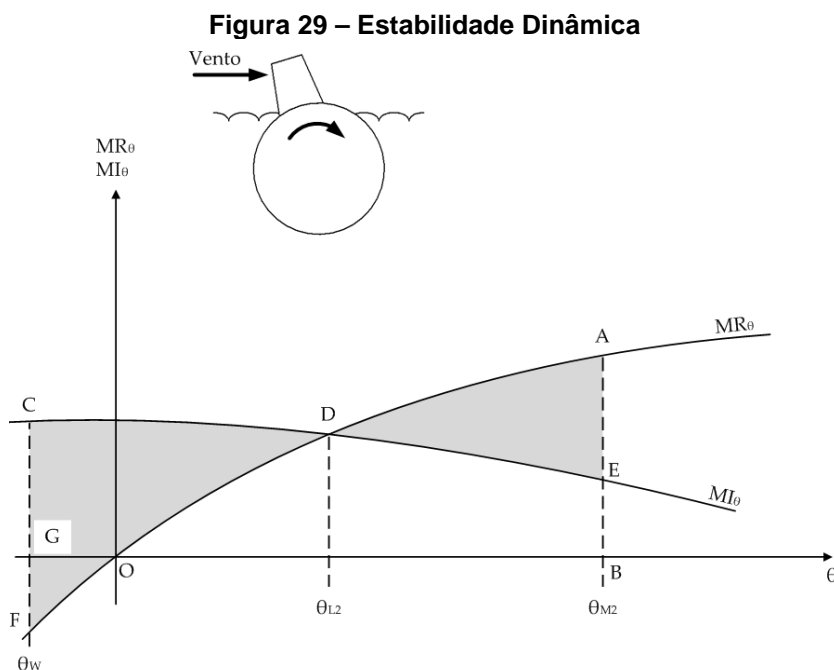


Fonte: adaptado [5]

Por exemplo, o submarino ilustrado na Figura 28 se encontra na superfície, em equilíbrio e sob ação de um vento de través de intensidade constante. Os momentos de endireitamento do navio (MR_{θ}) e de inclinação devida ao vento (MI_{θ}) são também representados.

⁹⁵ Termo de construção naval para denominação das aberturas de escoamento de água.

Inicialmente, o navio se inclinará até o ângulo θ_{M1} e oscilará até se estabilizar em um ângulo de equilíbrio θ_{L1} . Desconsiderada a resistência da água ao balanço do navio, no ponto θ_{M1} as áreas sob as curvas MR_{θ} e MI_{θ} são iguais (ou seja, $OAB = ODEB$).



Fonte: adaptado [5]

Uma situação mais crítica toma lugar se houver prévia inclinação do submarino a barlavento (θ_w). Esse pode ser o caso, por exemplo, se o submarino emergir transversalmente inclinado, conforme ilustrado na Figura 29. Em tal situação, haverá uma energia potencial de endireitamento armazenada no sistema e a tendência inicial de restauração do navio agirá no mesmo sentido do momento de inclinação.

Nesse caso, o navio se inclinará até o ângulo $\theta_{M2} > \theta_{M1}$, e oscilará até se estabilizar em um ângulo de equilíbrio $\theta_{L2} = \theta_{L1}$. Em θ_{M2} teremos $OAB = CDEBG + OFG$. A segunda parcela representa justamente a energia potencial de endireitamento presente logo após a emergência inclinada. Esse segundo caso inspira mais atenção do que o primeiro, na medida em que a inclinação θ_{M2} , em tal situação, pode ser pronunciada. Isso é especialmente preocupante durante a transição de emergência, ocasião em que o braço de endireitamento do navio pode ter valor reduzido.

Durante o projeto, é necessário definir qual o critério de estabilidade dinâmica será adotado. Esses critérios geralmente estabelecem quais momentos de inclinação serão assumidos, suas respectivas formulações e quais propriedades as curvas de estabilidade deverão possuir quando comparadas com as curvas dos momentos de inclinação. Até o momento, não há, em fonte aberta, critérios disponíveis para aplicação específica em submarinos [5]. Dessa forma, a adaptação de algum critério aplicável a navios de superfície pode ser necessária.

Considerações de projeto relativas à área vélica do submarino influenciam a estabilidade dinâmica⁹⁶. Entretanto, a definição das formas externas e da vela é, em geral, estabelecida diante de outras prioridades de projeto (e.g. arranjos e hidrodinâmica). Na prática, a área vélica do submarino acaba sendo considerada como um dado de entrada para os cálculos de estabilidade dinâmica.

5.2.2 Hidrodinâmica

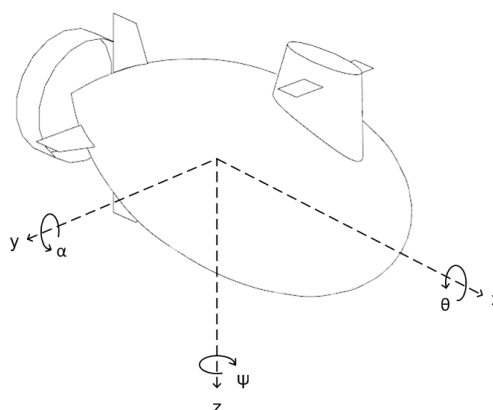
5.2.2.1 Equações dinâmicas do movimento

As forças e momentos hidrodinâmicos atuando no submarino decorrem de seu movimento no meio fluido. Essas forças são função da forma do casco, de seu tamanho e da velocidade relativa entre o submarino e o fluido. As relações entre essas forças/momentos e as velocidades lineares e angulares do submarino são de natureza bastante complexa. As equações dinâmicas do movimento são utilizadas para analisar o movimento do submarino e as forças e momentos que o causam.

O movimento pode ser caracterizado em termos dos seus graus de liberdade. O submarino é livre para transladar em x , y e z e para girar em torno desses eixos (Figura 30). Assim, há seis graus de liberdade no movimento do submarino e efeitos de acoplamento entre eles [5]. A nomenclatura dos movimentos é apresentada na Tabela 4.

⁹⁶ A modelagem de alguns dos esforços de inclinação utiliza a área vélica como parâmetro de entrada.

Figura 30 – Graus de liberdade



Fonte: autor

Tabela 4 – Nomenclatura dos movimentos

Grau de Liberdade	Eixo		
	x	y	z
Movimentos Lineares	Avanço (<i>Surge</i>)	Deriva (<i>Sway</i>)	Afundamento (<i>Heave</i>)
Movimentos Angulares	Jogo/Balanço (<i>Roll</i>)	Arfagem/Caturro (<i>Pitch</i>)	Guinada (<i>Yaw</i>)

Reduzindo os graus de liberdade (i.e. considerando o submarino livre para se movimentar ao longo/ao redor de um dado eixo e supondo restritos os demais movimentos), é possível simplificar as equações do movimento. No limite, a redução a apenas um grau de liberdade permite que as formulações adquiram a forma clássica $\Sigma F = ma$ ou $\Sigma M = I\alpha$. Essas formas simplificadas são bastante úteis (e.g. para análise de velocidade e potência, para análises de estabilidade, etc.). Alternativamente, o movimento pode ser analisado em planos individuais (i.e. três graus de liberdade – rotação em um eixo e translação nos dois eixos restantes).

A solução das equações dinâmicas do movimento permite a previsão dos movimentos do submarino, e de sua trajetória, sob diferentes condições. Entretanto – mesmo com o uso de diversas simplificações (e.g. simetria, linearidade, descarte de termos de ordem superior, etc.), com a aplicação de ferramentas computacionais adequadas e disponibilidade de estimativas sólidas dos coeficientes hidrodinâmicos envolvidos – a resolução dessas equações pode consumir tempo considerável [5].

A definição dessas equações, e das simplificações adotadas para sua resolução, foge ao escopo deste trabalho. O assunto é tratado, com grau crescente de detalhe, em [4], [5] e [30]. Para uma abordagem bastante completa, a referência [31] é recomendada.

5.2.2.2 Resistência ao avanço e propulsão

Um dos aspectos de interesse no projeto de submarinos é a previsão da potência necessária para mover a embarcação a uma dada velocidade; ou sob outro prisma, a previsão da velocidade máxima obtida para uma dada potência instalada [5]. Em geral, de forma a simplificar os cálculos, assume-se regime permanente com o submarino em movimento nivelado e não manobrando.

É comum, em arquitetura naval, expressar a Resistência ao Avanço (R_{av}) em termos de suas parcelas componentes:

$$R_{av} = R_H + R_{APP} \quad \text{eq. (6)}$$

Na qual:

R_{av} = resistência ao avanço;

R_H = parcela de resistência devida ao casco;

R_{APP} = parcela de resistência devida aos apêndices.

A potência efetiva requerida para vencer essa resistência é dada por:

$$EHP = R_{av} v \quad \text{eq. (7)}$$

Na qual:

EHP = potência efetiva;

v = velocidade do submarino.

Resistência devida ao casco

Em termos gerais, a resistência (R_{av}) de um corpo movendo-se em um meio fluido é função da densidade do fluido, no caso a água do mar (ρ_{sw}), da velocidade (v), da superfície molhada total do corpo (WS) e de coeficiente adimensional de resistência (C_t) [eq. (8)].

$$R_{av} = \frac{1}{2} \rho_{sw} v^2 (WS) C_t \quad \text{eq. (8)}$$

O coeficiente de resistência pode ser desdobrado em suas parcelas componentes.

$$C_t = C_f + \delta C_f + C_r + C_w \quad \text{eq. (9)}$$

Na qual:

C_f = coeficiente de resistência 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 de resistência por formação de ondas pode ser ignorado quando o submarino opera em profundidade⁹⁷. A estimativa de C_f é em geral baseada em teste de modelos. Para sua determinação, é comum o uso da formulação da *International Towing Tank Conference - ITTC* [eq. (10)], que é função do número de Reynolds [eq. (11)]. Nesta última equação, L é o comprimento do submarino e ν é a viscosidade cinemática da água.

$$C_f = \frac{0,075}{[\log_{10}(\text{Re}) - 2]^2} \quad \text{eq. (10)}$$

$$\text{Re} = \frac{vL}{\nu} \quad \text{eq. (11)}$$

A formulação da *ITTC* foi baseada em testes envolvendo placas planas de baixíssima rugosidade. De forma a adequar o coeficiente friccional às condições reais encontradas em serviço no mar, a parcela adicional (de correlação) δC_f é utilizada⁹⁸.

O coeficiente de resistência de forma, ou residual, (C_r) representa a parcela de resistência devida ao descolamento do fluido na camada limite. O gradiente de pressão associado a esse fenômeno contribui para a formação da resistência ao avanço. A previsão analítica dessa parcela é bastante difícil, dadas as complexidades de modelagem do fenômeno. Novamente, a maior parte das equações disponíveis baseia-se em testes com modelos.

⁹⁷ Na prática, considera-se que a partir de profundidades cinco vezes maiores que o diâmetro do submarino C_w pode ser negligenciado sem afetar a precisão dos cálculos.

⁹⁸ Valores típicos de δC_f se situam no intervalo de 0.0004 a 0.0009.

Resistência devida aos apêndices

A resistência de apêndices pode representar parcela considerável da resistência total e seu equacionamento é semelhante ao da resistência do casco [eq. (8)]. Nesse caso, entretanto, o coeficiente adimensional de resistência não é desdobrado em seus componentes, sendo em geral representado por seu valor total.

Considerações de projeto envolvidas

Durante o projeto, considera-se de fundamental interesse a minimização de R_{av} , já que seu valor afeta performances chave do submarino como: velocidade máxima, alcance, raio de ação, etc. [4] [5]. As iniciativas de projeto voltadas à minimização de R_{av} podem ser agrupadas a partir da leitura da eq. (8).

Como o desempenho em velocidade (v), em princípio, é um requisito e a densidade do fluido (ρ_{SW}) não pode ser controlada pelo projetista, restam os termos referentes a WS e C_t (lembrando que a parcela C_w , para a performance submersa, pode ser negligenciada).

Assim, supondo fixada a velocidade, permanecem as seguintes alternativas:

- a) Redução da resistência friccional: a resistência friccional é proporcional à área molhada (WS). Dessa forma, para um dado volume do submarino, é desejável reduzir WS tanto quanto possível. Além disso, é desejável reduzir a rugosidade da superfície (redução de δC_f) e evitar discontinuidades geométricas pronunciadas. Busca-se também um carenamento adequado e a redução de aberturas no casco ao mínimo estritamente necessário⁹⁹.
- b) Redução da resistência de forma: devido à viscosidade da água, seu fluxo em torno do submarino cria um gradiente de pressão não nulo. Esse gradiente origina uma componente de resistência que se opõe ao movimento da embarcação. Tal resistência (conhecida como resistência de forma) pode ser minimizada pela adoção de uma geometria longa e de

⁹⁹ Essas aberturas induzem flutuações do fluxo ao longo de sua extensão, o que gera gradientes de pressão que originam arrastos parasitas.

seções transversais que variam suavemente (tendendo à forma de uma agulha) [4]. Na prática, a resistência de forma está relacionada à razão comprimento/diâmetro (L/D) do submarino e sua minimização equivale à minimização da parcela C_r .

Ocorre, entretanto, que as alternativas propostas em "a" e "b" são conflitantes. À medida que a geometria se torna longa e fina (redução da parcela de forma), ocorre um aumento em sua área molhada (aumento da parcela friccional). Uma relação L/D em torno de 6 é considerada a solução ótima [4], mas em geral difícil de ser atendida na prática¹⁰⁰. Assim, soluções de compromisso adequadas deverão ser buscadas.

5.2.2.3 Configuração e projeto do hélice

Hélices são os meios propulsores mais comuns para aplicação em submarinos. A função do hélice é converter a potência entregue pelo motor em empuxo (T), da forma mais eficiente possível [5]. A seleção do hélice e as considerações de projeto pertinentes são parte de contexto mais amplo: o projeto da planta propulsora como um todo. Uma análise mais aprofundada do tema foge ao escopo deste texto. Entretanto, em termos simplificados, busca-se aumentar o coeficiente propulsivo (PC) da planta, de modo a torná-la mais eficiente. O Apêndice D define o conceito de coeficiente propulsivo.

A configuração tradicional em submarinos modernos utiliza um único hélice situado à ré do casco e cujo eixo de rotação é o eixo longitudinal do submarino. Essa configuração permite obter coeficientes propulsivos da ordem de 70% a 80%. Entretanto, embora majoritariamente adotado, o uso de um único hélice em um único eixo tem a desvantagem de que qualquer dano a um deles pode privar o submarino de sua capacidade propulsiva.

Configurações alternativas envolvem:

- a) Uso de dois hélices, contrarrotativos e coaxiais. Essa configuração permite a obtenção de maiores coeficientes propulsivos, além de anular o

¹⁰⁰ Em geral, para um dado volume, buscar tal relação poderia envolver a adoção de um diâmetro maior do que o aproveitável na prática ou um comprimento menor do que o necessário para atender às demandas de espaço linear para os sistemas de bordo.

torque que a rotação dos hélices impõe ao submarino. Entretanto, a configuração tem a desvantagem de ser muito mais complexa mecanicamente;

- b) Uso de hélices em duto. Essa solução, além de proteger o hélice, aumenta o coeficiente propulsivo (de 5 a 10%), permite o uso de hélices de menor diâmetro sem perda de eficiência e tende a reduzir a ocorrência de cavitação. Há diferentes tipos de dutos e as desvantagens de seu uso, em geral, dizem respeito à maior complexidade de construção, maior custo, aumento da resistência ao avanço e eventual degradação da estabilidade direcional do submarino.

No projeto de submarinos, a discricção acústica é de fundamental importância. Dessa forma, requisitos de redução da cavitação do hélice (fonte de ruído) estarão presentes. Além disso, a transmissão de esforços mecânicos do hélice ao submarino (torque, vibrações, etc.) deve ser levada em conta.

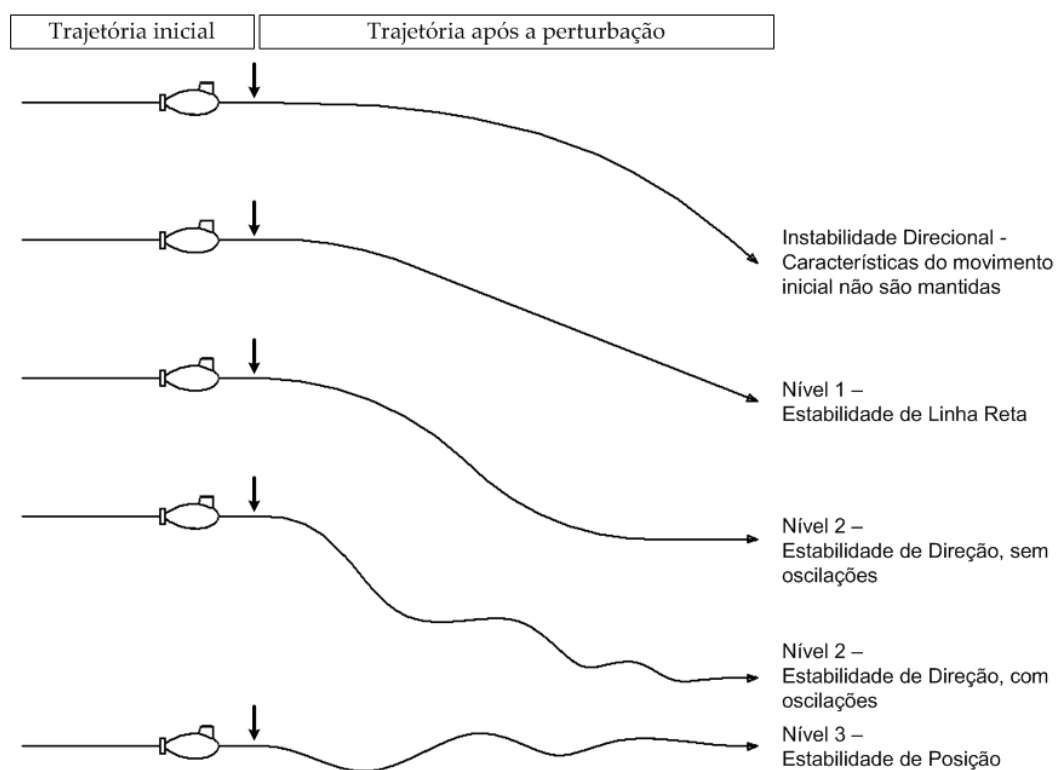
Em geral, a escolha do hélice envolve o uso de séries sistemáticas próprias (e.g. série B de Troost), o uso de softwares de projeto específicos e o teste de modelos em tanques de provas. As considerações sobre o desempenho do hélice se estendem além do escopo das fases preliminares do projeto. Estas fases iniciais comumente se restringem à estimativa, e eventual tentativa de redução, do coeficiente propulsivo.

5.2.2.4 Estabilidade Direcional e Manobrabilidade

A estabilidade direcional pode ser definida como a habilidade do submarino de retornar a seu estado de equilíbrio dinâmico, sem ação corretiva (i.e. assumindo que todas as superfícies de controle são mantidas fixas e em suas posições neutras), após um distúrbio momentâneo [30] [5]. Por sua vez, em termos simplificados, a manobrabilidade pode ser definida como a habilidade do submarino de executar manobras específicas (mudanças de rumo, cota e atitude).

Na Figura 31 o submarino se move no plano vertical, com velocidade constante e em linha reta a uma determinada profundidade. A seta vertical da figura retrata uma força momentânea que atua no submarino por um curto período, perturbando seu movimento inicial.

Figura 31 – Estabilidade Direcional



Fonte: adaptado [5]

Quando a força de perturbação cessa, a estabilidade direcional pode ser classificada em distintos níveis, dependendo de quais características do movimento inicial são preservadas. Dessa forma, é possível estabelecer a seguinte classificação:

- a) Nível 1 - Estabilidade de Linha Reta (Straight-Line Stability): o submarino retém apenas a característica retilínea do movimento;
- b) Nível 2 - Estabilidade de Direção (Directional Stability): o submarino retém as características retilínea e horizontal do movimento;
- c) Nível 3 - Estabilidade de Posição (Positional Stability): o submarino retém as características retilínea e horizontal do movimento, além de permanecer na cota original.

De acordo com as definições, resulta que um submarino com estabilidade de posição possui estabilidade de direção; semelhantemente, um submarino com estabilidade de direção necessariamente terá estabilidade em linha reta.

No plano vertical, o Nível 3 não pode ser atingido sem atuação de forças/momentos de controle. Nesse plano, entretanto, o Nível 2 pode ser atingido sem atuação das superfícies de controle (isso é possível devido ao momento de restauração decorrente da estabilidade estática longitudinal)¹⁰¹. Além disso, no Nível 2 haverá uma transição suave ou oscilatória entre as trajetórias inicial e final (dependendo do nível de amortecimento do sistema)¹⁰². Para o projeto de submarinos, a estabilidade direcional é desejável no plano horizontal e mandatória no plano vertical (devido aos riscos associados à perda do controle de profundidade).

Considerações de projeto referentes à estabilidade direcional dizem respeito a quão estável, nos planos horizontal e vertical, deve ser o submarino. Essa análise deve considerar aspectos ligados à segurança, ao desempenho dos sistemas de controle e à manobrabilidade exigida. Naturalmente, quanto mais estável for o submarino maior deve ser a magnitude dos momentos e forças, resultantes da atuação das superfícies de controle, necessários para manobrá-lo. Isso tem impacto no projeto do sistema de governo do navio (por exemplo, dimensionamento dos hidroplanos/lemes e projeto mecânico e hidráulico dos atuadores). Assim, uma solução de compromisso deve ser alcançada entre os aspectos de estabilidade direcional e manobrabilidade.

5.2.2.5 Superfícies de controle

O controle do movimento do submarino é efetuado por meio de superfícies de controle (lemes e hidroplanos) em formato de fólio. As forças dinâmicas geradas pelo escoamento do fluxo em torno destes elementos são utilizadas para manobrar a

¹⁰¹ Cumpre observar que no plano horizontal, sem a atuação das superfícies de controle, apenas a estabilidade de Nível 1 pode ser atingida; visto que, nesse plano, não há momentos hidrostáticos de restauração.

¹⁰² A estabilidade de linha reta está associada a uma equação diferencial de segunda ordem. Similarmente, a estabilidade direcional e de posição estão associadas, respectivamente, a equações diferenciais de terceira e quarta ordens. Detalhes sobre esse assunto fogem ao escopo da presente dissertação. Um bom resumo está disponível em [30].

embarcação. A magnitude das forças geradas (sustentação e arrasto) é dada pelas seguintes equações:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_{sw} v^2 S C_L \quad \text{eq. (12a)}$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{sw} v^2 S C_D \quad \text{eq. (12b)}$$

Na qual:

F_L = força de sustentação;

F_D = força de arrasto;

S = área projetada da superfície de controle;

C_L = coeficiente de sustentação (função do ângulo de ataque);

C_D = coeficiente de arrasto (função do ângulo de ataque);

v = velocidade do submarino.

Nota-se, a partir das equações, que a força de sustentação gerada nas superfícies depende da velocidade. Isso faz que essas superfícies sejam mais efetivas em altas do que em baixas velocidades. Igualmente, a área das superfícies influencia a magnitude das forças. Entretanto, o arrasto também cresce proporcionalmente a tais variáveis.

No que concerne ao projeto, a determinação do tamanho dessas superfícies está ligada ao desempenho de manobrabilidade desejado e envolve a análise dos esforços necessários para mover o submarino em dada direção. Não obstante, há limites práticos ao tamanho que essas superfícies podem ter; tanto por questões de minimização de resistência ao avanço (para a qual os lemes e hidroplanos também contribuem) quanto por limitações geométricas¹⁰³. Dessa forma, deve ser estabelecido um equilíbrio entre a manobrabilidade desejada e a minimização da resistência ao avanço, diante de eventuais restrições geométricas.

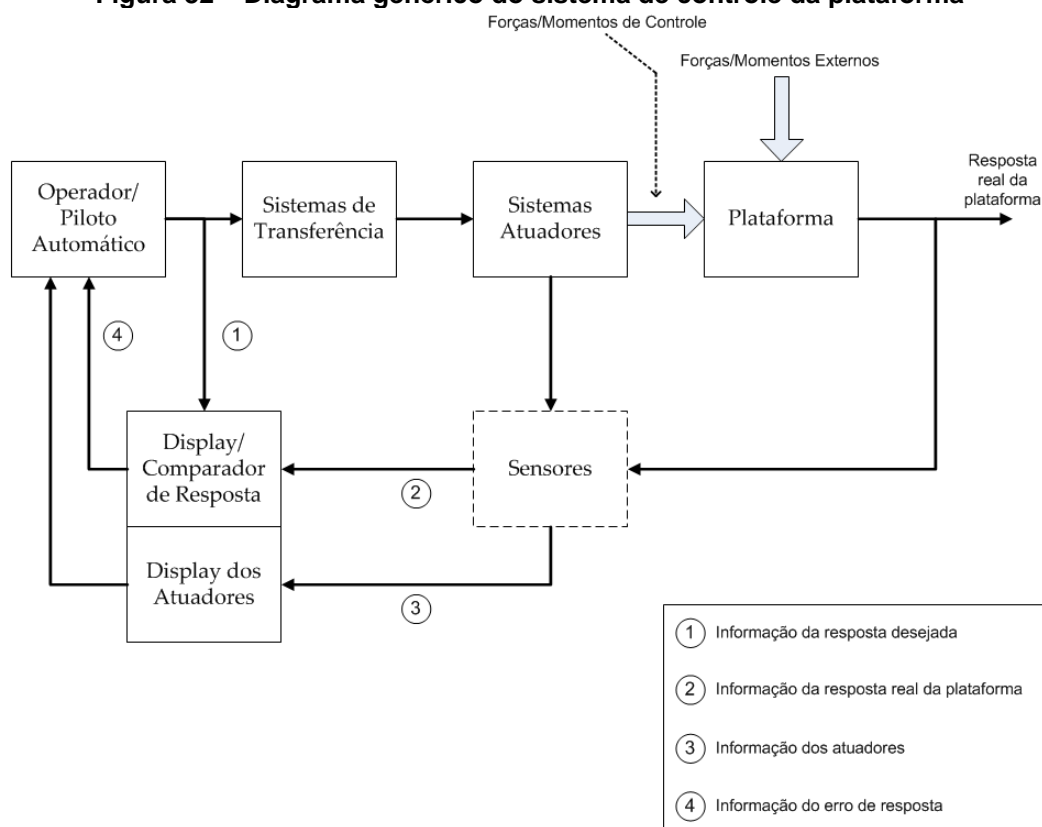
¹⁰³ Por exemplo, possível exigência para que o leme não se projete além da linha de base. Além disso, no caso dos hidroplanos de ré pode haver limitações de tamanho horizontal ligadas a restrições de atracação.

5.2.2.6 Sistemas de controle da plataforma

No presente contexto, sistemas de controle da plataforma são definidos como sistemas destinados ao controle do movimento, atitude e posição do submarino. Esses sistemas são incorporados ao submarino para [5]:

- Permitir a alteração, de forma segura e efetiva, de uma condição operacional para outra ou;
- Garantir a permanência em uma condição operacional desejada na presença de forças/momentos agindo para mudar tal condição operacional.

Figura 32 – Diagrama genérico do sistema de controle da plataforma



Fonte: adaptado [5]

Um diagrama genérico dos sistemas de controle da plataforma presentes no submarino é apresentado na Figura 32.

Nesse diagrama temos:

- Operador ou piloto automático: elemento que fornece os comandos ao sistema de transferência e ao sistema de comparação de resposta;

- Sistemas de Transferência: elementos/sistemas que transferem os comandos de maneira hidráulica, elétrica, mecânica ou pneumática aos sistemas atuadores;
- Sistemas Atuadores: componentes como bombas, hélices, hidroplanos e/ou lemes que colocam os comandos em efetiva execução, gerando forças/momentos de atuação que agirão sobre a plataforma;
- Plataforma: o elemento que se deseja controlar, no caso o submarino;
- Sensores: elementos que permitem a leitura dos parâmetros de controle;
- Display/comparador de resposta: compara/apresenta as informações recebidas dos sensores de resposta;
- Display dos atuadores: fornece/apresenta as informações recebidas dos sensores dos atuadores.

Os sistemas de controle podem ser divididos em estáticos e dinâmicos [5].

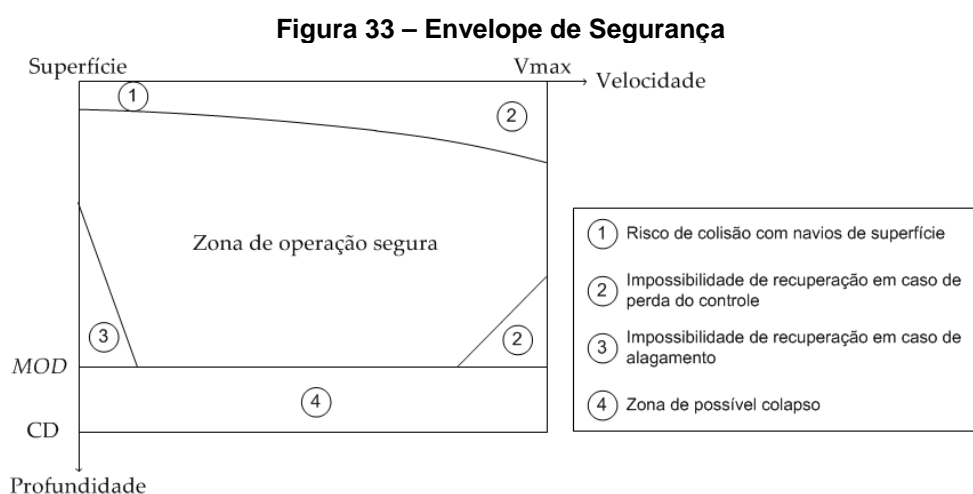
Sistemas de controle estáticos empregam forças/momentos estáticos (como peso/flutuação) para exercer suas funções. De acordo com essa classificação, os sistemas dos tanques de lastro e de compensação e trimagem do navio podem ser considerados como sistemas de controle estáticos. Por seu turno, os sistemas de controle dinâmicos empregam forças/momentos dinâmicos (como empuxo do hélice/sustentação dos hidroplanos) para exercer suas funções. Assim, os sistemas de propulsão e de governo do submarino podem ser considerados exemplos de sistemas de controle dinâmicos.

Com relação aos eixos de referência do submarino (Figura 30) os sistemas estáticos são efetivos em três dos graus de liberdade (rotação em y e x e translação em z) por causar forças/momentos capazes de atuar em tais eixos. Já os sistemas dinâmicos são efetivos em todos os graus de liberdade (i.e. são capazes de originar rotação e/ou translação em todos os eixos). O número de movimentos que se deseja controlar, e de sistemas de controle associados, depende dos requisitos operacionais presentes. Embora diferentes graus de acoplamento entre os planos de movimento possam ser tratados na modelagem, na prática o estudo do movimento é geralmente feito de forma desacoplada.

O controle no plano vertical é talvez o mais importante e também o mais complexo. No plano vertical a profundidade e a arfagem do submarino são os principais parâmetros a ser controlados. Em geral, para a mudança de cota são

estabelecidos ângulos máximos de arfagem que devem ser respeitados durante a manobra.

Outro importante aspecto a ser considerado é que os valores de velocidade e profundidade limitam os ângulos máximos de hidroplanos que podem ser exercidos (ou, em perspectiva alternativa, o par profundidade/velocidade é limitado pelos ângulos máximos utilizados). Isto é traduzido em um conceito operacional chamado “envelope de segurança”, que não será tratado em detalhes nesta dissertação, exemplificado na Figura 33.



Fonte: adaptado [8]

A definição desse envelope considera um acidente de emperramento dos hidroplanos. Dessa forma, é possível traçar em um diagrama (velocidade x profundidade de operação) áreas “proibidas” de operação, que são estabelecidas com base nos ângulos máximos assumidos. No estudo, também é considerado um acidente de alagamento em altas profundidades. A recuperação de um acidente dessa natureza, em geral, é feita pelo uso de um sistema de ar aos lastros em emergência e pelas forças dinâmicas provenientes das superfícies de controle, daí sua relação com o ângulo de hidroplanos¹⁰⁴.

As considerações de projeto relativas aos sistemas de controle envolvem aspectos ligados à manobrabilidade, estabilidade dinâmica, resistência ao avanço, demandas por energia, equilíbrio do navio, arranjos, custos, etc. Uma possível

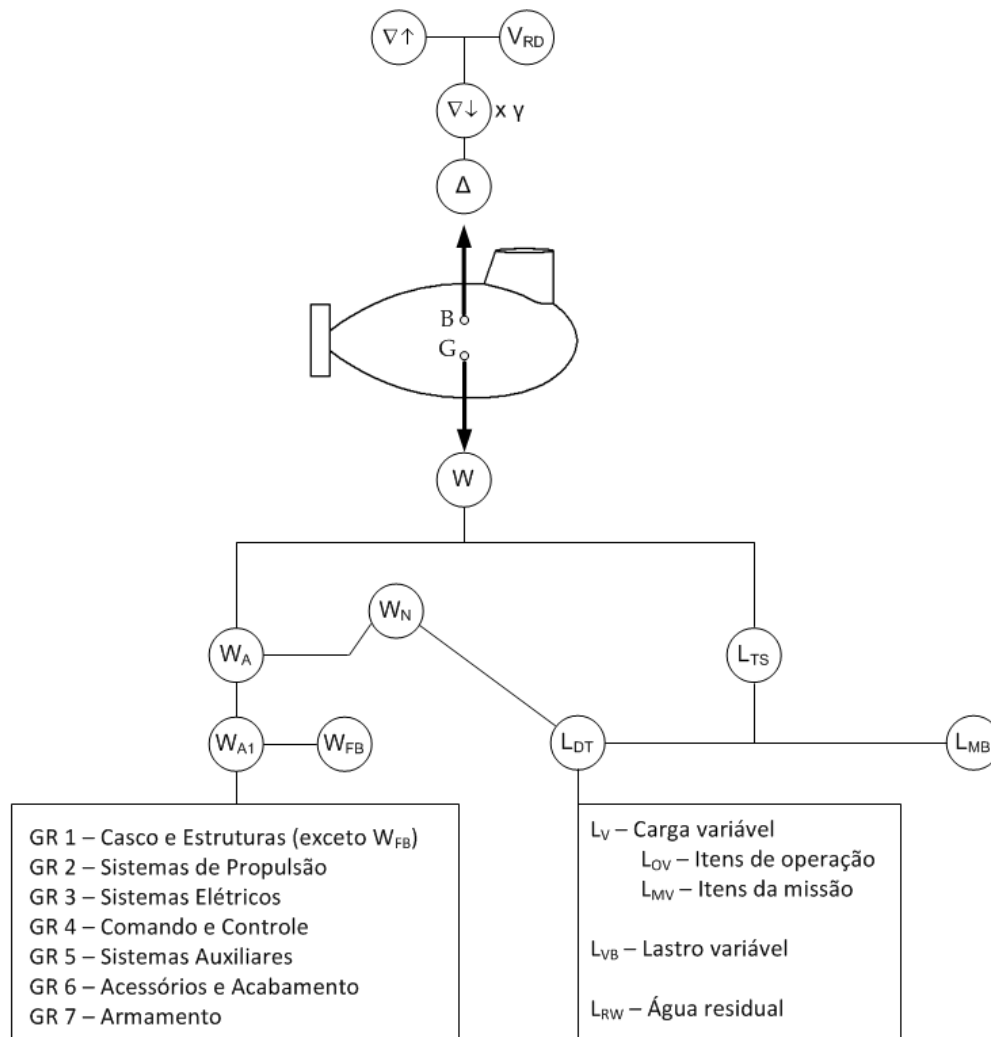
¹⁰⁴ É evidente que o estabelecimento do envelope de segurança exige conhecimento aprofundado das equações de movimento do submarino (i.e derivadas hidrodinâmicas), além de dados detalhados sobre o desempenho do sistema de governo e sistema de ar aos lastros em emergência, que só estarão disponíveis em etapas avançadas do projeto. Dessa forma, esse estudo em geral só ocorre durante as fases de projeto preliminar/de contrato.

abordagem inicial consiste na análise de sistemas de controle usados em projetos anteriores bem sucedidos. As diferenças de desempenho requeridas para o projeto em curso podem então ser analisadas e as adaptações necessárias podem ser estabelecidas.

5.3 Pesos e volumes

Neste ponto, é conveniente analisar com mais profundidade as duas forças estáticas consideradas no item 5.2.1 (peso/flutuação). Suas componentes são ilustradas na Figura 34. A figura e a discussão posterior assumem o submarino com flutuabilidade neutra, em condição submersa.

Figura 34 – Componentes da força peso e da força de flutuação



Fonte: adaptado [5]

5.3.1 Componentes da força peso

As componentes da força peso, na condição submersa, podem ser expressos por qualquer das equações seguintes:

$$W = W_A + L_{TS} \quad \text{eq. (13)}$$

$$W = (W_{A1} + W_{FB}) + (L_{DT} + L_{MB}) \quad \text{eq. (13a)}$$

$$W = W_N + L_{MB} \quad \text{eq. (13b)}$$

As componentes podem ser classificadas como pesos ou cargas. W_{A1} e W_A são os pesos do submarino em condição "não-operacional" (i.e. neles os pesos de itens necessários ao cumprimento da missão não são computados), enquanto W_N é o peso do submarino em condição de superfície, operacional, e pronto para submergir.

O peso W_A é conhecido como condição de "navio-leve" (*lightship*) ou Condição A. Nela, o submarino está, em tese, pronto para operar, mas não possui a bordo nenhum dos seus itens de carga (L_{TS}). Assim, W_A inclui o peso do submarino com todos os itens que não são consumíveis e cujo peso não varia com frequência. É conveniente exprimir W_A em termos de suas duas parcelas componentes: W_{A1} e W_{FB} . Na estrutura *SWBS*, W_{A1} é composto pelo peso de sete grupos principais (cada grupo inclui equipamentos e fluidos operacionais a eles associados). Já W_{FB} é o peso de lastro fixo do submarino¹⁰⁵. Durante a operação, praticamente todos os pesos da parcela W_A se mantêm constantes.

É necessário, então, dotar o navio dos itens de peso variável necessários ao cumprimento da missão (L_{DT}). Os componentes de L_{DT} são listados na Tabela 5.

¹⁰⁵ Pode parecer ilógico projetar uma embarcação para carregar um "peso morto", na forma de lastro fixo. Entretanto, o lastro fixo é necessário sobretudo para:

1. Igualar o peso de projeto da embarcação à força de flutuação. Por mais cuidadoso que seja o controle de pesos, garantir esta igualdade é virtualmente impossível sem a utilização de lastro fixo. Em geral, projeta-se o submarino para que haja um pequeno excesso de flutuação; de forma a compensar aumentos inesperados de peso. A diferença, ao final do projeto, é corrigida pelo lastro fixo;
2. Igualar a posição longitudinal do centro de gravidade com a posição longitudinal do centro de carena;
3. Trazer a posição vertical do centro de gravidade para próximo da linha de base do submarino, o que favorece a estabilidade estática.

Há também o chamado lastro de comissionamento. Este peso é adicionado a bordo como uma reserva para permitir futuros aumentos de peso, associados a modernizações do submarino. Nestes casos, parte do lastro de comissionamento é posteriormente retirada; assim, o aumento de peso devido aos novos equipamentos é compensado e o equilíbrio preservado.

Tabela 5 – Componentes de L_{DT}

Componente	Definição
L_V	Carga variável (<i>Variable Load</i>), dividida em dois grupos L_{OV} e L_{MV} . Consiste de itens necessários para a operação do submarino (L_{OV}) e itens necessários ao cumprimento das missões atribuídas ao submarino (L_{MV}). O primeiro grupo inclui tripulação e pertences, combustível, lubrificantes, aguada, víveres, etc. O segundo grupo inclui torpedos, minas, mísseis, membros do grupo de operações especiais e seu equipamento, etc.
L_{VB}	Lastro variável (<i>Variable Ballast</i>) diz respeito à água associada à operação de compensação do submarino (ver item 5.7.4).
L_{RW}	Água residual nos tanques de lastro (<i>Residual Water Ballast</i>), que não pode ser expelida dos tanques de lastro durante seu esvaziamento. Sua quantidade é constante para qualquer condição de operação.

Destarte, $W_N = W_A + L_{DT}$, é o peso do submarino flutuando, operacional, e pronto pra a submersão. Essa condição é conhecida como "condição normal de superfície" (*Normal Surface Condition - NSC*). Nela, os tanques de lastro estarão vazios¹⁰⁶ (exceto pela presença de uma pequena quantidade de água residual, L_{RW} , em seu interior). Dessa forma, na *NSC*, $L_{MB} = 0$.

Por fim, para assumir condição submersa, é necessária parcela adicional de peso. Esta última parcela, L_{MB} , é o peso da água de lastro principal (*main ballast*) e deve ser adicionada a W_N para que o submarino passe à condição submersa. Sua principal função é variar a reserva de flutuabilidade do submarino. Isto é, *ROB* terá valor nulo quando L_{MB} tiver valor máximo (condição submersa) e terá seu valor máximo quando L_{MB} tiver valor nulo (condição de superfície).

Assim, em rigor, a "carga para submergir" (*load to submerge*)¹⁰⁷ é representada pela soma dessas duas componentes ($L_{TS} = L_{DT} + L_{MB}$). A maioria das cargas de L_{TS} varia durante o mergulho (uma exceção são os pesos da tripulação e pertences).

¹⁰⁶ Há condições intermediárias, nas quais o navio está na superfície, mas há certa quantidade de L_{MB} já presente nos tanques (e.g na transição ou quando se deseja dar trim ao navio na superfície, por questões operacionais). Tais condições não serão tratadas neste texto.

¹⁰⁷ Talvez o termo "carga para submergir" inspire certa confusão, afinal é o peso da água de lastro (L_{MB}) que faz com que o navio efetivamente submerja. Entretanto, é necessário considerar que antes de submergir o navio deve estar operacional (L_{DT}). Porém, não basta estar operacional e permanecer na superfície (W_N), daí a necessidade de L_{MB} . Assim, para efetivamente submergir, o navio deve contar com ambas as cargas (L_{TS}), conforme expresso na eq.(13).

5.3.2 Componentes da força de flutuação

As componentes da força de flutuação, na condição submersa, são expressas nas equações seguintes:

$$\Delta = \gamma \nabla \downarrow \quad \text{eq. (14)}$$

$$\Delta = \gamma (\nabla \uparrow + V_{RD}) \quad \text{eq. (14a)}$$

O total de volumes estanques¹⁰⁸ (i.e. aqueles que efetivamente deslocam a água circundante) em condição submersa é dado por $\nabla \downarrow$. Seu produto pelo peso específico da água ($\gamma = \rho_{SW} g$) resulta na força de flutuação na condição submersa (Δ).

As parcelas de $\nabla \downarrow$ são o total de volumes estanques abaixo e acima da linha d'água quando o submarino se encontra em superfície (respectivamente, $\nabla \uparrow$ e V_{RD}). Cumpre notar que, por definição, V_{RD} é numericamente igual ao volume de água a ser admitida nos tanques de lastros para imersão. Consequentemente, a partir das relações enunciadas ao longo desse capítulo, é possível demonstrar que $V_{RD}/\nabla \uparrow = ROB$. Este volume estanque acima da linha d'água (V_{RD}) é justamente o que provê borda livre e, em rigor, reserva de flutuabilidade ao submarino.

5.3.3 Deslocamento submerso e de superfície

Neste ponto, é necessário enunciar o conceito de deslocamento. Em termos simplificados, o deslocamento de uma embarcação pode ser definido como a massa de água deslocada pela parte imersa da embarcação, em geral expressa em toneladas.

Como o submarino é projetado para operar em duas condições (de superfície e submersa), o navio possuirá dois deslocamentos: o deslocamento de superfície ($\Delta \uparrow$) e o deslocamento submerso ($\Delta \downarrow$). Obviamente, de acordo com o Princípio de Arquimedes, essa massa de água é necessariamente igual à massa do submarino na condição de operação considerada. Assim:

¹⁰⁸ Enquadram-se nesta categoria o volume do casco resistente, volumes das estruturas que envolvem as áreas de livre alagamento e outros apêndices que deslocam água.

$$\Delta \downarrow = \rho \nabla \downarrow = \frac{W}{g} \quad \text{eq. (15a)}$$

$$\Delta \uparrow = \rho \nabla \uparrow = \frac{W_N}{g} \quad \text{eq. (15b)}$$

5.3.4 Percentuais típicos de peso dos sistemas e de volume interno ocupado

A discussão precedente apresentou alguns detalhes sobre as componentes das forças de peso e flutuação e a definição dos deslocamentos do submarino.

Neste momento, é interessante trazer o foco para o percentual de peso relativo aos diversos sistemas de bordo, bem como o percentual de volume interno ocupado por eles.

Os valores de peso e volume interno ocupado [4] pelos sistemas são apresentados na Tabela 6. Esses valores se referem a um submarino convencional moderno, de forma axissimétrica e casco simples. Os percentuais de peso são relativos a W_A e os volumes são percentuais do volume do casco resistente (V_{CR}).

Tabela 6 – Percentuais de peso e volume dos principais grupos funcionais (SSK) [4]

Grupo Funcional	Peso (% W_A)	Volume (% V_{CR})
<i>Payload</i> ¹⁰⁹	9	28
Estruturas	43	--
Sistemas de Propulsão e Sistemas Auxiliares	35	56
Acomodações e acabamento	4	11
Provisões e sobressalentes	1	5
Lastro Fixo ¹¹⁰	8	--

Em termos aproximados, observa-se que quase metade do peso em Condição A diz respeito a estruturas (o peso do CR ocupa boa parte desse percentual). Sistemas de propulsão e auxiliares representam um terço do total (convém lembrar que o peso das baterias é computado nessa parcela, o que aumenta a densidade deste grupo). Os itens de *payload* representam percentual relativamente pequeno do total. Embora pareça contraditório, já que esse peso diz

¹⁰⁹ Para o escopo desta dissertação, o termo *payload* se refere aos equipamentos necessários para que o submarino cumpra sua missão militar (e.g. sistemas sonar, sistemas de armas, sensores, comunicações, comando e controle, etc.).

¹¹⁰ O lastro fixo é geralmente posicionado nos espaços entre cavernas, de forma que não consome volume útil interno do casco resistente.

respeito aos itens que conferem ao submarino sua capacidade de combate, tal fato é explicado por serem mais leves os componentes eletrônicos, sensores e armas.

No que concerne ao volume ocupado, a parcela relativa à propulsão e sistemas auxiliares responde por boa parte do total. Os itens de *payload* ocupam cerca de um terço do CR.

Outra distribuição de pesos e volumes é apresentada por J. K. Stenard em seu trabalho sobre arquitetura naval comparativa de submarinos convencionais [32]. A referência apresenta a distribuição estimada de pesos e volumes, reunidos por funções de plataforma¹¹¹. As faixas de variação de peso e volume de sete¹¹² submarinos convencionais analisados são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Percentuais de peso e volume das principais funções de plataforma (SSK) [32]

Função de Plataforma	Peso (%W _A)	Volume (%V _{CR})
Mobilidade	37 - 56	44 - 71
Armamento	2 - 8	8 - 19
C3I	2 - 5	7 - 16
Suporte	4 - 5	14 - 36
Estruturas	31 - 43	--
Lastro Fixo	5 - 7	--

Aqui, nota-se a predominância dos pesos ligados à propulsão do navio (mobilidade) e às estruturas. Os itens ligados à missão (armamento e C3I) respondem por pequena parcela do peso.

Em se tratando dos volumes, a propulsão ocupa parcela predominante, seguida pelos itens de *payload* (armamento + C3I) e suporte.

¹¹¹ Conforme [32] as definições das funções de plataforma (*Submarine Functions*) são:

SF1 – Mobilidade (*Mobility*): Inclui os espaços das instalações de propulsão, equipamentos elétricos não-distribuídos, atuadores do sistema de governo, baterias, tanques de combustível internos e tanques de compensação e trim;

SF2 – Armamento (*Weapons*): Inclui o volume dos tubos de torpedos, sistema de manejo de armas, sistemas de ejeção e lançamento internos ao CR e o volume do compartimento de torpedos;

SF3 – Comando, Controle, Comunicações e Informações (C3I) (*Command, Control, Communication and Information*): Inclui o compartimento do comando, a estação rádio e o centro de controle da máquina (controle da propulsão);

SF4 – Suporte (*Ship Support*): Este grupo agrupa as áreas habitáveis como alojamentos, cobertas e refeitórios da guarnição, cozinha, sanitários, espaços destinados a corredores. Também inclui espaços de máquinas auxiliares não agrupadas em C3I.

¹¹² Um dos SSK analisados, o *Barbel*, apresentou variações percentuais divergentes dos demais navios. Stenard aponta, em seu estudo, possíveis razões para essa divergência (detalhes que não serão tratados aqui). Por simplicidade, optou-se por não incluir o *Barbel* entre as faixas apresentadas na Tabela 7.

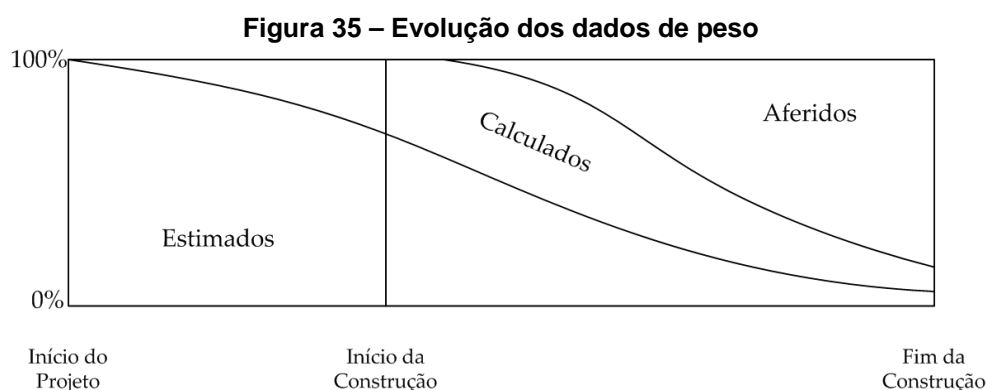
Os valores típicos apresentados são importantes nas etapas iniciais de projeto, tanto como guia para a alocação de pesos e volumes internos do CR, quanto para a verificação de estimativas preliminares de peso e demandas por volume.

5.3.5 Controle de pesos

O controle de pesos é aspecto importantíssimo do projeto de submarinos.

Enquanto a determinação da força de flutuação é tarefa relativamente simples¹¹³, a determinação dos pesos dos diversos equipamentos e estruturas de bordo é mais complexa. Embora o peso dos componentes e estruturas principais possa ser obtido com um razoável grau de precisão, já nas etapas iniciais de projeto, uma infinidade de sistemas, equipamentos e itens menores também precisa ter seu peso computado. A determinação do peso desses elementos é mais difícil e geralmente só será realizada em estágio avançado do projeto.

Assim, durante o projeto, as informações de peso passam por diferentes estágios de maturidade. No início, elas são quase que totalmente estimadas. À medida que o projeto avança, uma parcela maior dos dados é de pesos calculados ou efetivamente aferidos. Ao final da construção, há uma maior precisão dos dados e sua grande maioria será de pesos aferidos (sempre restando, em tese, um pequeno percentual de pesos estimados e calculados, para os quais a aferição não foi possível). A Figura 35 ilustra qualitativamente esse processo.



¹¹³ A determinação dos volumes estanques, e seus respectivos empuxos, é relativamente facilitada pelo atual uso de maquetes eletrônicas (ferramentas de CAD).

Ao longo do projeto, o controle de pesos é feito de forma semelhante àquela adotada no projeto de navios de superfície. A diferença reside nas consequências associadas a uma eventual falha em sua execução.

Inconsistências nas estimativas de peso podem resultar, ao final da construção, em um peso total maior do que o previsto em projeto. No caso de navios de superfície e de submarinos em condição de superfície, isso implicaria em um aumento de calado (com efeitos sobre a estabilidade e provavelmente velocidade).

Entretanto, nessa eventualidade, um submarino na condição submersa passaria a ter flutuabilidade negativa ($W > \Delta$). Naturalmente, realizar a manobra de imersão com a embarcação em tais condições seria bastante imprudente.

Se presente, a correção de tal situação pode exigir:

- a) a redução de lastro fixo a bordo (com conseqüente impacto na estabilidade) e/ou;
- b) a reavaliação e redefinição das arquiteturas dos sistemas de bordo, com vistas à redução de pesos (o que pode ter impactos sobre o desempenho operativo do submarino) e/ou;
- c) Em casos extremos, a necessidade de aumentar as dimensões do navio (de forma a aumentar a força de flutuação). Obviamente, um aumento de dimensões pode afetar inúmeros aspectos do projeto (e.g. custo, velocidade, estabilidade, manobrabilidade, etc.).

Outro problema diz respeito ao equilíbrio longitudinal do navio. Como anteriormente exposto, é necessário ter $LCB = LCG$ ¹¹⁴. Naturalmente, o arranjo dos itens a bordo deve observar a necessidade de assegurar tal condição. Entretanto, essa equação é geralmente atendida pelo posicionamento conveniente do lastro fixo a bordo. Sem o exercício do devido cuidado, podem ocorrer situações extremas nas quais grande quantidade de lastro tenha que ser posicionado à vante¹¹⁵: o que pode se revelar problemático em termos de arranjo (dada a complexidade do arranjo das áreas de vante).

¹¹⁴ Analogamente, o equilíbrio transversal deve ser obtido (B e G contidos no mesmo plano longitudinal vertical). Essa condição costuma ser mais fácil de atender, já que o arranjo transversal dos elementos de lastro é, em geral, menos crítico.

¹¹⁵ Ou, em tese, muito à ré. Esse caso, entretanto, dificilmente se verificaria na prática, pois em geral os itens mais pesados de bordo tendem a estar posicionados à ré. Isso faz com que o centro de gravidade longitudinal de W_{AI} esteja mais a ré do navio; sendo a correção realizada pelo posicionamento conveniente de W_{FB} à vante.

Além disso, quanto mais tarde no projeto o erro de avaliação de pesos se evidenciar, mais difícil, demorada e cara (custos/prazos) será sua correção.

Dessa forma, um controle adequado deve ser mantido para acompanhar, de maneira sistemática e rigorosa, a evolução das informações de peso ao longo do projeto. Nesse sentido, a distribuição dos itens por grupos SWBS, desenvolvida pela Marinha Americana, tem sido frequentemente adotada [4].

A manutenção de bancos de dados de peso de equipamentos, reunindo informações de outros projetos, também é prática consagrada na indústria naval de defesa. Quanto mais semelhante aos projetos anteriores for o projeto em curso, mais valiosas serão essas informações.

Exigir dos fornecedores de equipamentos dados precisos sobre o peso de seus produtos é também essencial. As estimativas apresentadas pelos fabricantes no início do projeto devem ser próximas do peso final dos equipamentos fornecidos. Procura-se, com isso, assegurar que os valores de peso adotados nas fases iniciais do projeto sejam consistentes com seus valores definitivos (o contrário levaria aos já discutidos problemas de inconsistência de estimativas).

Por fim, as equipes de engenharia envolvidas devem estar cientes de quão crítico o controle de pesos é para o projeto. Uma política estrita de alocações e administração de margens é necessária. Não é incomum observar a tendência, por partes dessas equipes, de tentar projetar sistemas com altíssima performance, mas que excedem consideravelmente os limites máximos alocados (peso, volume, custo etc.). Durante a integração dos sistemas, essas distorções podem tornar-se apreciáveis e a viabilidade global do projeto, nesse caso, pode ser comprometida.

5.4 Estruturas

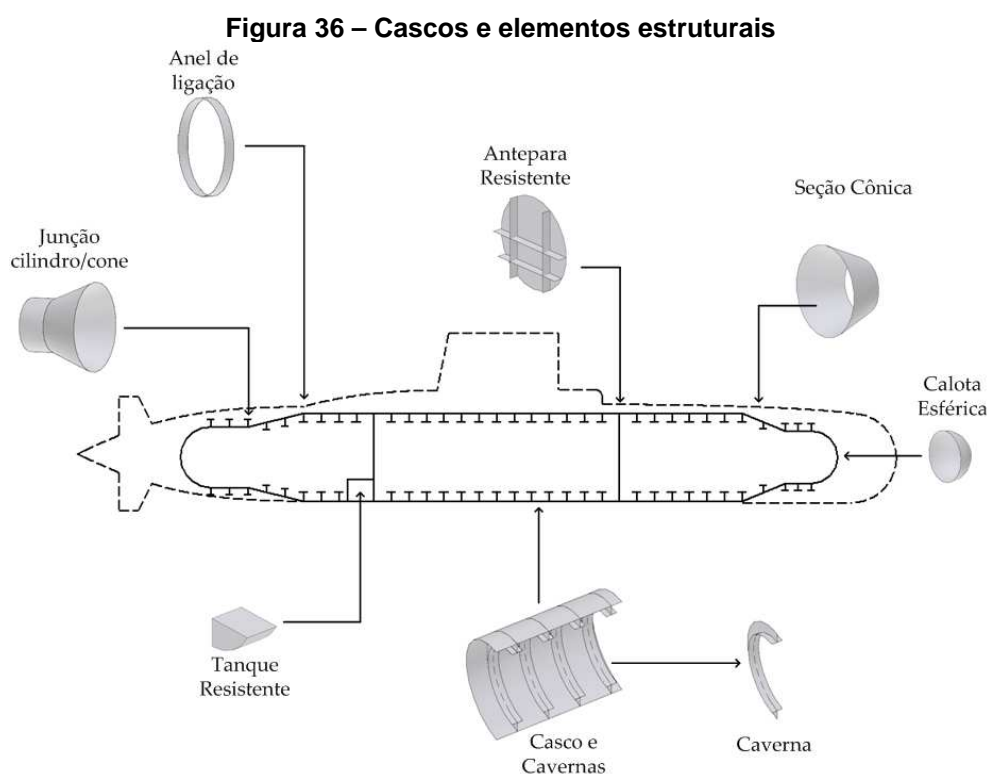
5.4.1 Cascos resistente e não resistente

Em geral, os submarinos possuem um casco resistente (interno) e um casco não resistente (externo). O casco resistente (CR) deve suportar a pressão hidrostática e prover volume interno suficiente para abrigar os diversos sistemas de bordo. O casco não resistente (externo) abriga as áreas de livre alagamento e costuma ser projetado para prover o melhor desempenho hidrodinâmico possível. Considerações sobre volume, peso estrutural, estabilidade, construtibilidade etc.

permeiam todo o projeto dos cascos e, não raro, soluções de compromisso devem ser estabelecidas.

Convém notar que as considerações de projeto estrutural para cada um dos cascos são, embora interligadas, distintas. Isso porque os cascos cumprem funções diferentes e são submetidos a diferentes cargas de projeto, sendo o CR tratado com prioridade. De qualquer modo, aspectos ligados a critérios de falha, estabilidade estrutural, concentrações de tensões, escoamento, flambagem, fadiga, corrosão, etc. afetam o projeto estrutural [5]. A discussão seguinte tem foco no CR.

A forma clássica do casco resistente é a de um cilindro reforçado por cavernas circulares (externas ou internas), fechado nas extremidades por calotas hemisféricas, elípticas ou torisféricas. Dependendo do projeto, seções de transição cônicas podem existir. Nessas seções de transição, anéis de ligação externos costumam estar presentes. Além disso, pode haver anteparas estanques e tanques internos resistentes (Figura 36).



Fonte: adaptado [15]

5.4.2 Profundidade de operação

Os submarinos são projetados para operar a profundidades relativamente grandes. Naturalmente, a pressão atmosférica deve ser mantida no interior do casco resistente (para suporte à vida humana e operação dos equipamentos internos).

Em geral, o valor da máxima profundidade de operação (*Maximum Operating Depth – MOD*) desejada é definido previamente pelo cliente. Nesse caso, observa-se uma tendência do Setor Operativo de definir a maior profundidade de operação possível. Há razões práticas para tal predileção, que não serão discutidas aqui (considerações detalhadas são apresentadas em [4]). Entretanto, um requisito de alta profundidade de operação não estará dissociado de certas penalidades (e.g. aumento de peso estrutural, custo, etc.)¹¹⁶ e o projetista tem a responsabilidade de alertar o cliente acerca dos impactos globais desse tipo de requisito.

Embora os valores de *MOD* de alguns submarinos, disponíveis em literatura aberta, não possam ser categoricamente confirmados, valores típicos para submarinos convencionais tendem a situar-se na faixa de 200 a 400 metros [4].

5.4.3 Modos de falha

Para efeitos de projeto, a pressão hidrostática atuando sobre a embarcação é considerada uniforme e de valor igual à pressão na profundidade da linha de base do submarino. Como anteriormente discutido, o peso das estruturas corresponde a parcela considerável do peso total do submarino. É necessário, então, que o casco seja estruturalmente eficiente (i.e. deve prover o volume e a resistência necessários com o menor peso possível).

Uma discussão detalhada da distribuição/natureza dos esforços agindo sobre o casco, devidos à pressão hidrostática, foge ao escopo deste trabalho e está disponível em [4]. Não obstante, no que concerne às falhas estruturais que podem

¹¹⁶ Em geral, o projeto de submarinos é “volume limitado” (o submarino é projetado para prover volume interno suficiente para abrigar os sistemas necessários às missões atribuídas ao navio). Como já discutido, um maior volume se traduz em maior força de flutuação, sendo a diferença ajustada por meio de lastro fixo. Um requisito de operação a grandes profundidades pode acarretar um peso estrutural muito alto (aumento de W_{AI} , diminuição de W_{FB} e possível degradação de estabilidade). Para equilibrar tal peso, um aumento no deslocamento do submarino pode ser necessário – com aumentos proporcionais em custo, diminuição da velocidade (se mantida a mesma potência das instalações propulsoras) e outras consequências. Nesse caso, o projeto passaria a ser “peso limitado” (as dimensões do submarino são estabelecidas de forma a prover flutuação suficiente para equilibrar a embarcação) e é bem provável que o volume interno adicional acabasse sendo subaproveitado.

ocorrer no CR, a literatura especializada costuma listar três modos de falha principais¹¹⁷ (Figura 37):

- a) Escoamento entre cavernas (*Interframe shell yielding*);
- b) Flambagem entre cavernas (*Interframe shell buckling*);
- c) Colapso global¹¹⁸ (*Overall collapse*).



Fonte: adaptado [4]

O primeiro modo de falha tende a ocorrer quando o casco é relativamente espesso e com pequeno espaçamento entre cavernas. O segundo modo geralmente ocorre quando o casco é relativamente fino, com cavernas de grandes dimensões e amplamente espaçadas. Por fim, a instabilidade geral pode ocorrer quando o cilindro é longo, com casco fino e cavernas de pequenas dimensões [33].

No projeto deve ser estabelecida uma hierarquia de falhas e respectivos fatores de segurança associados a cada modo (ver Apêndice E). Em geral, com base no fator de segurança, determina-se uma profundidade de falha (CD) a partir da *MOD*. Associada à CD, haverá uma pressão de colapso (p_{col}). O casco é projetado para que a falha só aconteça para valores maiores que p_{col} .

¹¹⁷ Em realidade, a inserção de reforços (cavernas) no casco para aumentar sua resistência à falha tem o efeito subsidiário de complicar o perfil de distribuição de tensões ao longo da estrutura. Há, assim, outros modos de falha menos comuns que podem afetar as próprias cavernas; como a flambagem das cavernas (*frame buckling*) e a deformação rotacional das cavernas para fora de seu plano longitudinal (*tripping*). Este último modo costuma ser um precursor para a instabilidade generalizada, de modo que alguns autores não o tratam como um modo de falha independente [33].

¹¹⁸ Alguns autores pátrios traduzem este último modo de falha como “flambagem global” ou “flambagem generalizada”.

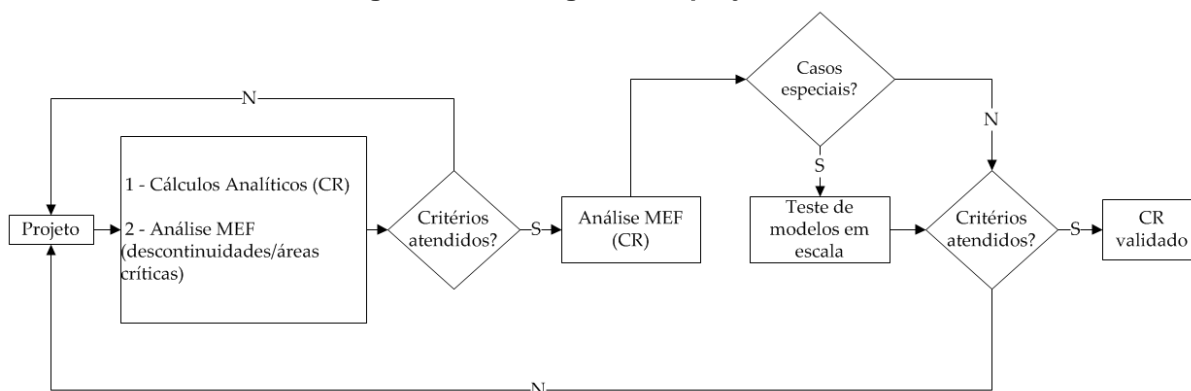
5.4.4 Fluxograma de projeto do CR

O projeto do CR envolve um dimensionamento inicial e um dimensionamento posterior, mais detalhado.

Inicialmente, é definido o escantilhamento do CR com base em modelos analíticos. Eventualmente, a análise por elementos finitos (MEF) de algumas áreas críticas pode ser empreendida. Esse escantilhamento inicial é testado em termos do atendimento da hierarquia de falhas e níveis de tensão estabelecidos. Caso os critérios sejam atendidos, segue-se análise mais abrangente do CR por elementos finitos. Em regra, essa análise mais abrangente por MEF é suficiente para validar o escantilhamento.

Entretanto, diante de certos casos especiais como: geometrias complexas do CR (i.e. seções de transição com ângulos muito agudos, formas assimétricas, estrições, etc.); projeto estrutural inovador; ausência de um projeto estrutural de referência (submarino já construído e operando), pode haver necessidade de confirmar os níveis de tensões de falha previstos por meio de testes com modelos.

Figura 38 – Fluxograma de projeto do CR



Fonte: autor

5.4.5 Outras considerações¹¹⁹

Há considerações adicionais relacionadas ao projeto estrutural do casco [4]. São elas:

- a) Elementos estruturais internos: para o projeto do casco, é comum desconsiderar os elementos estruturais internos (conveses, tanques

¹¹⁹ Essas especificidades do projeto estrutural do casco, em geral, não são tratadas durante o Projeto de Concepção. Neste trabalho, os cálculos estruturais apresentados não levam em conta tais efeitos.

resistentes, etc.)¹²⁰. Essa é uma abordagem conservadora, do ponto de vista do dimensionamento do escantilhamento, pois considera-se que tais elementos não contribuirão para a resistência estrutural do casco. Entretanto, a presença dessas estruturas pode levar a concentrações pontuais de tensão, sobretudo na junção com o casco, e isso pode induzir falhas localizadas;

- b) Penetrações no CR: há no CR escotilhas de acesso de pessoal/material além de penetrações para tubulações e cabeamento. Tais penetrações induzem concentrações de tensões e podem ser pontos de início de propagação de falhas estruturais;
- c) Cargas de choque: dada sua aplicação militar, o submarino pode ser submetido a cargas de choque (explosões). O CR apresenta flexibilidade para tais cargas, de modo que explosões não devem, em tese, induzir falhas estruturais do casco [4]. Entretanto, sob choque, as penetrações do casco podem perder integridade e permitir o embarque de água. Além disso, os itens internos sofrem oscilações consideráveis diante de ondas de choque. É necessário que o arranjo interno preveja, na medida do possível, espaços destinados a evitar "colisões" entre os itens movimentados pelas cargas de choque;
- d) Fadiga: durante sua operação, o submarino excursiona entre a superfície e profundidades próximas à MOD. Dessa forma, o casco está sujeito a uma carga cíclica irregular. Em tese, a natureza compressiva da carga faria com que problemas de fadiga não fossem esperados. Entretanto, há partes do CR que estão sujeitas a esforços de flexão; o que ocasionará cargas de tração que podem motivar falhas por fadiga.

¹²⁰ Exceção é o caso de anteparas estanques que ocupem todo o diâmetro do submarino. Dependendo do critério de projeto utilizado, elas podem ser consideradas suportes e afetar o dimensionamento das cavernas e espessura do casco (pois afetam a distância entre suportes).

5.5 Arranjo

A atividade de arranjo tem o objetivo de assegurar a viabilidade do projeto em termos da disposição espacial dos equipamentos e sistemas de bordo. Permeiam tal atividade considerações sobre a operação dos equipamentos e aspectos relativos à manutenção, fabricação, segurança, etc.

Os requisitos e restrições presentes no projeto de submarinos acabam por impor limites severos às soluções que podem ser adotadas em termos de aproveitamento do espaço interno. Elaborar um arranjo que respeite os requisitos e restrições de projeto e ainda viabilize um aproveitamento intensivo dos espaços a bordo, constitui-se em tarefa complexa.

Logo no início do projeto, é necessário conceber um leiaute do submarino. Essa atividade é, em essência, uma atividade de Arquitetura Naval e deve considerar múltiplos aspectos do projeto. Em linhas gerais, será necessário estabelecer:

- a) As formas do casco (casco resistente e casco externo);
- b) A disposição dos principais compartimentos e anteparas do navio (conveses, anteparas estanques, tanques, etc.);
- c) Os volumes alocados para cada função de plataforma.

Durante o transcorrer do projeto, o foco gradativamente se volta ao arranjo dos diversos compartimentos do submarino e o grau de detalhe do arranjo refletirá, em tese, a maior maturidade das arquiteturas dos sistemas.

Os principais produtos dos estudos de arranjo são:

1. Um modelo virtual 3D do submarino, com nível de detalhamento variável (maior nível de detalhe será implementado à medida que o projeto avança e maior conhecimento sobre os diversos sistemas de bordo está disponível);
2. Desenhos bidimensionais obtidos a partir de tal modelo (para usos específicos pela equipe de projeto e pelos estaleiros de construção).

Naturalmente, as soluções de arranjo adotadas não podem se dissociar de outras considerações de projeto (i.e. o estabelecimento de soluções de compromisso é inevitável). Os itens seguintes tratam resumidamente este tema.

5.5.1 Estabelecimento das formas do submarino

O estabelecimento das formas externas do submarino busca conciliação entre aspectos como performance propulsiva, manobrabilidade, fabricação, etc. Já o projeto do CR obedece a requisitos de desempenho estrutural (governados em grande parte pela profundidade de operação requerida) e a demandas por volume interno para a disposição dos diversos equipamentos e sistemas de bordo.

Existe, obviamente, a necessidade de integrar o CR com o casco externo (não resistente). Nesse sentido, a opção pelo uso de seções cônicas nas extremidades do CR, presente em alguns projetos, tem por um dos objetivos facilitar a obtenção de uma forma externa hidrodinâmica favorável. Entretanto, essas variações de diâmetro (nas seções cônicas) dificultam o aproveitamento dos espaços internos e são indesejáveis do ponto de vista do arranjo.

5.5.2 Alinhamento e adjacência

Alguns exemplos de requisitos de alinhamento e adjacência são:

- a) Alinhamento entre o Motor Elétrico Principal (MEP) e a linha de eixo;
- b) Alinhamento das escotilhas de embarque/desembarque de material com os compartimentos atendidos;
- c) Desejável alinhamento vertical dos tanques de águas servidas e águas cinzentas com a área que abriga a cozinha e os banheiros a bordo;
- d) Desejável alinhamento vertical do centro de gravidade dos tanques de compensação com o centro de carena do submarino;
- e) Adjacência longitudinal entre o compartimento de armazenamento dos torpedos e os tubos de lançamento de armas;
- f) Adjacência vertical do compartimento do comando com a vela, no caso da existência de mastro penetrante;
- g) Adjacência desejável dos paióis de armazenamento de gêneros e câmaras frigoríficas com a cozinha (se possível, é preferível que tais compartimentos se situem no mesmo convés);
- h) Adjacência desejável da estação rádio com o compartimento do comando;
- i) Adjacência desejável da câmara (aposentos do comandante) com as áreas operacionais do submarino (compartimento do comando).

Os poucos exemplos anteriores (há outros) evidenciam o fato de que não há plena liberdade no arranjo de um compartimento/equipamento. No caso dos requisitos de alinhamento e adjacência, o arranjo nas vizinhanças sempre exercerá, em maior ou menor grau, alguma influência sobre o arranjo do compartimento/equipamento considerado. O compartimento do comando é um caso clássico. Caso haja o requisito de que o submarino seja dotado de um mastro penetrante (geralmente o periscópio de ataque)¹²¹, o comando deverá necessariamente se situar em posição vertical abaixo da vela (requisito de alinhamento).

5.5.3 Equilíbrio e estabilidade

Considerações sobre equilíbrio e estabilidade do submarino também influenciam o arranjo. Por questões de estabilidade estática, é desejável que os itens de maior peso se situem o mais próximo possível da linha de base do navio. Logo, compartimentos de alta densidade (como as praças de baterias) devem ser, preferencialmente, localizados nas regiões mais baixas do submarino. O mesmo se aplica a equipamentos de grande peso; sempre que possível é desejável posicioná-los mais próximos à linha de base.

O posicionamento do lastro fixo a bordo é outra problemática de arranjo ligada ao equilíbrio do navio. Para assegurar ausência de trim em condição submersa ($LCB = LCG$) a disposição do lastro fixo deve ser feita apropriadamente. A quantidade de lastro fixo é estabelecida de acordo com alguns critérios de projeto. Geralmente, uma reserva de volume para seu posicionamento a bordo deve ser prevista já nas fases iniciais do projeto. Essa demanda representa uma alocação considerável de espaço, maior que o volume nominal calculado de lastro, e a definição das áreas para a disposição de lastro fixo deve ser conduzida conjuntamente pelas equipes de projeto encarregadas do arranjo e de pesos e centros.

¹²¹ A opção pelo uso de um mastro oprônico não penetrante, por exemplo, seria atraente por permitir ao projetista uma maior liberdade sobre onde posicionar o compartimento do comando. A única questão subjacente seria a necessidade de convencer, sobre tal escolha, o Setor Operativo, habituado a uma longa tradição de uso de um mastro penetrante para o periscópio de ataque. A introdução e adoção de novas tecnologias, em casos como esse, costuma ocorrer lentamente [4].

5.5.4 Tráfego a bordo, manutenção/operação e rotas de acesso e remoção

A questão do tráfego a bordo é fator determinante para o arranjo. É desejável que os compartimentos sejam dispostos de forma a facilitar o tráfego a bordo e a evitar interferências desnecessárias de fluxo.

Os espaços de acomodação da tripulação devem ser dispostos, na medida do possível, com vistas a facilitar o acesso às áreas operacionais e aos postos de guarnecimento da tripulação. A interferência de fluxo é indesejável, sobretudo por ocasião do guarnecimento dos postos de combate.

Também é necessário prever espaços para a operação e manutenção dos equipamentos. Os espaços para operação devem ser respeitados de forma a evitar interferências físicas entre os equipamentos ou impossibilidade de guarnecimento adequado por parte dos operadores. Demandas associadas à acessibilidade a determinadas partes do equipamento (para leituras de rotina ou manutenção de primeiro escalão) também são comuns.

O mesmo se dá com relação às rotas de acesso e remoção (pessoal/equipamento/armamento). Escotilhas de acesso, com diâmetro e posicionamento apropriado, devem ser distribuídas para permitir o embarque desses itens e sua condução até os compartimentos de destino. Durante a construção e a manutenção do submarino, esse é um aspecto crítico sobretudo para itens de grande peso ou dimensões. Em alguns casos, estudos de arranjo específicos devem ser efetuados para assegurar a viabilidade dessas atividades¹²². Considerações análogas se aplicam aos estudos das rotas de remoção.

5.5.5 Habitabilidade e ergonomia

Critérios de habitabilidade e ergonomia também influenciam a atividade de arranjo, sobretudo para o projeto das áreas habitáveis e dos espaços operacionais do submarino. Alguns exemplos são:

- a) Larguras mínimas de corredores;
- b) Número, dimensões mínimas e orientação dos leitos;
- c) Pé direito de compartimentos habitáveis e operacionais;

¹²² Para itens de grande peso, por exemplo, a necessidade de olhais ou suportes específicos para a instalação de aparelhos de laborar pode estar presente. No caso de itens de grande volume, a desmontagem de determinados painéis e componentes pode ser necessária.

- d) Número de sanitários, chuveiros e pias;
- e) Número de assentos na Praça d'Armas e nas cobertas de rancho;
- f) Disposição e dimensões dos visores, teclados e assentos, entre outros fatores, das áreas operacionais;

No que diz respeito à habitabilidade, as acomodações da tripulação devem ser objeto de especial atenção, tendo-se em mente o emprego militar do submarino. O ambiente a bordo é hostil ao conforto humano e o longo período das comissões acaba gerando desgaste da tripulação, o que se reflete em uma degradação da prontidão militar do submarino. Garantir um bom nível de conforto a bordo é essencial à manutenção de um nível apropriado de prontidão.

Os requisitos de ergonomia, por seu turno, visam a garantir que os espaços habitáveis e, sobretudo, operacionais ofereçam condições apropriadas de conforto e trabalho para os tripulantes. A ergonomia é importante para garantir que os longos períodos de serviço e guarnecimento transcorram sem que um desgaste físico excessivo aconteça.

5.5.6 Considerações específicas

Boa parte da discussão dos itens anteriores se baseou em [4]. Tal referência trata, ainda, de outras considerações mais específicas sobre o arranjo (posicionamento do sistema sonar, dos tubos de lançamento de armas, arranjo da propulsão, etc.). Embora interessantes, elas excedem o escopo deste trabalho.

Como relação aos estudos de arranjo em si, outras questões de interesse são:

- a) Topologia inicial do submarino: o primeiro passo para os estudos de arranjo é o estabelecimento da topologia do submarino (i.e. a disposição espacial coerente dos diversos compartimentos de bordo). Depois de estabelecida essa topologia, é necessário que os aspectos de trânsito entre os compartimentos sejam considerados em maior profundidade. Nesse sentido, quanto maior o número de conveses do submarino, maior a complexidade dessa tarefa;

- b) Compartimentos Críticos: é necessário definir quais compartimentos devem ser estudados em maior profundidade desde as etapas iniciais do projeto. Compartimentos complexos (propulsão, praças de auxiliares e comando) costumam ser abordados com prioridade;
- c) Sistemas/Equipamentos Críticos: é conveniente estabelecer um critério de classificação de quão críticos, em termos de arranjo, são os sistemas/equipamentos/redes. A idéia é que os elementos críticos sejam arranjados em primeiro lugar. Decorre, naturalmente, que itens mais volumosos ou de grandes dimensões são considerados com precedência. Entretanto, características como peso, custo e tempo de aquisição podem ser também levadas em conta durante a priorização dos itens;
- d) Avaliação preliminar de viabilidade: questão crucial diz respeito a como abordar a viabilidade do arranjo ainda nas etapas iniciais de projeto, quando se dispõe de muito pouca informação sobre os sistemas. É comum estabelecer um índice de relação entre a demanda volumétrica para um dado compartimento e o volume arranjável do compartimento¹²³ [3]. É claro que se essa relação for maior que a unidade, ou muito próxima a ela, estaremos diante de uma inviabilidade volumétrica. Valores limites típicos para esse índice podem ser estabelecidos para cada estágio do projeto (e.g. quanto mais adiantado o projeto, espera-se que o arranjo do navio seja mais populoso) e para cada tipo de compartimento (e.g. compartimentos de propulsão tendem a ser muito ocupados, enquanto compartimentos habitáveis são relativamente menos congestionados). Para tanto, a experiência de projetos anteriores é essencial.

5.6 Propulsão

Sendo o sistema que mais ocupa volume a bordo, a planta de propulsão do submarino tem papel relevante na determinação das dimensões principais da

¹²³ Ou seja, para o compartimento sob estudo é a relação entre os volumes de itens a arranjar no compartimento e o volume disponível para arranjo, ou volume arranjável do compartimento - $\Sigma(V_{\text{itens}})/V_{\text{arr}}$.

embarcação. Assim, a concepção de sua arquitetura e a escolha dos equipamentos que a compõem têm impacto considerável no sistema submarino.

Aspectos ligados à redução da resistência ao avanço e seleção do hélice foram tratados anteriormente (itens 5.2.2.2 e 5.2.2.3). Neste item, a planta de propulsão em si será brevemente analisada. A discussão admite que se trate de uma planta convencional (i.e. sistemas *AIP* não serão tratados).

Os principais componentes da arquitetura de propulsão diesel-elétrica são [4]:

- a) Motor Elétrico Principal (MEP);
- b) Baterias;
- c) Diesel Geradores;
- d) Combustível.

5.6.1 Motor Elétrico Principal (MEP)

Em geral, o MEP será um motor de corrente contínua cujo rotor se encontra diretamente acoplado ao eixo do hélice. O motor deve prover a potência necessária para propelir o submarino à velocidade máxima. Na condição de máxima potência, o MEP deve ter um torque de saída equivalente ao torque do hélice. Além disso, sua velocidade angular deve ser equivalente àquela na qual o hélice proverá o empuxo máximo.

As considerações de projeto envolvidas na seleção do MEP concernem aspectos relativos ao volume das instalações, aos níveis de torque fornecido e à velocidade angular do eixo. Configurações com o uso de dois motores em série e o uso de engrenagens redutoras podem ser exploradas. Entretanto, as demandas adicionais por volume, associadas a tais configurações, não podem ser negligenciadas.

Os gabinetes elétricos associados ao motor representam demandas significativas por volume. Requisitos de redundância e segregação desses gabinetes podem também estar presentes e inserem complexidade adicional ao arranjo.

5.6.2 Baterias

A energia armazenada nas baterias responde pela demanda por energia do submarino durante a operação submersa, sendo predominante a parcela de

demanda relativa à propulsão. O restante da demanda por energia, excluída a parcela de propulsão, é denominada Carga Hotel. Em geral, as baterias são dimensionadas para prover um dado alcance submerso (i.e. certo tempo submerso a uma dada velocidade, em geral a velocidade de patrulha).

5.6.3 Diesel-Geradores

Os diesel-geradores (DG's) têm a função de prover carga para as baterias. Por demandarem oxigênio para seu funcionamento, o submarino deve estar em condição de superfície ou operando em esnorquel para que os DG's sejam acionados. Deve haver redundância dessa função, de forma que em geral há mais de um diesel-gerador a bordo.

5.6.4 Combustível

A quantidade de combustível a bordo é determinada, em última análise, pela quantidade de energia necessária para o cumprimento de uma patrulha completa. Assim, a quantidade de combustível é determinada pela Carga Hotel e pela demanda de energia da propulsão, durante o tempo que durar a patrulha. Naturalmente, as eficiências associadas às conversões de energia durante o processo de carga e descarga das baterias devem ser consideradas no projeto.

5.7 Sistemas Auxiliares

Os sistemas auxiliares permitem ao submarino operar no ambiente para o qual foi projetado, além de prover suporte à vida humana em um ambiente dissociado da atmosfera [4].

Durante as etapas iniciais do projeto, as considerações de engenharia relativas a esses sistemas, em geral, restringem-se à estimativa de seus pesos e demandas por volume.

Alguns dos principais sistemas auxiliares são [4] [5]:

- a) Sistemas hidráulicos;
- b) Sistemas de ar de alta pressão;
- c) Sistemas de produção e distribuição de água;

- d) Sistemas de compensação e trimagem;
- e) Sistemas de ventilação e condicionamento de ar;
- f) Sistemas elétricos.

Os itens seguintes discutem brevemente os sistemas listados. Maiores detalhes estão disponíveis em [4], referência que alicerça a maior parte da discussão apresentada. Além disso, informações bastante completas sobre os principais sistemas auxiliares presentes em submarinos constam em [15].

5.7.1 Sistemas hidráulicos

Há diversos atuadores mecânicos presentes nos sistemas de bordo, sendo comum que o projeto preveja uma estação de fornecimento de fluido hidráulico para o seu funcionamento. Exemplo clássico são os atuadores do sistema de governo e manobra do navio (lemes e hidroplanos). Os sistemas de içamento dos mastros e de atuação de diversas válvulas também podem ser listados.

Em geral uma planta centralizada de distribuição é arranjada na praça principal de máquinas auxiliares, sendo o fluido hidráulico distribuído para os utilizadores de bordo por meio de uma rede apropriada de tubulações. Por questões de segregação, arquiteturas descentralizadas (com mais de uma unidade de produção) podem ser adotadas. Nesse caso, as penalidades relacionadas a demandas adicionais por volume devem ser convenientemente avaliadas.

5.7.2 Sistemas de ar de alta pressão

A principal aplicação dos sistema de ar de alta pressão é a expulsão de água de lastro dos tanques de lastro principais (*Main Ballast Tanks - MBT*). Em algumas arquiteturas, o sistema de trimagem do navio pode também utilizar ar de alta pressão para a transferência de água entre os tanques que compõem esse sistema. Além disso, algumas válvulas pneumáticas podem ser acionadas por ar comprimido de alta pressão.

O ar do sistema é geralmente armazenado em ampolas apropriadamente arranjadas e a distribuição do ar é feita por tubulações dedicadas.

5.7.3 Sistemas de produção e distribuição de água

No submarino existem sistemas de produção e distribuição de água para consumo e utilização. A produção de água doce é geralmente feita por grupos de osmose reversa e a distribuição da água a bordo se dá por tubulações convenientemente arranjadas.

Além disso, há sistemas para a coleta, armazenamento e posterior eliminação de águas servidas. Embora não envolvam complexidades adicionais, algumas redes associadas a estes sistemas estão em contato com o ambiente externo (expostas, portanto, à pressão externa). Assim, segregação adequada dessas redes deve ser provida.

5.7.4 Sistemas de compensação e trimagem

Como anteriormente tratado, a condição de equilíbrio hidrostático pode ser perturbada por variações da força peso ou da força de flutuação. Variações de peso ocorrem, por exemplo, pelo consumo de combustível, aguada e víveres a bordo. Variações da força de flutuação decorrem da variação na densidade da água e da própria profundidade de operação¹²⁴.

O submarino deve possuir tanques internos de compensação. O sistema de compensação contrabalança as mudanças de peso por meio da admissão/expulsão de água do mar. Os tanques de compensação são geralmente posicionados o mais próximo possível da posição longitudinal do centro de carena (o que minimiza ou anula momentos decorrentes das operações de compensação). O dimensionamento dos volumes desses tanques é de fundamental importância para as etapas iniciais de projeto e é em geral realizado com base em uma técnica específica (estudo do “polígono de equilíbrio”, ver Apêndice L).

A variação de peso também pode gerar momentos que tendem a mudar o ângulo de trim do navio. Estes momentos são compensados por um sistema de trimagem, que conta com tanques geralmente posicionados nas extremidades internas do casco resistente. Combinações variáveis dos níveis de água nos tanques

¹²⁴ Conforme já discutido, o perfil de densidade da água do mar varia de acordo com a profundidade, de forma que ambos os fatores estão acoplados. Entretanto, considerando isoladamente a variação da profundidade, há variação na flutuação quando o submarino aumenta sua profundidade, pois a pressão hidrostática comprime o casco, diminuindo o volume deslocado pelo submarino e conseqüentemente a força de flutuação.

(geralmente a transferência se dá por bombeamento do fluido) devem gerar momentos suficientes para compensar os momentos advindos da variação de pesos.

5.7.5 Sistemas de ventilação e condicionamento de ar

Sistemas de ventilação e condicionamento de ar existem a bordo para controlar os níveis de temperatura e umidade dos diversos compartimentos do submarino. Novamente, pode haver a escolha por estações centralizadas ou descentralizadas. A distribuição do ar é feita por tubulações específicas, cujo arranjo é de razoável complexidade.

Outra função importante desses sistemas é a renovação da atmosfera a bordo. Durante o mergulho, há gradual degradação do ar no interior do submarino. O consumo do ar pela tripulação reduz os níveis de oxigênio e aumenta os níveis de gás carbônico. Além disso, o funcionamento de alguns equipamentos e certas atividades a bordo tem como subprodutos elementos contaminantes do ar que, embora inofensivos em pequenas quantidades, podem ter sua concentração preocupantemente aumentada no ambiente confinado do interior do CR. Para a renovação atmosférica, dispositivos de liberação exotérmica de oxigênio (velas de oxigênio) e reagentes químicos específicos para a captura de CO₂ do ambiente são usados.

5.7.6 Sistemas elétricos

Energia elétrica será necessária para a operação de uma infinidade de sistemas a bordo, como: propulsão, sistemas de controle, sistemas de suporte à vida e sistemas de navegação/comunicações/combate.

Como anteriormente discutido, a energia elétrica é produzida por meio dos diesel-geradores e armazenada nas baterias. Embora haja novas tecnologias bastante promissoras, o uso de baterias chumbo-ácido é a solução consagrada para aplicação em submarinos. Considerações relacionadas ao arranjo elétrico das baterias envolvem a complexidade de estabelecer conexões em série/paralelo que atendam às demandas de bordo convenientemente. Arranjos dos terminais de forma a minimizar o campo eletromagnético gerado e reduzir pontos de alta diferença de potencial (risco de choque elétrico) são comumente necessários. O compartimento

das baterias também deve ser servido por ventilação adequada, de forma a evitar concentrações elevadas de hidrogênio proveniente da operação de carga e descarga das baterias (risco de explosão).

As baterias fornecem energia em corrente contínua. Como alguns dos equipamentos utilizadores necessitam de corrente alternada, é necessário que haja painéis de conversão a bordo. Igualmente, há a necessidade de painéis de distribuição, associados à rede elétrica de bordo, de forma a prover energia aos diversos usuários (propulsão/equipamentos/tripulação). Atenção especial deve ser dada ao arranjo dos compartimentos que abrigam os gabinetes elétricos, de forma a evitar que redes de água e outros fluidos (especialmente as sob pressão) corram próximas a tais gabinetes.

5.8 Construção

Conforme enunciado no capítulo 4, o projeto deve ser adequado à construção. Para tanto, deve respeitar as capacidades tecnológicas existentes e os recursos disponíveis na infraestrutura de produção. Além disso, deve possuir um custo de produção aceitável, diante das performances requeridas.

As restrições impostas pela infraestrutura têm efeito no projeto (i.e. podem ser consideradas como *MEDC*). Alguns exemplos são abaixo elencados:

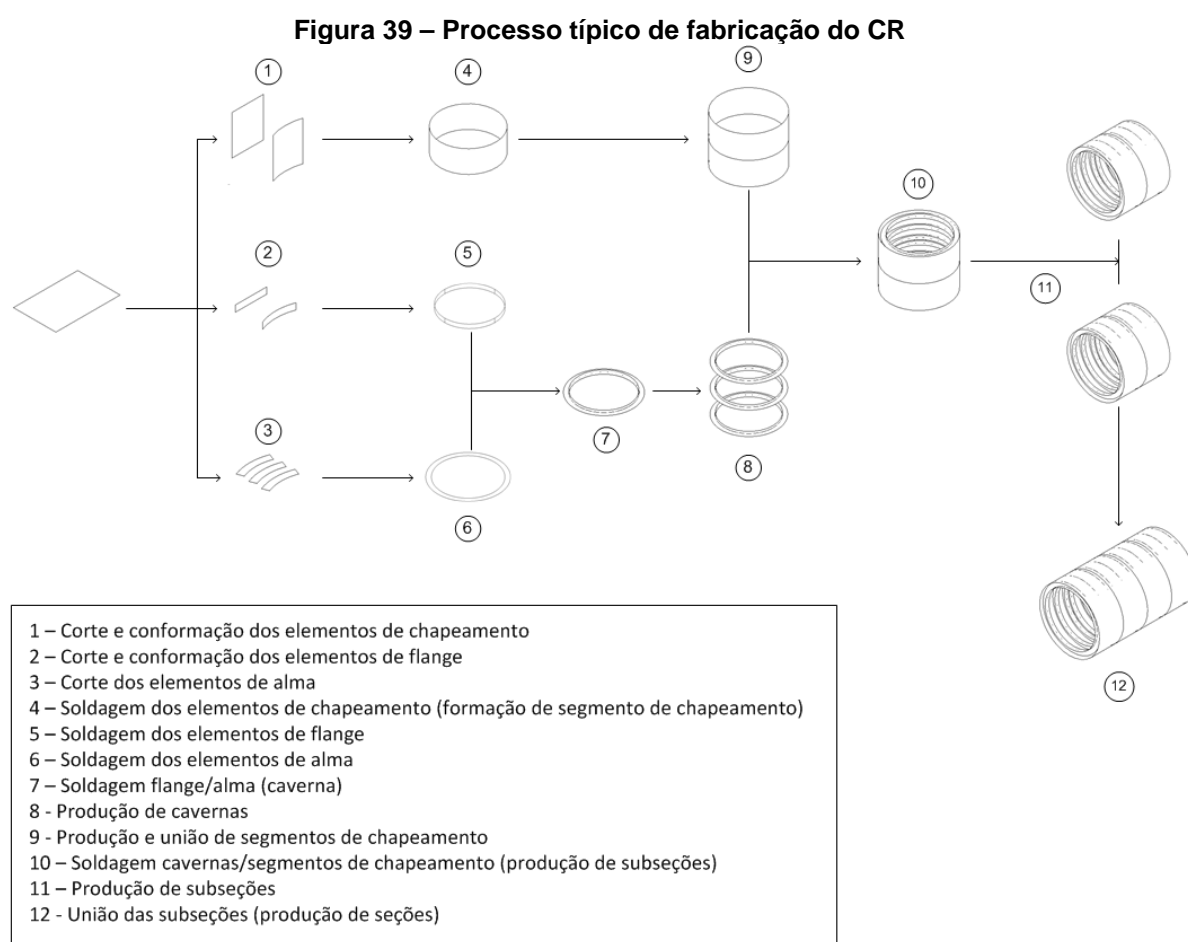
- a) Eventuais limitações em respeitar as tolerâncias preconizadas no projeto do CR devem ser de conhecimento das equipes de engenharia e devem ser consideradas nos cálculos estruturais (e.g. falta de circularidade das cavernas, perpendicularidade de certos itens estruturais, perímetro das cavernas, desvios em relação às dimensões nominais decorrentes dos processos de fabricação, etc.);
- b) Durante os processos de fabricação, as subseções e seções devem ser movimentadas entre as diversas estações de trabalho. A infraestrutura de movimentação deve compreender guindastes com capacidade de carga adequada e pisos com resistência estrutural compatível com o peso desses elementos. Havendo limitações, elas influenciarão o projeto (i.e. afetando a lógica de construção);
- c) As limitações de curvatura de tubulações (i.e. mínimo raio de curvatura que pode ser adotado para determinado diâmetro) devem ser de

conhecimento das equipes de arranjo. As curvaturas adotadas no modelo 3D do submarino devem ser compatíveis com as que efetivamente podem ser produzidas no estaleiro.

5.8.1 Etapas de fabricação das estruturas principais

A fabricação das estruturas envolve processos diversos. Em geral, são produzidas subseções do CR, de comprimento entre dois ou três metros, que são posteriormente unidas.

O processo típico de fabricação do CR é ilustrado Figura 39.



Fonte: autor

A partir das chapas padrão recebidas dos fabricantes, ocorre o processo de corte dos segmentos de almas, flanges e chapas de casco. Processos de corte

térmico (oxicorte, plasma, etc.¹²⁵) ou hidrocorte (corte por jato d'água) são comumente usados.

Os seguimentos de alma são cortados já com curvatura adequada. Os seguimentos de flange e chapeamento passam por conformação mecânica (em geral a frio), posterior ao corte, para adquirir as curvaturas desejadas. Em todos os casos, é comum que seja adotada certa margem sobre as medidas nominais de projeto (espessuras, larguras, comprimentos), de forma a possibilitar os processos posteriores da fabricação que consumirão tais margens (conformação, chanfragem, etc.).

Em seguida, ocorre a união por soldagem dos segmentos de flange e alma e as cavernas são montadas. São também soldados os segmentos de chapeamento, formando um trecho cilíndrico de chapeamento. A soldagem das cavernas com esse trecho cilíndrico forma uma subseção. Subseções são também unidas por soldagem para formar as seções do CR. Como um aço de alta resistência é utilizado, os processos de soldagem ocorrem sob condições controladas (temperatura, sentido da solda, etc.).

Convém ressaltar que os procedimentos de produção das cavernas e subseções compreendem uma série de verificações dimensionais e geométricas das peças produzidas (e.g. alinhamento, circularidade, perpendicularidade, etc.). Em geral, as tolerâncias estabelecidas em projeto são bastante rigorosas. Além disso, as soldas realizadas passam por inspeções específicas para assegurar sua conformidade aos critérios de qualidade estabelecidos (e.g. inspeção visual, por líquido penetrante, por partículas magnéticas, por ultrassom e/ou por raios-x).

5.8.2 Preparação dos módulos de equipamentos

Paralelamente à fabricação do CR, ocorre a integração de diversos sistemas e equipamentos, e respectivas tubulações e conexões, em módulos estruturais pré-fabricados. Essa integração prévia dos sistemas permite que uma série de testes dos equipamentos, e de seu funcionamento conjunto, possa ser feita antes da colocação desses equipamentos a bordo do submarino e também permite que a instalação da maioria das tubulações e cabeamentos seja realizada antes da

¹²⁵ Caso o oxicorte seja usado, deve haver tratamento posterior das peças cortadas para remoção da Zona Termicamente Afetada (ZTA), já que há alteração das propriedades mecânicas do aço nessa zona.

montagem final a bordo. Essas medidas possibilitam considerável economia de tempo durante a construção.

5.8.3 Integração das seções e fechamento do casco

Após a união das subseções, as seções do CR recebem os demais elementos estruturais internos (jazentes de equipamentos, tanques integrados ao casco, elementos resistentes, etc.). Depois da conclusão dessa etapa, os módulos de equipamentos podem ser integrados às seções (*outfitting*). Posteriormente, as seções são finalmente unidas e o casco fechado. Após essa etapa, ainda haverá alguns trabalhos de instalação de certos equipamentos remanescentes e uma série de testes de integração e ajuste dos sistemas de bordo [4].

5.9 Custos

5.9.1 Custo de Ciclo de Vida

A manutenção de capacidade militar naval não prescinde da existência de uma frota de meios navais compatíveis com as missões que se vislumbra cumprir; o que, naturalmente, implica em custos.

O custo total associado a tal capacidade militar não se restringe ao custo de aquisição dos meios navais, estendendo-se a aspectos que vão desde a operação ao descomissionamento dos meios. Nesse sentido, o conceito de Custo de Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost – LCC*) é modernamente aplicado às análises de custo de meios navais.

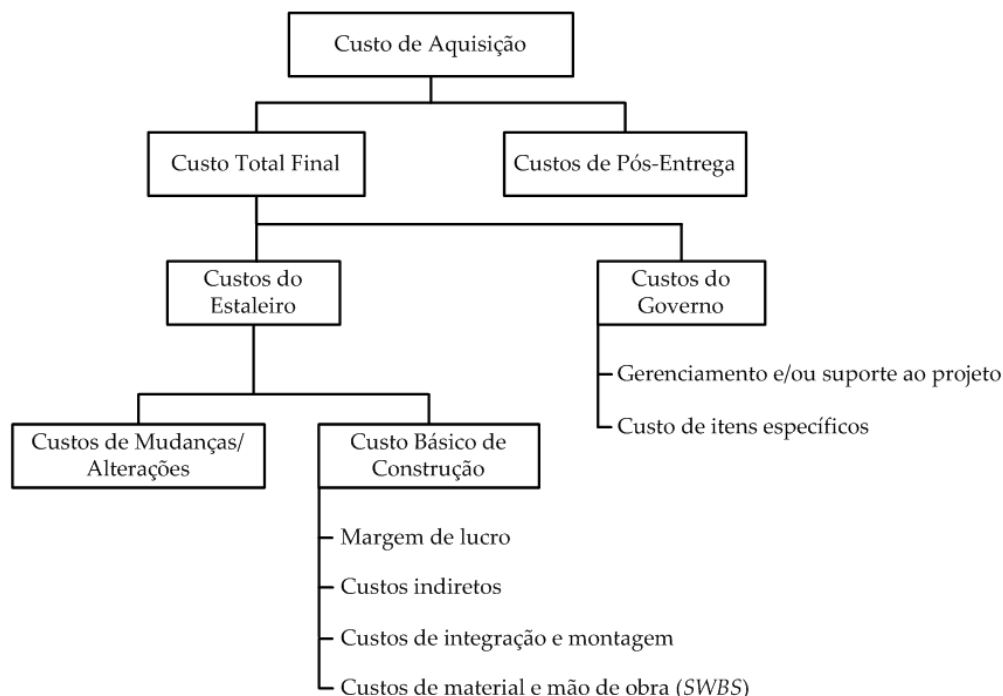
Shingler et al. definem o *LCC* como o *custo direto total, para o governo, da aquisição e posse de um sistema durante toda sua vida útil* [34]. Os autores destacam que o *LCC* se compõe, em essência, de quatro partes: o custo de desenvolvimento, o custo de aquisição, os custos de operação e apoio e o custo de descomissionamento¹²⁶.

Considerando-se o primeiro navio de uma dada classe, é de interesse a análise mais aprofundada do custo total de aquisição (Figura 40). Ele se compõe do

¹²⁶ Ordenados do maior para o menor, em geral, os custos se apresentam na seguinte sequência: operação e apoio, aquisição, desenvolvimento e descomissionamento.

custo total final e do custo de pós-entrega (i.e. custo de ajustes/testes posteriores à entrega, provas de mar, etc.).

Figura 40 – Custos de aquisição (primeiro navio da classe)



Fonte: autor (baseado em [34])

O custo total final inclui os custos do governo e os custos do estaleiro.

Os custos do governo¹²⁷ podem incluir custos de gerenciamento e/ou suporte ao projeto e os custos de itens específicos (*payload* e/ou demais sistemas)¹²⁸. A extensão de encargos assumidos pelo governo varia, naturalmente, dependendo do marco contratual estabelecido para a aquisição do navio e do grau de participação estatal no desenvolvimento dos sistemas de bordo. No caso de aquisições diretas no mercado internacional, parte desses custos pode não estar presente ou pode ser reduzida.

¹²⁷ O termo pode gerar certa confusão já que, em última instância, o custo de aquisição é totalmente suportado pelo governo. Em realidade, os lançamentos sob tal rubrica retratam o fato de que certas parcelas do custo final de aquisição já são originariamente suportadas pelo governo; devendo ser, naturalmente, considerados para contabilidade apropriada dos custos.

¹²⁸ Estes últimos podem estar presentes quando, por exemplo, o governo é responsável pela disponibilização/desenvolvimento de certos sistemas do navio (a ser integrados ao navio e que não serão produzidos/adquiridos diretamente pelo estaleiro). Por exemplo, no caso de o governo se comprometer com o desenvolvimento dos sistemas de propulsão e/ou sistemas de combate, entre outros.

Os custos do estaleiro se dividem entre o Custo Básico de Construção (*Basic Cost of Construction – BCC*) e os custos de mudanças/alterações. O *BCC* é o parâmetro de maior interesse e sobre o qual esta dissertação se detém (item 7.3.11). Ele é composto pelos custos de material e mão de obra, geralmente associados a uma EAP¹²⁹ específica, acrescidos dos custos de integração/montagem, dos custos indiretos e da margem de lucro do estaleiro.

5.9.2 Modelos de custo

Modelos de custo para aplicação durante o projeto são assunto de grande interesse em engenharia naval [9]. Essa assertiva é igualmente aplicável ao projeto de submarinos [3] [4]. Entretanto, nenhum dos modelos de estimativa atualmente disponíveis pode ser considerado plenamente satisfatório [4].

Burcher e Rydill [4] definem o custo como uma propriedade intrínseca do submarino, determinada pela natureza de seus sistemas componentes. Neste contexto, a estimativa do custo total se baseia na análise dos custos individuais de cada sistema componente. Ela pode ser feita com base em:

- a) Custo por grupos de peso do submarino: essa metodologia é talvez a mais tradicionalmente utilizada, porém possui limitações que devem ser colocadas em correta perspectiva. As diferenças entre os projetos anteriores, que serviram de base para a determinação dos índices de custo, e o projeto atual podem não ser prontamente identificáveis. Se tais diferenças não forem corretamente compreendidas e consideradas no modelo de custo, distorções significativas podem estar presentes nas estimativas;
- b) Custo por dados de estaleiros: em alguns casos, o projetista pode ter acesso a dados de custo de maior precisão, fornecidos pelos estaleiros construtores e baseados em projetos anteriores já produzidos. É pouco provável, entretanto, que tais dados estejam disponíveis. Além disso, caso disponíveis, em geral esses dados não estarão organizados por grupos

¹²⁹ Neste trabalho, os custos de material e mão de obra são derivados a partir dos dados de peso do submarino (estrutura *SWBS*).

de peso ou parâmetros funcionais do submarino, o que insere dificuldade em sua utilização pelo projetista;

- c) Custo por parâmetros funcionais: em tese, seria interessante que o custo pudesse ser diretamente relacionado a parâmetros funcionais de desempenho do submarino (e.g. qual o aumento de custo relacionado a cada metro adicional de *MOD*, qual o aumento de custo para cada nó adicional de velocidade máxima, etc.). Na prática, entretanto, é muito difícil conseguir estabelecer essas relações, dada a profunda integração entre os sistemas/funções do submarino.

Uma possível estrutura para avaliação de custos, conforme sugerida pelos autores, deve considerar:

- a) Custos identificáveis: referem-se a itens/sistemas que podem ser prontamente identificados como componentes majoritários do custo do submarino (e.g. propulsão e sistemas de armas) e cujo custo individual pode ser previamente avaliado;
- b) Custos de fabricação e integração do submarino: em tese, é possível avaliar tais custos, mas eles diferem consideravelmente entre estaleiros (e.g. diferentes níveis de produtividade, técnicas de construção, processos tecnológicos aplicados, etc.);
- c) Custos de capital e custos fixos: custos de capital representam investimentos necessários para a construção do submarino (e.g. maquinário, novas instalações ou adaptações em instalações existentes, etc.). Custos fixos se referem a fatores de produção que independem do nível de atividade do estaleiro, estando presentes mesmo que nenhum submarino esteja sendo produzido (e.g. salários, encargos, etc.);
- d) Custos de normas aplicáveis, testes e garantia da qualidade: referem-se aos custos relacionados à aquisição de normas, aos testes preconizados em projeto e aos processos de avaliação e garantia da qualidade;

- e) Custos de Pesquisa e Desenvolvimento: custos associados a quaisquer atividades de pesquisa e desenvolvimento relacionadas à produção do submarino (e.g. criação de infraestrutura para testes, condução de pesquisa aplicada, desenvolvimento de tecnologias ou equipamentos específicos para a construção, protótipos, etc.);

- f) Margem de lucro: que será aplicada pelo estaleiro construtor e deverá ser considerada na avaliação do custo final.

Nesta dissertação, será empregado um modelo simplificado de custo por grupos de peso, com refinamentos relativos à complexidade de integração e aspectos construtivos do navio e que considera percentuais para estimativa de custos indiretos e de margem de lucro do estaleiro.

6 OTIMIZAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

A natureza é uma experimentadora inveterada. As mãos de ferro da necessidade jogam os dados do acaso por um tempo indefinidamente longo, e uma sucessão assombrosa de lances vão sendo premiados (ou não) no laboratório da vida. Alguns desses lances vingam e florescem, outros desaparecem sem deixar vestígios.

Eduardo Giannetti

Este capítulo discute brevemente o conceito de otimização. Além disso, apresenta pequeno resumo sobre as principais técnicas de otimização e expõe argumentação quanto à aplicabilidade de tais técnicas em problemas de Engenharia Naval. Segue-se uma explicação sucinta sobre algoritmos genéticos, com ênfase no algoritmo *NSGA II (Non Dominating Sorting Genetic Algorithm)*. Parte do texto apresentado neste capítulo foi anteriormente publicada (com adaptações) em [35].

6.1 O conceito de otimização

A seguinte definição de otimização, conforme o dicionário Merriam-Webster, é apropriada aos propósitos deste texto:

“OPTIMIZATION: an act, process, or methodology of making something (as a design, system, or decision) as fully perfect, functional or effective as possible;

*specifically: the mathematical procedures (as finding the maximum of a function) involved in this*¹³⁰.

¹³⁰ "Otimização: a ação, processo ou metodologia de tornar alguma coisa (como um projeto, sistema ou decisão) tão perfeita, funcional ou efetiva quanto possível; especificamente: os procedimentos matemáticos (como a busca do máximo de uma função) nela envolvidos." (Tradução livre).

Alguns conceitos implícitos na definição apresentada merecem destaque. Primeiramente, o processo de otimização busca maximizar/minimizar um determinado atributo do projeto/sistema em estudo. Dessa forma, para que a otimização seja efetivamente conduzida, o(s) aspecto(s) que se deseja otimizar deve(m) estar claramente definido(s) e expresso(s) de maneira quantificável.

Além disso, o processo estará geralmente limitado por restrições. Conforme expresso, a perfeição/funcionalidade/efetividade buscada não se estenderá além dos patamares máximos possíveis.

Por fim, ainda de acordo com a definição, o termo "otimização" pode se aplicar igualmente aos procedimentos matemáticos utilizados para a condução do processo descrito. Em geral, esses procedimentos são denominados "Técnicas de Otimização".

6.2 **Definições preliminares**

Antes de enunciar matematicamente o problema de otimização, convém estabelecer alguns conceitos preliminares¹³¹.

- a) Variáveis de projeto: são os parâmetros do problema utilizados para descrever e otimizar o sistema. As variáveis de projeto podem assumir valores discretos ou contínuos;

- b) Função objetivo: em geral uma expressão matemática, enunciada em termos das variáveis de projeto escolhidas, que quantifica os atributos que se deseja otimizar. Ela pode ser classificada em simples ou multiobjetivo (i.e. quando se deseja otimizar, respectivamente, um único ou múltiplos atributos);

¹³¹ A discussão se baseia em [36], referência em vernáculo e cuja qualidade e objetividade são dignas de nota. Ela fundamenta grande parcela da parte inicial deste capítulo e é recomendada ao leitor interessado em um panorama abrangente e acessível sobre o tema.

- c) Restrições¹³²: são limitações impostas à obtenção da solução ótima. Podem ser classificadas em laterais, desigualdade e igualdade. Restrições laterais impõem limites aos valores das variáveis de projeto, ou seja, para o vetor de variáveis de projeto $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$. Elas têm forma $x_{\min-i} \leq x_i \leq x_{\max-i}$ ($i = 1, \dots, n$). Restrições desigualdade são estabelecidas como funções das variáveis de projeto e têm forma $g_j(x) \geq 0$ ($j = 1, \dots, n_g$). Restrições igualdade são também funções das variáveis de projeto e têm forma $h_k(x) = 0$ ($k = 1, \dots, n_h$). Este último tipo de restrição é complexo de implementar na prática e pode exigir tratamento matemático específico (transformação em restrições desigualdade);

Silva [36] destaca que a escolha apropriada das variáveis de projeto é crítica para o sucesso do processo de otimização. Este sucesso também depende da formulação adequada da função objetivo¹³³.

6.3 O problema de otimização

Com base nas definições anteriores, sejam:

- $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$ o vetor de variáveis de projeto;
- $f(x)$ a função objetivo que mapeia o domínio expresso pelas variáveis de projeto em uma imagem de valores escalares ($\mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$). Ou seja, quantifica os atributos de interesse a partir das variáveis de projeto;
- J restrições desigualdade na forma $g_j(x) \geq 0$;
- K restrições igualdade na forma $h_k(x) = 0$;
- N restrições laterais na forma $x_{\min-i} \leq x_i \leq x_{\max-i}$.

Daí o problema de otimização pode ser enunciado em sua formulação matemática clássica:

¹³² Com relação ao estado, as restrições podem ser classificadas em ativas e inativas. Uma restrição é considerada ativa quando $g_j(x) = 0$ e inativa quando $g_j(x) > 0$. Em tese, ao final da otimização, todas as restrições deverão estar ativas. As inativas não seriam, a princípio, necessárias ao processo de otimização.

¹³³ Embora tais assertivas pareçam elementares, os efeitos de uma formulação inadequada das variáveis/função objetivo não devem ser subestimados. Embora não tratados neste texto, exemplos específicos das distorções que podem ocorrer, provenientes de formulações inapropriadas, são fornecidos em [36].

Minimizar $f(x)$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} g_j(x) &\geq 0 & j = 1, 2, 3, \dots J; \\ h_k(x) &= 0 & k = 1, 2, 3, \dots K; \\ x_i^{(L)} &\leq x_i \leq x_i^{(U)} & i = 1, 2, 3, \dots N. \end{aligned}$$

Embora a formulação acima retrate um problema de minimização, problemas de maximização podem igualmente ser tratados pela manipulação conveniente da função objetivo. Manipulações semelhantes podem ser realizadas nas restrições de forma a alterar os operadores de desigualdade. Os índices (L) e (U) representam, respectivamente, os valores limites inferiores e superiores do vetor de variáveis de projeto.

O problema de otimização é denominado linear se a função objetivo e as restrições forem lineares. Do contrário, o problema é dito não linear.

Outro aspecto de interesse é o conceito de domínio viável, definido como a região do espaço de soluções na qual as restrições são respeitadas. As regiões em que alguma das restrições não é respeitada são denominadas domínio inviável.

Quando se pretende otimizar mais de um atributo, é necessário estabelecer uma forma para o problema de otimização que seja adequada a esse propósito. A princípio, isso poderia ser feito pela elaboração de uma função objetivo que combine convenientemente os atributos de interesse, como por exemplo:

$$\text{Minimizar } f(x) = \sum_{i=1}^n m_i(x)w_i$$

Na qual $m_i(x)$ são funções das variáveis de projeto que quantificam os atributos/objetivos de interesse e w_i são os pesos respectivos, que refletem a contribuição de cada atributo para o objetivo global. Naturalmente, o estabelecimento do valor dos pesos pode ser tarefa complexa.

Outra forma seria selecionar um dos atributos como função objetivo e transformar os demais em restrições. Nesse caso, o problema teria forma semelhante a:

Minimizar $f(x) = m_1(x)$

Sujeito a:

$m_2(x) < m_{2-\max}$; $m_3(x) < m_{3-\max}$; ... $m_n(x) < m_{n-\max}$

A escolha de qual formulação utilizar para o problema pode estar associada ao tipo de algoritmo de solução que será empregado. Além disso, dependendo do problema tratado, a forma escolhida poderá afetar o resultado e conduzir a diferentes soluções [36].

6.4 Técnicas de otimização

As principais técnicas (ou métodos) de otimização podem ser divididos em analíticos, gráficos e numéricos [36].

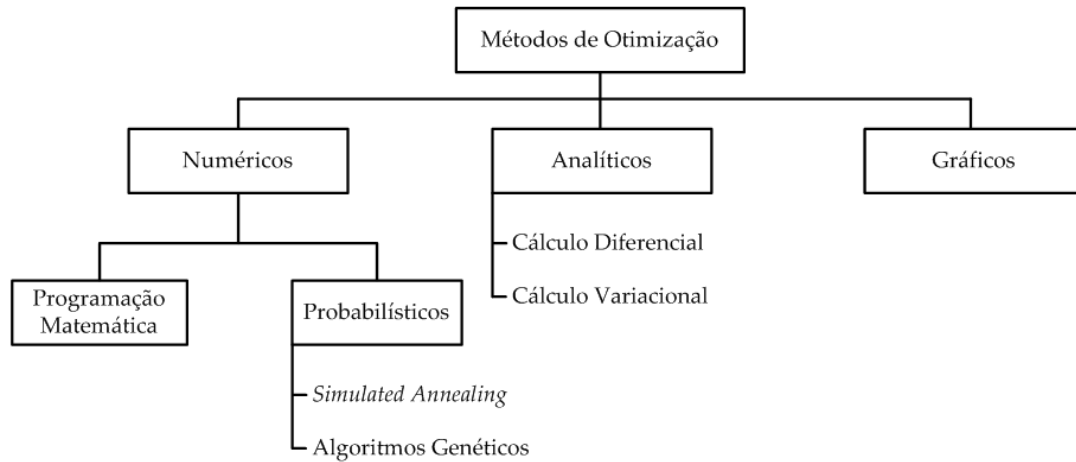
Os métodos analíticos (e.g. Cálculo Diferencial e Cálculo Variacional) possuem aplicação em geral restrita a problemas mais simples. Por seu turno, os métodos gráficos consistem na obtenção da solução por meio da construção de gráficos da função objetivo, restrições e domínio viável (estando, assim, limitados a problemas de otimização a duas variáveis).

Dessa forma, para boa parte das aplicações práticas em engenharia, métodos analíticos e gráficos possuem aplicabilidade limitada¹³⁴.

Os métodos numéricos para a resolução dos problemas de otimização podem ser divididos nos campos de métodos de programação matemática e de métodos probabilísticos (e.g. *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos). Os principais ramos dessa divisão são ilustrados (em lista não exaustiva) na Figura 41 e brevemente discutidos nos itens subsequentes (maiores detalhes constam em [36] e [37]).

¹³⁴ De fato, pois muitos desses problemas possuem funções objetivo que não são contínuas e/ou diferenciáveis ao longo do domínio de interesse (limitando os métodos analíticos clássicos) ou que são expressões de uma quantidade considerável de variáveis de projeto (o que impede sua representação e análise gráficas, limitando os métodos gráficos).

Figura 41 – Métodos de Otimização

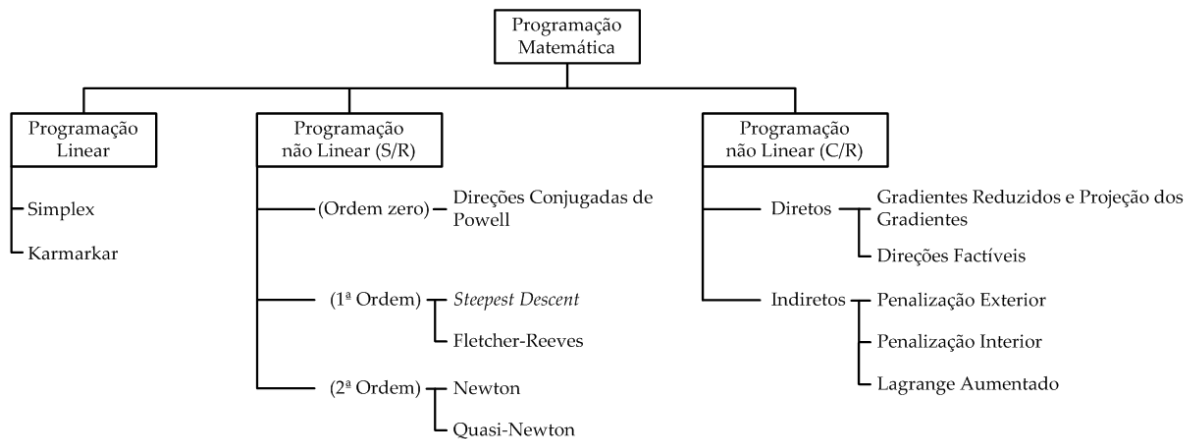


Fonte: autor (baseado em [36])

6.4.1 Programação matemática

As ramificações da Programação Matemática são ilustradas na Figura 42.

Figura 42 – Programação Matemática



Fonte: autor (baseado em [36])

Destacam-se nesse campo os seguintes métodos:

- a) Programação linear: métodos destinados à solução de problemas lineares (muitos problemas em engenharia e outras áreas do conhecimento podem ser modelados na forma linear). Como a função objetivo é linear, suas derivadas parciais em relação às variáveis de projeto são necessariamente constantes. Isso implica que no interior do domínio

viável não haverá pontos de mínimo (gradientes nulos) e a solução se encontrará necessariamente nas fronteiras do domínio viável, cujo contorno é denominado polítope. Geralmente¹³⁵, a solução ótima se encontrará nos vértices do polítope (intersecção de duas restrições). Alguns algoritmos de programação linear "percorrem" os vértices do polítope até encontrar a solução ótima (e.g. Simplex). Outros utilizam técnicas de determinação da direção a ser seguida, a partir de pontos no interior do polítope, para encontrar o vértice ótimo (e.g. Karmarkar);

- b) Programação não linear (sem restrições): métodos destinados à solução de problemas nos quais a função objetivo não é linear e nos quais não há restrições. Eles tentam definir, a partir de um ponto inicial (x_0), uma direção a seguir que reduza o valor da função objetivo. Definida tal direção (s_0), um "passo" de determinada magnitude (α) é dado nessa direção (magnitude esta determinada por meio de uma busca unidimensional) e a função é avaliada neste novo ponto ($x_1 = x_0 + \alpha s_0$). Atingido o critério de convergência, x_1 é tomado como o ponto de ótimo. Do contrário, nova iteração toma lugar¹³⁶;
- c) Programação não linear (com restrições): métodos destinados à solução de problemas em que a função objetivo e/ou restrições são não lineares. Diferentemente do item anterior, o problema aqui possui restrições. Dessarte, o ponto de mínimo (que deverá se situar dentro do domínio viável) não estará necessariamente associado a uma condição de gradiente nulo. Esses métodos se dividem em métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos seguem o procedimento dos algoritmos sem

¹³⁵ "Geralmente" por que, no caso em que as curvas de nível de $f(x)$ sejam paralelas a uma dada restrição, pode ocorrer a existência de soluções degeneradas, ou seja, inúmeros pontos sobre a reta de restrição produzirão o mesmo valor "ótimo" para $f(x)$.

¹³⁶ Segundo Silva [36], dependendo no nível de informação sobre $f(x)$ necessário para sua execução, esses métodos são classificados em três tipos:

1. Métodos de ordem zero: nos quais somente a avaliação de $f(x)$ é necessária. São adotados quando a função objetivo não é diferenciável ou altamente não linear (ex: método das direções conjugadas de Powell).
2. Métodos de primeira ordem: necessitam da avaliação de $f(x)$ e de suas derivadas parciais de primeira ordem (gradientes). São exemplos os métodos de "*Steepest Descent*" e de direções conjugadas (ou Fletcher-Reeves).
3. Métodos de segunda ordem: necessitam da avaliação de $f(x)$, de seus gradientes e de sua matriz Hessiana. Os métodos de Newton e Quasi-Newton compõem esse grupo.

restrições para encontrar o ponto de mínimo e aí testam o ponto quanto ao atendimento às restrições. Os métodos indiretos transformam o problema de otimização em um problema equivalente, sem restrições, e daí o resolvem¹³⁷.

6.4.2 Métodos probabilísticos

Os métodos de programação matemática não garantem que o mínimo encontrado seja um mínimo global (exceto no caso de funções objetivo convexas) e podem ficar "presos" em mínimos locais. Além disso, não permitem o tratamento de problemas de variáveis discretas (o que introduz descontinuidade do domínio/função objetivo e pode resultar na existência de vários mínimos locais). Ambos os problemas podem ser contornados pelo uso de algoritmos probabilísticos. Esses algoritmos utilizam buscas randômicas para percorrer o espaço de soluções e têm sido crescentemente aplicados a problemas de engenharia [36].

Destacam-se, entre tais métodos, as técnicas de *Simulated Annealing* (Recozimento Simulado) e Algoritmos Genéticos. Inspirados em fenômenos naturais, esses algoritmos se baseiam em processos de seleção randômica guiados por decisões probabilísticas. Eles permitem lidar com variáveis discretas e exigem apenas a avaliação da função objetivo nos pontos de interesse (não necessitam da avaliação de gradientes). Tais técnicas são brevemente descritas a seguir:

- a) *Simulated Annealing*: esse método se baseia no processo termodinâmico observado durante a solidificação de metais. Em metalurgia, o processo de recozimento envolve o aquecimento e o resfriamento controlado de metais - o que permite a obtenção de cristais de maior tamanho (na microestrutura do material) e conseqüente redução de defeitos. O fenômeno retrata o fato de que diferentes taxas de resfriamento equivalem a diferentes níveis de energia (níveis de energia mais estáveis – i.e. de menor energia potencial – estão associados a taxas mais lentas de resfriamento). O algoritmo usado no método tenta replicar esse

¹³⁷ São exemplos de métodos diretos os Métodos de Gradientes Reduzidos e Projeção dos Gradientes e o Método de Direções Factíveis. Exemplos de métodos indiretos são os Métodos de Penalização Exterior, Penalização Interior e de Lagrange Aumentado.

processo¹³⁸: os estados de energia são equivalentes ao valor da função objetivo (estados de baixa energia correspondendo a mínimos da função), as configurações de átomos equivalem às variáveis de projeto e a temperatura (T) emula um parâmetro de controle da convergência;

- b) Algoritmos Genéticos: técnicas inspiradas na biologia, baseadas no fenômeno de Seleção Natural e que simulam os mecanismos de aptidão diferenciada, pressão de seleção e mutação para resolver o problema de otimização. O método de otimização utilizado nesta dissertação se baseia em algoritmos genéticos, cujo conceito é explorado em maior detalhe no item 6.6.

6.5 O problema de otimização em Engenharia Naval

Embora o conceito de otimização aplicada ao projeto de navios não seja recente [10] [11], algumas características inerentes ao problema (e.g. não linearidade/descontinuidade do espaço de soluções) dificultam a aplicação de rotinas clássicas de otimização. Segundo Brown, essas características impedem que métodos de programação matemática sejam efetivamente empregados.

Diante dessas características, tanto Brown [6] quanto Parsons [38] ressaltam a eficiência que têm os algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms - GA's*) na abordagem deste tipo de problema. Eles são especialmente adequados a problemas de otimização multiobjetivo, por permitirem que uma população inicial de soluções evolua em direção a uma Fronteira de Pareto (que pode ser determinada em uma única rodada de otimização). Exemplos de aplicação de algoritmos genéticos no projeto de navios militares constam em [7], [39] e [40].

Com base nas considerações apontadas pelos autores citados e nos exemplos de aplicação bem sucedida dos GA's em problemas semelhantes ao tratado nesta dissertação, optou-se por empregar algoritmos genéticos no modelo de

¹³⁸ Para uma dada temperatura (T) o algoritmo "perturba" randomicamente a posição dos átomos (variáveis de projeto) e calcula a variação de energia (i.e. do valor da função objetivo) ΔE . Se $\Delta E < 0$ a nova configuração dos átomos é aceita. Do contrário, a nova configuração pode ser aceita ou rejeitada, dependendo de uma função probabilística $P(\Delta E, k_b)$ na qual k_b é a constante de Boltzmann. Com valores altos de T, o valor de P é próximo de 1, se T aproxima-se de 0 a probabilidade de aceitação é muito pequena. Assim, o valor inicial de T deve ser alto o suficiente para que o algoritmo seja capaz de produzir uma busca randômica adequada sobre o espaço de soluções.

otimização (mais especificamente o algoritmo *NSGA II*). O item seguinte apresenta alguns detalhes sobre os conceitos envolvidos.

6.6 Algoritmos Genéticos

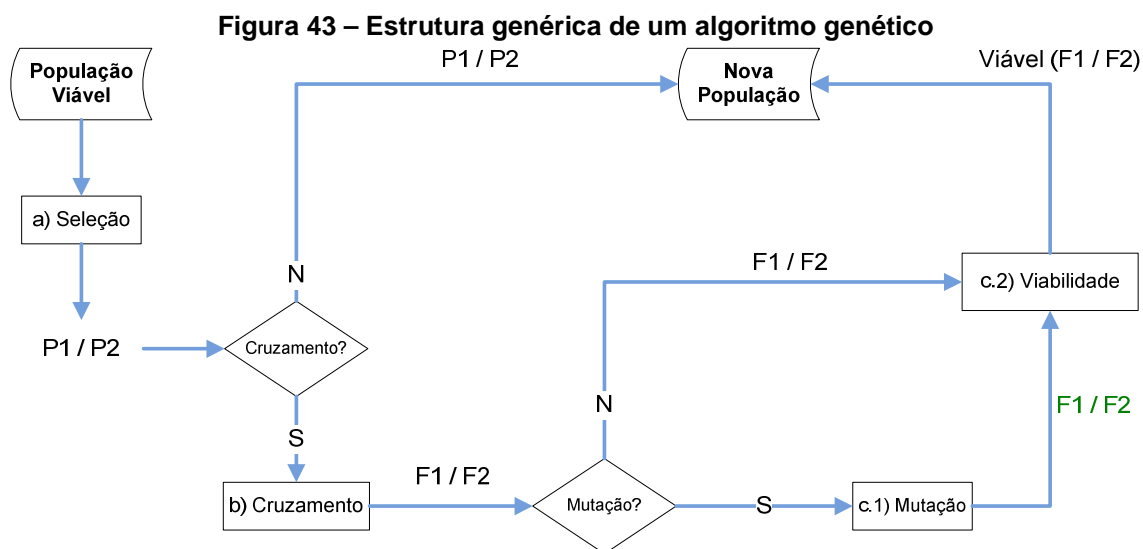
Algoritmos Genéticos podem ser definidos como rotinas heurísticas que tentam replicar o processo de seleção natural. Suas origens remontam aos trabalhos pioneiros de Holland [41] e Goldberg [42], posteriormente ampliados por inúmeros autores. Eles têm sido geralmente utilizados em problemas de busca e otimização, além de outras aplicações em ciência da computação [42] [43] [44].

Em termos biológicos, o processo de seleção natural exige a ocorrência de três condições: replicação, variação (mutação) e aptidão diferencial (competição) [45]. A estrutura genérica de um GA, adaptada de [44] e fornecida a seguir, evidencia como tais condições são reproduzidas pelo algoritmo genético:

1. Gere aleatoriamente uma população inicial P , composta por N "indivíduos" viáveis¹³⁹ (soluções candidatas).
2. Avalie o desempenho (*fitness*) de cada um dos N indivíduos (função objetivo).
3. **Repita** até que seja obtida uma população Q , composta por M "indivíduos" viáveis
 - a. Selecione um par de indivíduos de P . A probabilidade de seleção de um indivíduo para cruzamento deve ser tanto maior quanto maior o seu *fitness*.
 - b. Com uma dada probabilidade de cruzamento (p_c) realize o cruzamento do par de indivíduos (pais) para formar um par de novos indivíduos (prole). Se não houver cruzamento, o par de indivíduos é copiado (prole = pais).
 - c. Realize a mutação da prole com uma dada probabilidade de mutação (p_m), teste sua viabilidade e armazene os dois novos indivíduos, se viáveis, na população Q .
4. Substitua a população corrente pela nova população ($P \leftarrow Q$).
5. Se a condição de parada não for atendida, retorne à etapa 2

¹³⁹ Alternativamente, uma população inicial não composta inteiramente por indivíduos viáveis poderia ser utilizada. Nesse caso, em tese, a convergência poderia ser retardada, mas haveria a vantagem de que determinadas combinações que produzem bons "fenótipos" (valores da função objetivo) seriam preservadas no "pool gênico" (valores das variáveis). Combinações que, inicialmente, conduzem a indivíduos inviáveis podem no limite se reagrupar, gerando indivíduos viáveis, e se tornar evolutivamente estáveis, conforme as diversas seleções/cruzamentos/mutações ocorram e a convergência seja gradualmente alcançada.

O processo descrito é retratado graficamente (Figura 43).



Fonte: [35]

Há diversas implementações para o GA's disponíveis na literatura especializada. Formulações de GA "clássicas", i.e. próximas à estrutura genérica anteriormente apresentada, estão disponíveis em [42] e [44].

Tais formulações, quando aplicadas a problemas de otimização multiobjetivo (*Multi-objective Optimization Problem - MOP's*), geralmente calculam o *fitness* dos indivíduos (soluções candidatas) pela soma do valor das funções objetivo normalizadas. Pesos variáveis podem ser atribuídos a cada um dos objetivos (é possível, assim, priorizar determinado objetivo em relação a outro).

A seleção para cruzamento é geralmente realizada por "roleta enviesada" [44]. Ou seja, indivíduos de maior *fitness* têm maiores chances de serem escolhidos para a reprodução. No cruzamento, características de ambos os "pais" são passadas aos "filhos" por meio de uma operação semelhante à que ocorre em organismos de reprodução sexuada (*crossover*).

Probabilidades de cruzamento e mutação costumam ser estabelecidas e o teste de viabilidade dos "filhos" consiste na verificação do atendimento das restrições de projeto impostas.

Além disso, de forma a preservar as melhores soluções de cada geração, percentuais de elitismo¹⁴⁰ podem ser aplicados, o que tende a manter as melhores soluções entre gerações sucessivas (i.e. os melhores indivíduos da geração atual são copiados para a geração seguinte). O critério de parada pode, entre outros, estar relacionado a um parâmetro de convergência ou de número máximo de gerações.

A formulação do *NSGA II* [46] apresenta diferenças quanto ao critério de seleção para cruzamento e preservação do elitismo. Seus mecanismos de funcionamento são resumidamente expostos no item 6.6.1.

Em ambas as formulações ("clássica" e *NSGA II*), a condição de replicação é assegurada pela própria estrutura dos *GA*'s (proles geradas a partir dos pais). A condição de variação é assegurada por um operador de mutação e, indiretamente, pela própria estrutura de cruzamento adotada (*crossover*). A condição de aptidão diferenciada é garantida por meio das restrições (pressão de seleção por eliminação de indivíduos inviáveis) e pela seleção para cruzamento com base no desempenho dos indivíduos (pressão de seleção por meio de probabilidade de cruzamento associada ao *fitness*).

6.6.1 O *NSGA II*

O *NSGA II* (*Non Dominating Sorting Genetic Algorithm*) foi proposto por Deb et al. em 2002 [46]. Nessa formulação, a seleção para cruzamento é feita com base no grau de dominância das soluções e, subsidiariamente, por um operador de diversidade ("distância de agrupamento"). Seu funcionamento é resumido nos parágrafos seguintes.

Primeiramente, antes da descrição do algoritmo, o conceito de dominância deve ser enunciado. Um dado indivíduo x_1 dominará um indivíduo x_2 se:

$$\forall i: f_i(x_1) \leq f_i(x_2)$$

$$\exists i: f_i(x_1) < f_i(x_2)$$

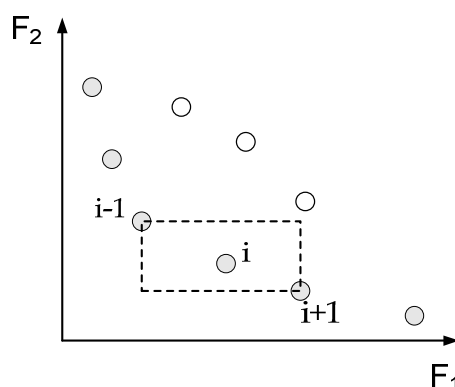
¹⁴⁰ Trata-se de uma técnica de seleção dos indivíduos com melhor *fitness* de uma dada geração e sua cópia, sem alterações, para a geração seguinte. Em geral, na formulação clássica, estabelece-se um percentual de indivíduos que serão mantidos entre gerações sucessivas. Esta técnica permite que boas soluções não sejam perdidas, devido ao cruzamento e à mutação, ao longo das gerações.

Ou seja, para todos os objetivos “ i ” considerados, x_1 tem, ao menos, desempenho igual ao de x_2 . Além disso, há pelo menos um objetivo “ i ” para o qual x_1 tem desempenho melhor que o de x_2 . O equacionamento acima é estabelecido para um problema de minimização dos objetivos, mas o conceito é igualmente aplicável a um problema de maximização pela mera variação do operador de comparação. Se x_1 preservar a relação de dominância em relação aos demais indivíduos de sua população, diz-se que x_1 é uma solução não dominada.

O *NSGA II* também utiliza um parâmetro de “distância de agrupamento” (*crowding distance*) cuja definição não será rigorosamente estabelecida aqui. Entretanto, em termos simplificados, a distância de agrupamento atua como um indicador de “isolamento” de dada solução em relação às outras. Soluções com distância de agrupamento maior tendem a estar situadas em regiões menos densamente povoadas do espaço vetorial definido pelas funções objetivo.

Como será posteriormente explicado, a distância de agrupamento desempenha um importante papel na preservação da diversidade das soluções obtidas por meio do *NSGA II*. Nesta formulação, o *fitness* e a preservação dos indivíduos estão ligados à dominância e à distância de agrupamento. Indivíduos “não dominados” e “distantes” entre si têm maior probabilidade de serem selecionados para a reprodução e serem mantidos na geração subsequente (Figura 44).

Figura 44 – Fronteira de indivíduos não dominados e distância de agrupamento



Fonte: adaptado [46]

A Figura 44 exemplifica um problema de minimização a dois objetivos. Os indivíduos não dominados dentre as soluções (pontos preenchidos) formam um “*front*”. Dentro de um *front*, as distâncias de agrupamento são calculadas como a soma dos lados do retângulo representado nesta figura.

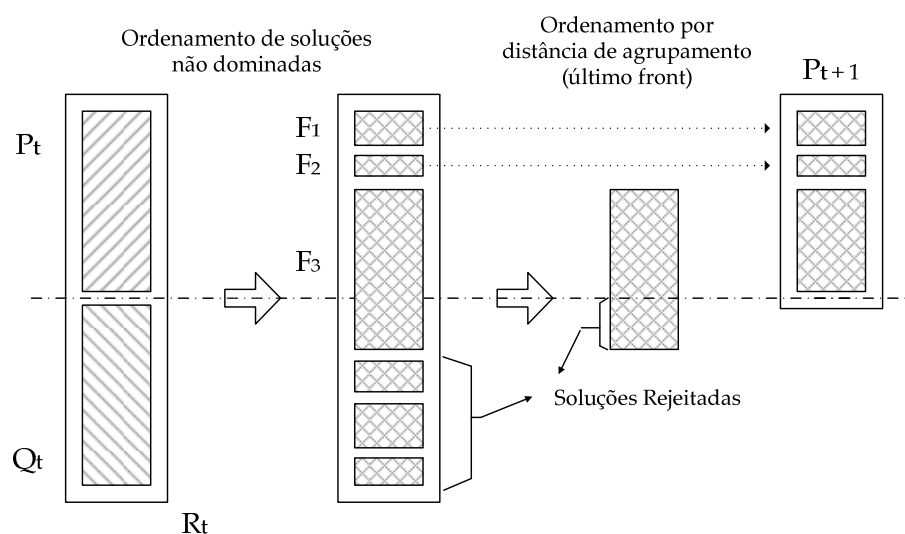
Dada uma população inicial viável, a formulação ordena os N indivíduos da população atual P , de acordo com seu grau de dominância, em *fronts*. Indivíduos dentro de um mesmo *front* têm mesmo grau de dominância e, conseqüentemente, não dominam uns aos outros. Os *fronts* recebem uma numeração (1, 2, 3...). Dessa forma, os indivíduos pertencentes ao *front* de número K dominam todos os indivíduos pertencentes aos *fronts* cujo número é maior que K . A seleção para cruzamento é realizada pelo sorteio aleatório de dois indivíduos componentes de P . Se os indivíduos pertencem a *fronts* diferentes, o indivíduo do *front* com número menor é escolhido.

Se indivíduos do mesmo *front* são escolhidos, o primeiro indivíduo é selecionado. Um par de pais é assim selecionado e cruzado, gerando dois filhos. Os filhos são testados quanto a sua viabilidade e armazenados, até que o tamanho desejado da nova população Q (M indivíduos) seja atingido. Este processo inicial é relativamente semelhante ao algoritmo clássico, os passos posteriores é que diferenciam o *NSGA II* e são responsáveis por muitas das vantagens dessa formulação.

De forma a manter o elitismo, uma nova população R (de tamanho $N+M$) é gerada da união entre P e Q . A população R é então ordenada em *fronts*. Este ordenamento, envolvendo a geração de pais e a prole (P e Q), garante que o elitismo seja preservado (os melhores indivíduos, sejam pais ou filhos, tendem a se preservar entre gerações sucessivas).

O passo seguinte consiste na obtenção da nova população P (geração seguinte). Ela é feita por meio do armazenamento direto dos *fronts* sucessivos de R , até que o tamanho desejado seja atingido. Haverá muito provavelmente um *front* de corte, cujos elementos não serão todos incorporados a P . Esse *front* de corte é então ordenado pela distância de agrupamento (da maior para a menor). Dessa forma, a diversidade das soluções é preservada uma vez que soluções muito próximas umas das outras, pertencentes ao *front* de corte, tenderão a ser descartadas em detrimento das soluções com maior distância de agrupamento (Figura 45).

Figura 45 – Dinâmica do NSGA II



Fonte: [35]

6.6.2 Exemplo de aplicação (GA "clássico" x NSGA II)

Quando aplicados a um mesmo *MOP*, pode haver diferenças consideráveis entre os resultados obtidos pelo GA "clássico" e pelo *NSGA II*. De forma a ilustrar tais diferenças, um exemplo de aplicação originalmente publicado em [35] é brevemente discutido.

Para um submarino convencional hipotético em operação submersa, o problema proposto consiste em maximizar a área de conveses (A_{total}) e minimizar a parcela de resistência ao avanço devida ao casco. Para tanto é adotada uma velocidade constante na análise, de forma que a eq. (8) se reduz à forma $R_{av} = K(WS)C_t$, com K constante. Isso permite reduzir a minimização de R_{av} à tarefa de minimizar um Fator de Resistência ao Avanço (F_{av}), cuja equação é $F_{av} = (WS)C_t$. Como se trata de operação submersa, a parcela C_w , componente de C_t , é nula. As soluções são limitadas por uma restrição de máximo deslocamento de superfície.

Os objetivos são claramente conflitantes, uma vez que a tentativa de maximização da área de conveses conduzirá a soluções de maior deslocamento e a tentativa de minimização da resistência ao avanço caminha em sentido inverso.

Ambas as formulações (GA "clássico" e *NSGA II*) são aplicadas a uma população inicial (P_1) de tamanho N , gerada aleatoriamente, e composta em sua totalidade por indivíduos viáveis (i.e. que obedecem às restrições dos limites das variáveis de projeto e do valor máximo para $\Delta\uparrow$). Maiores detalhes da implementação

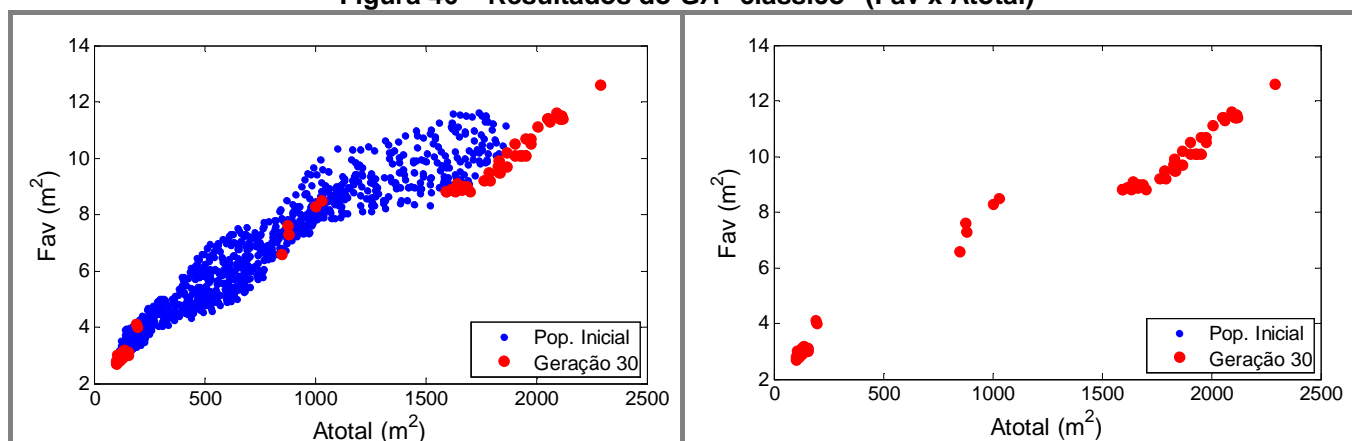
e formulações usadas estão disponíveis em [35]. Para a presente discussão, é suficiente analisar os resultados obtidos pela formulação "clássica" (Figura 46) e pelo *NSGA II* (Figura 47).

As populações finais obtidas foram filtradas para eliminar "clones" (soluções com variáveis idênticas ou muito próximas). Dessa forma, o número de indivíduos na população final filtrada (P_f) é menor que na inicial (P_1). Um percentual de perda de diversidade é definido como $(1 - P_f/P_1)*100$. Observou-se que o GA "clássico" apresentou considerável perda de diversidade e maior tempo de processamento. Parte dessa perda de diversidade se deve à maior tendência de formação de clones pela formulação "clássica" (já que não há nela um operador capaz de avaliar o agrupamento das soluções).

Os valores dos objetivos ficaram próximos em ambas as formulações, embora o *NSGA II* tenha apresentado uma média de valores mais próxima ao "centro" dos valores dos objetivos, o que é reflexo da melhor distribuição das soluções obtidas. As figuras retratam as populações iniciais geradas pelo GA "clássico" e pelo *NSGA II*, bem como as populações finais obtidas.

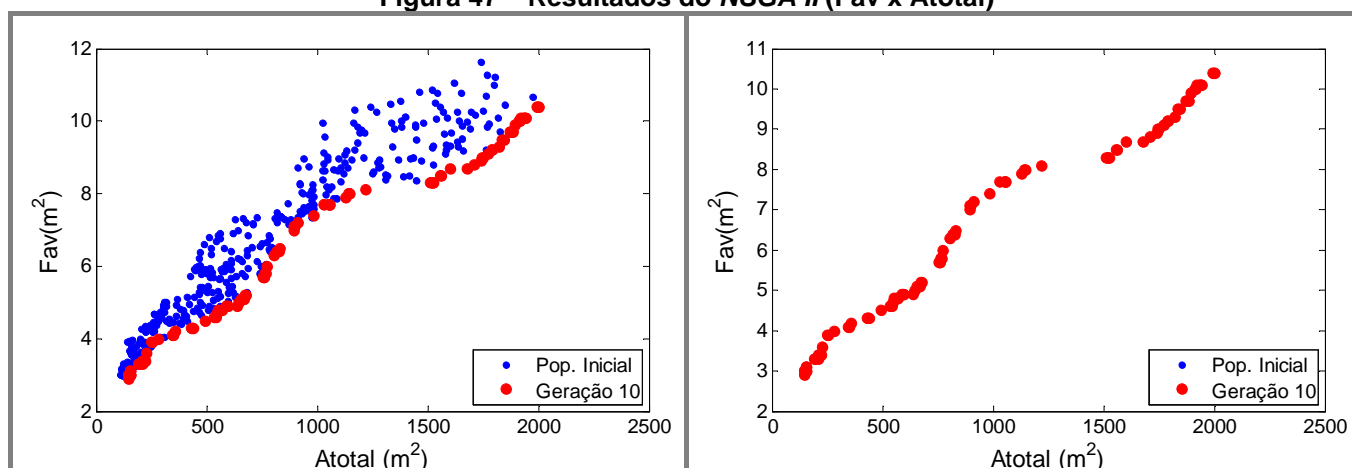
No GA "clássico", é clara a formação de dois nichos de indivíduos (um situado na região de resistência mínima e outro situado na região de máxima área de conveses). Não ocorreu a formação de uma Fronteira de Pareto bem definida, visto que nas regiões dos nichos observam-se soluções dominadas e não dominadas aparecendo em grupo. É notória a perda de diversidade na região central do espaço de soluções (onde se situam os valores médios de resistência ao avanço e área de conveses) (Figura 46). Já o *NSGA II* foi efetivo em isolar a Fronteira de Pareto e manter uma diversidade adequada ao longo de todo o espaço de projeto (Figura 47).

Figura 46 – Resultados do GA "clássico" (Fav x Atotal)



Fonte: [35]

Figura 47 – Resultados do NSGA II (Fav x Atotal)



Fonte: [35]

Embora seja possível melhorar a formulação "clássica" por meio da introdução de rotinas específicas [43] [47], os resultados do NSGA II são superiores para os propósitos considerados, uma vez que ocorreu a identificação clara da fronteira de soluções não dominadas e a preservação de diversidade adequada ao longo de seu perímetro (i.e. não houve perda de soluções não dominadas).

(página deixada intencionalmente em branco)

7 MODELO DE SÍNTESE

It must nevertheless be appreciated that the successful outcome of a submarine design is ultimately achieved by extensive detailed study of every aspect of design. It is only by detailed studies that the multitude of interaction effects can be identified and resolved. However, such studies have to be conducted within a framework which adequately defines the total design and that is the purpose of the concept design phase. The objective is to determine a size and weight plus geometric configuration within which the detailed studies (often conducted by specialist designers) can take place¹⁴¹.

R. Burcher e L. Rydill

Este capítulo descreve o modelo de síntese adotado para a condução deste trabalho.

7.1 Considerações preliminares

Segundo Andrade [48], para que o problema de projeto possa ser enunciado como um problema de otimização é fundamental a elaboração de um modelo de síntese apropriado. Nas palavras do autor:

“A condição essencial para formular um problema de projeto como um problema de otimização é, inicialmente, estruturá-lo de modo que o mesmo possa ser representado adequadamente através de modelos matemáticos de síntese. Em outras palavras, é necessário identificar as variáveis, definir as funções que permitem avaliar os atributos necessários e definir, também, as funções que permitem

¹⁴¹ Deve, contudo, ser ressaltado que o êxito do projeto de um submarino é, em última instância, alcançado por extenso e detalhado estudo de todos os aspectos do projeto. Somente através desses estudos detalhados uma infinidade de efeitos de interação pode ser identificada e solucionada. Entretanto, esses estudos devem ser realizados dentro de uma moldura que defina adequadamente o projeto em totalidade e é esse [estabelecer tal moldura] o propósito do Projeto de Concepção. O objetivo é determinar as dimensões e pesos, além da configuração geométrica, a partir dos quais os estudos detalhados (frequentemente conduzidos por especialistas) podem tomar lugar (Tradução livre).

verificar o atendimento às metas, objetivos e restrições considerados. Esta representação ou modelo de síntese, para levar a resultados adequados, deve, tanto quanto possível, considerar todas as características ou especificações necessárias para uma avaliação razoável do mérito das soluções."

Assim, o modelo deve indicar claramente as variáveis de projeto consideradas (cujos limites delimitarão o espaço de soluções a ser explorado) e possuir formulações que, em termos das variáveis expressas, permitam avaliar os atributos de interesse e o atendimento das restrições vigentes. Com base nessas considerações, os itens seguintes expõem o modelo de síntese elaborado para esta dissertação.

7.2 Variáveis de projeto e parâmetros globais do modelo

As variáveis de projeto¹⁴² utilizadas para descrever uma solução candidata são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Variáveis de projeto

(continua)

Categoria	Variável	Descrição	Intervalo/Obs.
Geometria	D	diâmetro do submarino [m]	6,0 – 10,0; inc. = 0,1 m
	L	comprimento do submarino [m]	60 - 100; inc. = 0,1 m
	n _a	fator de forma AR	2,0 - 4,0; inc. = 0,1
	n _f	fator de forma AV	2,0 - 4,0; inc. = 0,1
	sail	configuração da vela	1 - 4
Propulsão	BAT	bateria	1 - 3
	DG	Diesel-Gerador	1 - 3
	MEP	Motor Elétrico de Propulsão	1 - 4
	n _{cell}	número de células de bateria	2 x 180 ou 2 x 220

¹⁴² Ver Apêndice F para descrição mais detalhada dos itens de propulsão, *payload* e armamento.

Tabela 8– Variáveis de projeto

(conclusão)

Categoria	Variável	Descrição	Intervalo/Obs.
Propulsão	n_{DG}	número de DG's	2/4
<i>Payload</i>	CA	sonar cilíndrico	1 - 3
	COM	sistema de comunicações	1 - 3
	DA	sonar distribuído	1/2
	EW	sistema MAGE	1 - 3
	FTA	sonar de flanco/rebocado	1 - 3
	MOA	sonar de detecção de minas	1/2
	OPT	mastro optrônico	1 - 2
	PM	sistema integrado de gerenciamento da plataforma	1 - 3
	RD	radar	1 - 3
	SAT	sistema de comunicações satélite	1/2
Armamento	n_{rlt}	número de torpedos a bordo (exceto em tubos)	8/12/16/18
	n_{wlt}	número de tubos lançadores de armas	4/6/8
Tripulação	C_{man}	coeficiente de automação do submarino	0,5 – 1,0 inc. = 0,1
	N_{esp}	número de membros de forças especiais	6/9/12
Desempenho militar	MOD	profundidade de operação [m]	200 – 400 inc. = 10 m
	T_{pat}	tempo de patrulha [dias]	30/40/50

Os parâmetros globais do modelo são indicados na Tabela 9. Eles são derivados a partir da análise dos Requisitos de Estado Maior (Apêndice B) ou definidos a partir de critérios técnicos específicos. Os parâmetros locais do modelo são descritos e quantificados, por módulos individuais, no item 7.3.

Tabela 9 – Parâmetros globais do modelo

Categoria	Variável	Descrição	Valor/Obs.
Arquitetura Naval	ROB	reserva de fluutuabilidade [% $\Delta\uparrow$]	10%
Tripulação	NO	número de oficiais (incluindo o comandante)	6
Desempenho Militar	IR _{max}	taxa de indiscrição máxima	12%
	S _{veloc}	velocidade de trânsito [kt] ¹⁴³	8
	T _{trans}	tempo de trânsito ate a área de operações [dias]	10
	X _{veloc}	velocidade de patrulha [kt]	4

7.3 Módulos do modelo de síntese

Os módulos que compõem o modelo de síntese são:

- Tempo de comissão e quantidade de combustível;
- Definição geométrica - casco externo e casco resistente;
- Tripulação;
- Volumes e Deslocamento;
- Volumes de tanques e pesos de fluidos associados;
- Carga Hotel;
- Grupos de pesos;
- Resistência ao avanço e potência;
- Raio de ação, alcances e taxa de indiscrição;
- Manobrabilidade;
- Custos.

Muitas das equações adotadas (algumas com adaptações) constam nas referências [34] [3] [49] [4]. Outras foram derivadas a partir de modelos analíticos elementares e/ou análise de informações e arranjos de submarinos reais disponíveis em literatura aberta. O modelo proposto tem grau de precisão compatível com os propósitos deste trabalho. Os itens seguintes descrevem os módulos.

¹⁴³ Obviamente, em algumas das equações do modelo de síntese, a velocidade deve ser expressa em unidades S.I [m/s]. A própria forma da equação deve tornar evidente ao leitor em que casos o valor em nós deve ser, ou não, convertido.

7.3.1 Tempo de comissão e quantidade de combustível

A análise do cenário base que se estipula para a missão permite derivar, a partir da variável de tempo de patrulha (T_{pat}), o tempo de comissão (T_s). A partir deste dado, a quantidade de combustível necessário pode ser determinada.

Inicialmente, considera-se que a comissão será cumprida sob a máxima taxa de indiscrição permitida (i.e. uma abordagem conservadora); conhecidas a potência instalada (dos DG's) e tomando como base uma taxa de consumo específica de combustível (*specific fuel consumption - SFC*) é possível determinar a quantidade de combustível a ser embarcado. O modelo utilizado aplica uma margem de variação sobre *SFC* (m_{11}) e considera as perdas relativas ao volume de combustível não aspirável (k_{11}) e perdas por ineficiência na conversão do combustível em energia (η_{conv}).

Por fim, o módulo também calcula a velocidade em trânsito misto, com base na média ponderada entre as velocidades de trânsito e patrulha.

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 10 e o equacionamento utilizado é apresentado na Tabela 11.

Tabela 10 – Tempo de comissão e quantidade de combustível – variáveis e parâmetros

(continua)

Variáveis e parâmetros globais de entrada		
Var.	Definição	Valor
IR_{max}	taxa de indiscrição máxima	entrada
n_{DG}	número de DG's	entrada
P_{inst}	potência instalada (n_{DG} x potência unitária do DG) [kW]	entrada
<i>SFC</i>	taxa de consumo específico de combustível [kg/kW.h]	entrada
S_{veloc}	velocidade de trânsito [kt]	entrada
T_{pat}	tempo de patrulha [dias]	entrada
T_{trans}	tempo de trânsito até a área de operações [dias]	entrada
X_{veloc}	velocidade de patrulha [kt]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
fuel	quantidade de combustível embarcado [t]	saída
T_s	duração da comissão [dias]	saída
v_{mix}	velocidade em transito misto [kt]	saída

Tabela 10 – Tempo de comissão e quantidade de combustível – variáveis e parâmetros

(conclusão)

Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
η_{conv}	eficiência de conversão do combustível	0,85
k_{11}	fator de volume de combustível não aspirável	0,95
m_{11}	margem sobre <i>SFC</i>	5%

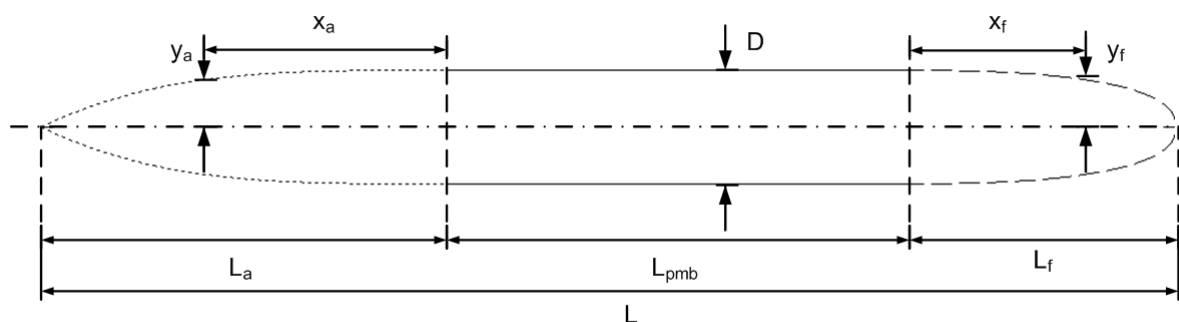
Tabela 11 – Tempo de comissão e quantidade de combustível - equacionamento

Equacionamento	
$T_s = 2T_{\text{trans}} + T_{\text{pat}}$	eq. (16a)
$\text{fuel} = \frac{24T_s IR_{\text{max}} P_{\text{inst}} SFC(1+m_{11})}{1000k_{11}\eta_{\text{conv}}}$	eq. (16b)
$V_{\text{mix}} = \frac{2T_{\text{trans}} S_{\text{veloc}} + T_{\text{pat}} X_{\text{veloc}}}{T_s}$	eq. (16c)

7.3.2 Definição geométrica do navio – casco externo e casco resistente

O modelo adotado para a definição do casco externo hidrodinâmico consta em [49]. Neste modelo, o casco hidrodinâmico é dividido em três seções; a seção de ré (AR), o corpo paralelo médio (CPM) e a seção de vante (AV). Os comprimentos recomendados das seções de ré e de vante são diretamente proporcionais ao diâmetro.

Figura 48 – Geometria do casco externo



Fonte: autor (baseado em [49])

A partir do comprimento total do navio, o comprimento do corpo paralelo médio pode ser obtido de imediato. As alturas de meia baliza, de ré e vante, são definidas em função do diâmetro do submarino, dos parâmetros de forma (n_a e n_f) e das coordenadas longitudinais (x_a e x_f) medidas a partir de referenciais específicos (Figura 48). As meias balizas ao longo do CPM têm altura igual ao raio do submarino.

O volume de envelope do casco externo (V_{env}), ou seja, o volume deslocado pelo contorno externo do sólido de revolução apresentado na Figura 48, é obtido a partir do diâmetro (D), do comprimento (L) e dos coeficientes prismáticos (i.e. a relação entre o volume de certa porção do casco e o do trecho cilíndrico que a circunscreve longitudinalmente) – coeficientes C_{pa} e C_{pf} .

A superfície molhada do casco (WS) pode ser obtida a partir de D , L e dos coeficientes prismáticos de área (i.e. a relação entre a área de certa porção do casco e a do trecho cilíndrico que a circunscreve longitudinalmente) – coeficientes C_{wsa} e C_{wsf} .

No modelo computacional implementado neste trabalho, os coeficientes prismáticos são determinados por procedimentos que envolvem integração numérica¹⁴⁴ e a resolução das equações eq.(17h) e (17j). No caso de cálculos manuais, as tabelas apresentadas no Apêndice G permitem a obtenção de valores aproximados para $K1$ e $K2$.

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 12 e o equacionamento utilizado é apresentado na Tabela 13.

Tabela 12 – Definição geométrica do casco externo - variáveis e parâmetros

(continua)

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
D	diâmetro do submarino [m]	entrada
L	comprimento do submarino [m]	entrada
n_a	fator de forma AR	entrada
n_f	fator de forma AV	entrada

¹⁴⁴ Naturalmente, em decorrência da própria definição dos coeficientes e da geometria do casco no CPM, essa integração só é necessária para os trechos AR e AV, já que na região cilíndrica os coeficientes terão valor unitário.

Tabela 12 – Definição geométrica do casco externo - variáveis e parâmetros

(conclusão)

Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
K2	fator de área molhada	saída
V _{env}	volume de envelope do casco externo [m ³]	saída
WS	área molhada do casco externo [m ²]	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
--X--	--X--	--X--

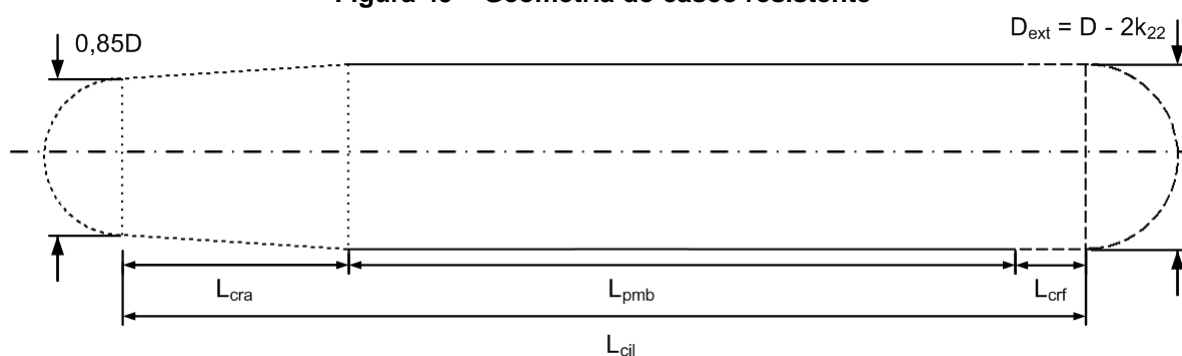
Tabela 13 – Definição geométrica do casco externo - equacionamento

Equacionamento		Legenda/Comentários
$L_a = 3,6D$	eq. (17a)	L _a = comprimento da seção de ré [m]
$L_f = 2,4D$	eq. (17b)	L _f = comprimento da seção de vante [m]
$L_{pmb} = L - (L_a + L_f)$	eq. (17c)	L _{pmb} = comprimento do corpo paralelo médio [m]
$y_a = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_a}{L_a} \right)^{n_a} \right]$	eq. (17d)	y _a = altura de meia baliza da seção de ré [m]
$y_f = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_f}{L_f} \right)^{n_f} \right]^{(1/n_f)}$	eq. (17e)	x _a = abscissa da meia baliza [m]
$y_{pmb} = \frac{D}{2}$	eq. (17f)	y _f = altura de meia baliza da seção de vante [m]
$V_{env} = \frac{\pi}{4} D^3 (L/D - K_1)$	eq. (17g)	x _f = abscissa da meia baliza [m]
$K_1 = 6 - 2,4C_{pf} - 3,6C_{pa}$	eq. (17h)	y _{pmb} = altura de meia baliza no CPM [m]
$WS = \pi D^2 (L/D - K_2)$	eq. (17i)	C _{pf} = coeficiente prismático AV
$K_2 = 6 - 2,4C_{wsf} - 3,6C_{wsa}$	eq. (17j)	C _{pa} = coeficiente prismático AR
		K1 = fator de volume
		C _{wsf} = coeficiente prismático de área AV
		C _{wsa} = coeficiente prismático de área AR
		K2 = fator de área molhada

A geometria do casco resistente (interno) é obtida por meio de uma formulação simplificada, compatível com o modelo anterior.

O casco resistente (CR) é admitido como sendo um cilindro com calotas de fechamento hemisféricas (as partes cônicas representadas na Figura 49 são desconsideradas para o cálculo de volume). As calotas são consideradas como possuindo raio igual ao raio do submarino¹⁴⁵ e a parte cilíndrica do CR tem comprimento igual ao do corpo paralelo médio (L_{pmb}), acrescido de comprimentos que se estendem na direção das regiões de vante (parabólica) e de ré (elipsoidal) do submarino – respectivamente, L_{cra} e L_{crf} .

Figura 49 – Geometria do casco resistente



Fonte: autor

A determinação desses comprimentos é feita da seguinte maneira. Assume-se que, na modelagem final do CR, seu diâmetro na extremidade de ré do trecho cônico (D^*) será equivalente a 0,85% do diâmetro do submarino (Figura 49). Admita-se ainda que, por questões ligadas à fabricação e união dos cascos, haverá certo espaço entre D^* e o casco externo (expresso pelo dobro do fator k_{21}). Assim, pela manipulação da eq.(17d), L_{cra} pode ser obtido¹⁴⁶.

Na região de vante, assume-se que o CR se estenderá até que a diferença entre D e o diâmetro do casco externo seja superior a certo valor (o dobro de k_{22}). Daí, pela manipulação da eq.(17e), obtém-se L_{crf} .

¹⁴⁵ Em geral, a calota é construída em partes separadas (“gomos” ou “pétalas”), que são conformadas individualmente e posteriormente soldadas para formar a calota completa. Deve-se ressaltar que, na prática, o processo construtivo impõe limitações ao diâmetro máximo que a calota pode ter. Eventual limitação dessa natureza (e.g. diâmetro máximo menor que 10 metros) não invalidaria a abordagem proposta, podendo ser contornada pela adoção de uma transição cônica na região de vante do CR, com diâmetro menor compatível com o máximo diâmetro admitido para a calota hemisférica.

¹⁴⁶ Observe que a equação obtida, eq.(18a), é válida apenas para $D \geq 2,67m$.

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 14 e o equacionamento utilizado é apresentado na Tabela 15.

Tabela 14 – Definição geométrica do casco resistente - variáveis e parâmetros

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
D	diâmetro do submarino [m]	entrada
L	comprimento do submarino [m]	entrada
n _a	fator de forma AR	entrada
n _f	fator de forma AV	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
L _{cil}	comprimento assumido do trecho cilíndrico do CR [m]	saída
V _{cr}	volume estimado do CR [m ³]	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
k ₂₁	diferença entre o diâmetro externo e D* [m]	0.2
k ₂₂	diferença entre D e o diâmetro externo [m]	0.1

Tabela 15 – Definição geométrica do casco resistente - equacionamento

Equacionamento	Legenda/Comentários
$L_{cra} = 3,6D \left[0,15 - \frac{2}{D} k_{21} \right]^{(1/n_a)}$	eq. (18a) L _{cra} = comprimento do CR AR [m]
$L_{pmb} = L - 6D$	eq. (18b) L _{pmb} = comprimento do corpo paralelo médio [m]
$aux_1 = \left(1 - \frac{2}{D} k_{22} \right)^{n_f}$	eq. (18c) aux ₁ = variável auxiliar
$L_{crf} = 2,4D \left[1 - aux_1 \right]^{(1/n_f)}$	eq. (18d) L _{crf} = comprimento do CR AV [m]
$L_{cil} = L_{cra} + L_{pmb} + L_{crf}$	eq. (18e) L _{cil} = comprimento assumido do trecho cilíndrico do CR [m]
$aux_2 = \frac{\pi}{4} D^3 (L_{cil}/D + 2/3)$	eq. (18f) aux ₂ = variável auxiliar
$V_{cr} = 0,95aux_2$	eq. (18g)

7.3.3 Tripulação

A tripulação do submarino é composta de certo número de oficiais (NO), que inclui o comandante, e de praças (NE). No caso de NE, um fator de automação (C_{man}), que reflete a redução na demanda por pessoal decorrente de automação do navio, é empregado. O número de integrantes de equipes de Operações Especiais (N_{esp}), embora não componham a tripulação, é também usado em alguns cálculos por outros módulos. Neste trabalho, NO, N_{esp} , e C_{man} são considerados como dados de entrada. O número de praças (NE) é estimado como função de C_{man} , P_{inst} e V_{env} , assumindo o valor inteiro imediatamente superior ao calculado.

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 16 e o equacionamento utilizado é apresentado na Tabela 17.

Tabela 16 – Tripulação – variáveis e parâmetros

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
C_{man}	coeficiente de automação do submarino	entrada
P_{inst}	potência instalada (n_{DG} x potência unitária do DG) [kW]	entrada
V_{env}	volume de envelope do casco externo [m ³]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
NE	número de praças (valor inteiro imediatamente superior ao resultado da fórmula)	saída
NT	número de tripulantes	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
NO	número de oficiais (incluindo o comandante)	6

Tabela 17 – Tripulação - equacionamento

Equacionamento	
$NE = C_{man} \left(\frac{P_{inst}}{150} + \frac{V_{env}}{127} \right)$	eq. (19a)
$NT = NE + NO$	eq.(19b)

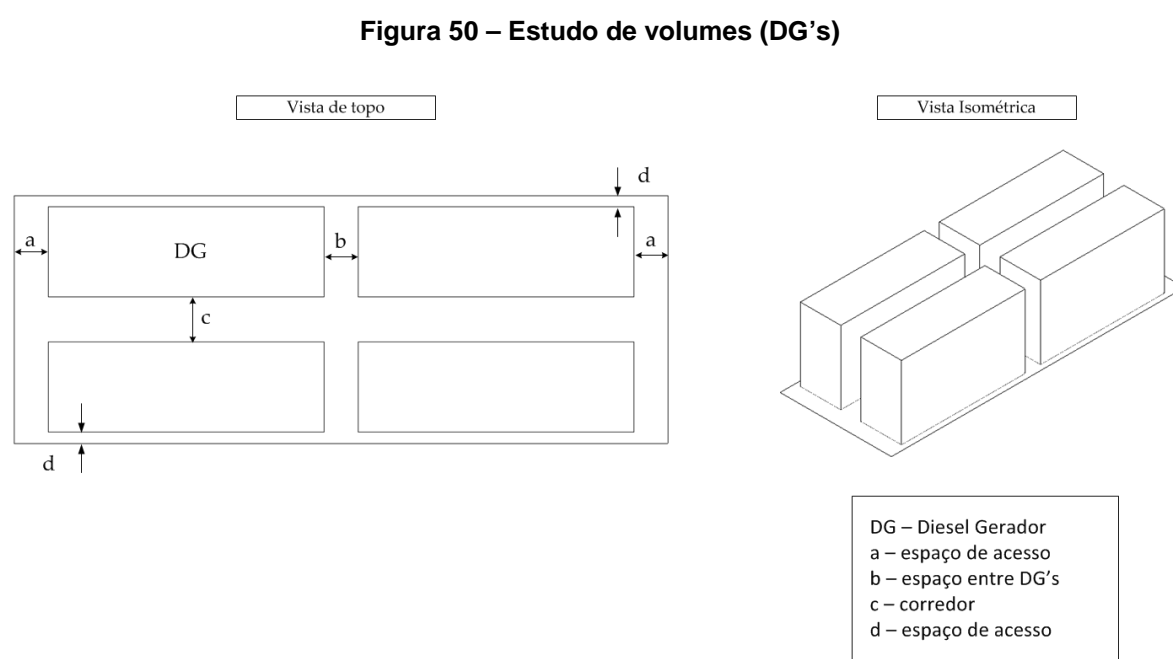
7.3.4 Volumes e Deslocamento

Este módulo calcula:

- O volume de superfície ($\nabla\uparrow$);
- O deslocamento de superfície ($\Delta\uparrow$);
- Os volumes internos.

O volume de superfície ($\nabla\uparrow$) é calculado a partir do volume estimado do CR (V_{cr}). Desse ponto, conhecida a densidade da água do mar (ρ_{sw}), deriva-se o deslocamento de superfície.

A demanda por volume dos diversos itens internos é também calculada¹⁴⁷. Para alguns compartimentos, estudos preliminares de arranjo foram efetuados para derivar os volumes requeridos. A Figura 50 exemplifica um desses estudos (compartimento dos DG's para o caso de quatro motores). As equações respectivas foram formuladas com base nos arranjos analisados.



¹⁴⁷ Kormilitsin e Khalizev [3] destacam que o cálculo de volumes internos dependerá do tipo de informações disponíveis nas etapas iniciais do projeto. Em geral, se há informações sobre os itens de maiores dimensões, é preferível que esses volumes sejam estabelecidos com base em estudos preliminares de arranjo. Quando o nível de detalhe dessas informações não é aprofundado, o uso de índices de volume/percentuais típicos (baseados em projetos anteriores) e equações paramétricas é recomendável. Em alguns casos o volume necessário para determinados compartimentos/funções de plataforma pode ser arbitrado diretamente com base em projetos anteriores. O presente modelo faz uso de todas essas abordagens.

O módulo também calcula o comprimento crítico (L_{stack}) e o diâmetro crítico do submarino (D_{stack}), parâmetros que traduzem as demandas mínimas de espaço linear às quais o CR deverá atender.

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 18 e os equacionamentos utilizados são apresentados da Tabela 19 à Tabela 21.

Tabela 18 – Volume e Deslocamento – variáveis e parâmetros

(continua)

Variáveis e parâmetros globais de entrada		
Var.	Definição	Valor
D	diâmetro do submarino [m]	entrada
D_{wep}	diâmetro das armas (torpedos, mísseis e minas) [m]	entrada
$[L B h]_{DG}$	dimensões dos DG's [m]	entrada
$[L B h]_{bat}$	dimensões das células de baterias [m]	entrada
$[L D]_{MEP}$	dimensões do MEP [m]	entrada
L_{wep}	comprimento das armas (torpedos, mísseis e minas) [m]	entrada
NE	número de praças (valor inteiro imediatamente superior ao resultado da fórmula)	entrada
N_{esp}	número de membros de forças especiais	entrada
n_{cell}	número de células de baterias	entrada
n_{gab}	número de gabinetes dos itens de <i>payload</i>	entrada
n_{rlt}	número de torpedos a bordo (exceto em tubos)	entrada
n_{wlt}	número de tubos lançadores de armas	entrada
NT	número de tripulantes	entrada
ROB	reserva de flutuabilidade [% Δ^{\uparrow}]	entrada
T_s	duração da comissão [dias]	entrada
V_{cr}	volume estimado do CR [m ³]	entrada
V_{pay}	demandas específicas de volume dos itens de <i>payload</i> [m ³]	entrada
V_{env}	volume de envelope do casco externo [m ³]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
Δ^{\uparrow}	deslocamento de superfície [t]	saída
∇^{\uparrow}	volume de superfície [m ³]	saída
V_{MBT}	volume dos tanques de lastro [m ³]	saída

Tabela 18 – Volume e Deslocamento – variáveis e parâmetros

(conclusão)

Variáveis de saída		
Definição	Valor	
D _{stack}	diâmetro crítico [m]	saída
L _{stack}	comprimento crítico [m]	saída
V _{int}	vetor com demanda de volumes internos [m ³] agrupa [V _{MEP} V _{gab} V _{DC} V _{pay} V _{hab} V _{aux} V _{bat} V _{wep}]	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
ρ_{sw}	densidade da água do mar [t/m ³]	1,025
[a b c d]	espaços de acesso e manutenção [m]	[0,5 0,6 0,8 0,2]
A _{cont}	área de convés para o compartimento do comando [m ²]	40
H _{DK}	altura entre conveses [m]	2,5
k ₃₁	área de convés por tripulante – comandante [m ²]	5
k ₃₂	área de convés por tripulante – oficiais [m ²]	3
k ₃₃	área de convés por tripulante – praças [m ²]	2
k ₃₄	área de convés por tripulante – comandos [m ²]	1
k ₃₅	área de convés por gabinete [m ²]	1,8
k ₃₆	fator de perda de volume útil nos tanques (estruturas)	0,95
[l b h] _{inv}	dimensões dos inversores do MEP [m]	2,5 x 0,9 x 1,7
NO	número de oficiais (incluindo o comandante)	6

Tabela 19 – Volumes externos e deslocamento - equacionamento

Equacionamento	Legenda/Comentários
$V_{app} = 0,05V_{cr}$ eq. (20a)	V_{app} = Volume de apêndices [m ³]
$\nabla \uparrow = V_{cr} + V_{app}$ eq. (20b)	
$V_{mbt} = ROB \frac{\nabla \uparrow}{k_{36}}$ eq. (20c)	
$\Delta \uparrow = \rho \nabla \uparrow$ eq. (20d)	

Tabela 20 – Volumes internos - equacionamento

Equacionamento		Legenda/Comentários
$L_1 = 3L_{MEP}$	eq. (21a)	L_1 = comprimento do comp. do MEP [m]
$V_{MEP} = 2\pi L_{MEP} D_{MEP}^2$	eq. (21b)	V_{MEP} = volume do comp. do MEP [m ³]
$L_2 = a + b + l_{gab}$	eq. (21c)	L_2 = comprimento comp. de gabinetes do MEP [m]
$B_2 = 2(d + b_{gab}) + c$	eq. (21d)	B_2 = largura do comp. de gabinetes do MEP [m]
$V_{gab} = L_2 B_2 H_{DK}$	eq. (21e)	V_{gab} = volume do comp. de gabinetes do MEP [m ³]
$L_3 = \frac{n_{dg}}{2}(a + L_{DG}) + b$	eq. (21f)	L_3 = comprimento do comp. dos DG's [m]
$B_3 = 2(d + B_{DG}) + c$	eq. (21g)	B_3 = largura do comp. dos DG's [m]
$h_3 = 1,25h_{DG}$	eq. (21h)	h_3 = altura do comp. dos DG's [m]
$V_{DG} = L_3 B_3 h_3$	eq. (21i)	V_{DG} = volume do comp. dos DG's [m ³]
$A_{gab} = n_{gab} k_{35}$	eq. (21j)	A_{gab} = demanda de área de convés para gabinetes [m ²]
$A_{sf} = 24 + 0,18NT$	eq. (21k)	A_{sf} = demanda de área de convés para funções de plataforma associadas a <i>payload</i> [m ²]
$V_{pay} = (A_{gab} + A_{sf} + A_{cont})H_{DK} + v_{pay}$	eq. (21l)	V_{pay} = volume total associado a <i>payload</i> [m ³]
$L_4 = \frac{V_{pay}}{2,3DH_{DK}}$	eq. (21m)	L_4 = comprimento total estimado dos compartimentos associados a <i>payload</i> [m]
$A_{lq} = k_{31} + k_{32}(NO - 1) + k_{33}NE + k_{34}N_{esp}$	eq. (21n)	A_{lq} = área de convés para habitáveis [m ²]
$V_{lq} = A_{lq} H_{DK}$	eq. (21o)	V_{lq} = volume para habitáveis [m ³]
$V_{st} = (0,025NT + 0,028)T_s$	eq. (21p)	V_{st} = volume para suprimentos [m ³]
$V_{hab} = V_{lq} + V_{st}$	eq. (21q)	V_{hab} = volume total de habitáveis [m ³]
$L_5 = \frac{V_{hab}}{DH_{DK}}$	eq. (21r)	L_5 = comprimento total estimado dos compartimentos habitáveis [m]
$V_{aux} = 0,1V_{cr} + 0,15H_{DK} NT$	eq. (21s)	V_{aux} = volume das praças de auxiliares [m ³]
$V_{bat} = 2,1n_{cell} L_{bt} B_{bt} h_{bt}$	eq. (21t)	V_{bat} = volume dos compartimentos de bateria [m ³]
$V_{wep} = 10n_{wlt} + 3,1n_{rlt} + L_{wep}(2,7 + 0,29D^2)$	eq. (21u)	V_{wep} = volume do compartimento de torpedos [m ³]
$L_6 = 1,75L_{wep}$	eq. (21v)	L_6 = comprimento do comp. de torpedos [m]

Tabela 21 – Comprimento e diâmetro críticos - equacionamento

Equacionamento		Legenda/Comentários
$D_1 = 2D_{MEP}$	eq. (22a)	D_1 = diâmetro crítico (comp. MEP) [m]
$D_2 = 2h_{bat} + h_3$	eq. (22b)	D_2 = diâmetro crítico (comp. de baterias + comp. DG's) [m]
$D_3 = 2h_{bat} + 6,5D_{wep}$	eq. (22c)	D_3 = diâmetro crítico (comp. de baterias + comp. torpedos) [m]
$D_{stack} = \max_{i=1a3} [D_i]$	eq. (22d)	D_{stack} = diâmetro crítico
$L_{stack} = \sum_{i=1}^6 L_i$	eq. (22e)	L_{stack} = comprimento crítico

7.3.5 Volumes de tanques e peso de fluidos associados

Este módulo calcula a demanda de volume associada aos tanques de bordo e o peso dos fluidos neles armazenados. Neste contexto, são dimensionados os tanques relacionados à propulsão e à manutenção do equilíbrio do navio (i.e. tanques de óleo combustível, óleo lubrificante e tanques de compensação e trim), os relacionados à tripulação (i.e. tanques de aguada e tanque sanitário) e os relacionados à operação do armamento.

Alguns detalhes sobre os cálculos são pertinentes. O volume de tanques de compensação e trim é objeto de análise mais detalhada nas fases posteriores do projeto (i.e. elaboração do polígono de equilíbrio). Entretanto, para a etapa de concepção, pode-se admitir que seu volume é função de $\Delta \hat{\uparrow}$ [4]. Por hipótese, assume-se que no início da comissão metade da capacidade dos tanques esteja ocupada; o que permite derivar o peso da água neles armazenada nessa ocasião. A quantidade de óleo lubrificante para consumo pelos equipamentos de bordo é arbitrada em 1 tonelada. O volume dos tanques de combustível é obtido a partir da quantidade definida com base na eq. (16b). Admite-se que os tanques de aguada possuam capacidade de armazenar água doce para uso e consumo da tripulação por um período igual a 1/5 do total de dias de comissão. Similarmente, o tanque sanitário é capaz de armazenar o total de efluentes produzidos em um dia de operação (admite-se que, após isso, o tanque será esgotado).

Os tanques de operação do armamento são utilizados para:

- Armazenar a água necessária para alagar os tubos de torpedo, imediatamente antes do disparo;

- b) Armazenar a água embarcada, logo após o disparo, para contrabalancear a redução de peso devido ao lançamento do torpedo disparado. Assim, evita-se que tal redução de peso (e respectivo momento) tenha que ser compensada pelo sistema de compensação e trimagem.

O volume desses tanques pode ser admitido como função de w_{wep} , n_{rlt} e n_{wlt} .

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 22 e os equacionamentos utilizados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 22 – Volumes de tanques e pesos associados – variáveis e parâmetros

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
$\Delta\uparrow$	deslocamento de superfície [t]	entrada
fuel	quantidade de combustível embarcado [t]	entrada
n_{rlt}	número de torpedos a bordo (exceto em tubos)	entrada
NT	número de tripulantes	entrada
n_{wlt}	número de tubos lançadores de armas	entrada
T_s	duração da comissão [dias]	entrada
w_{wep}	peso unitário dos torpedos [t]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
V_{tank}	vetor com demanda de volumes de tanques [m ³] agrupa [V_{lo} V_{fuel} V_{ct} V_{wot} V_{fw} V_{sew}]	saída
W_{tank}	vetor com demanda de pesos de fluidos [t] agrupa [W_{lo} fuel W_{ct} W_{wot} W_{fw} W_{sew}]	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
ρ_{fo}	densidade do óleo combustível [t/m ³]	0,890
ρ_{fw}	densidade da água doce [t/m ³]	1,000
ρ_{lo}	densidade do óleo lubrificante [t/m ³]	0,870
ρ_{sw}	densidade da água do mar [t/m ³]	1,025
k_{36}	fator de perda de volume útil nos tanques (estruturas)	0,95
W_{lo}	quantidade de óleo lubrificante embarcado [t]	1

Tabela 23 – Volumes de tanques e pesos associados - equacionamento

Equacionamento		Legenda/Comentários
$V_{lo} = W_{lo} / \rho_{lo}$	eq. (23a)	V_{lo} = volume do tanque de óleo lubrificante [m ³]
$V_{fuel} = fuel / (k_{36} \rho_{fo})$	eq. (23b)	V_{fuel} = volume dos tanques de óleo combustível [m ³]
$V_{ct} = 0,045 \frac{\Delta \uparrow}{\rho_{sw} k_{36}}$	eq. (23c)	V_{ct} = volume dos tanques de compensação e trim [m ³]
$V_{wot} = n_{rlt} \frac{W_{wep}}{\rho_{sw}} + 0,45n_{wlt}$	eq. (23d)	V_{wot} = volume dos tanques de operação do armamento [m ³]
$V_{fw} = \frac{1}{k_{36}} \left(0,08 \frac{T_s}{5} NT \right)$	eq. (23e)	V_{fw} = volume dos tanques de aguada [m ³]
$V_{sew} = 0,065NT$	eq. (23f)	V_{sew} = volume do tanque sanitário [m ³]
$W_{ct} = 0,5V_{ct}\rho_{sw}$	eq. (23g)	W_{ct} = peso de água embarcada nos tanques de compensação e trim [t]
$W_{wot} = 0,45n_{wlt}\rho_{sw}$	eq. (23h)	W_{wot} = peso de água embarcada nos tanques de operação do armamento [t]
$W_{fw} = k_{36} V_{fw}\rho_{fw}$	eq. (23i)	W_{fw} = peso de água doce embarcada [t]
$W_{sew} = V_{sew}\rho_{sw}$	eq. (23j)	W_{sew} = peso de efluentes [t]

7.3.6 Carga Hotel

O modelo de estimativa da carga hotel foi baseado em [34].

Em resumo, esse modelo calcula as cargas elétricas associadas ao funcionamento dos sistemas de propulsão (KW_{prop}), a demanda elétrica funcional máxima (KW_{max}) e as cargas hotel em condição de patrulha, trânsito e esnorquel.

O equacionamento dispensa maiores explicações. Ressalta-se a utilização de margens sobre as cargas estimadas utilizadas para a determinação de KW_{max} ; uma sobre variações no consumo (m_{41}) e uma sobre incertezas no projeto da planta (m_{42}). Há ainda uma margem (m_{43}) aplicada com vistas a cobrir possíveis variações no consumo médio (KW_{24}).

É interessante destacar o significado físico dos cálculos apresentados nas eq. (24x) e (24y). Assume-se que nem todos os equipamentos, cujas demandas compõem KW_{fl} , estarão operando no mesmo instante. Assim, supõe-se que apenas 50% da carga será demandada na condição de trânsito.

Entretanto, o sistema de governo do navio (KW_1) e os inversores do MEP (KW_8) funcionam constantemente. Daí suas demandas serem subtraídas de KW_{fl} e

somadas posteriormente em seus valores integrais. O resultado prático é que as cargas, exceto KW_1 e KW_8 , são reduzidas à metade para o cálculo de KW_{24} ¹⁴⁸.

Por fim, admite-se que a carga hotel em patrulha é reduzida em 20% em relação à de trânsito (HL_3). Similarmente, a carga hotel em esnorquel é considerada como 30% superior a HL_3 .

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 24 e o equacionamento utilizado é apresentado na Tabela 25.

Tabela 24 – Carga Hotel – variáveis e parâmetros

(continua)

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
D	diâmetro do submarino [m]	entrada
KW_{misc}	demanda elétrica das estações de manobra [kW]	entrada
L	comprimento do submarino [m]	entrada
n_{gab}	número de gabinetes dos itens de <i>payload</i>	entrada
n_{cons}	número de consoles dos itens de <i>payload</i>	entrada
NT	número de tripulantes	entrada
P_{inst}	potência instalada ($n_{DG} \times$ potência unitária do DG) [kW]	entrada
P_{MEP}	potência do MEP [kW]	entrada
V_{aux}	volume das praças de auxiliares [m ³]	entrada
V_{cr}	volume estimado do CR [m ³]	entrada
V_{DG}	volume do comp. dos DG's [m ³]	entrada
V_{MEP}	volume do comp. do MEP [m ³]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
HL	vetor de carga hotel [kW] agrupa [HL_p HL_3 HL_{snk}]	saída
KW_{max}	demanda elétrica máxima [kW]	saída
KW_{prop}	vetor de demanda elétrica da propulsão [kW] agrupa [KW_{DG} KW_{MEP}]	saída

¹⁴⁸ Naturalmente, as equações poderiam ser unificadas na forma: $KW_{24} = 0,5(KW_{fl} + KW_8 + KW_1)$. Entretanto, de modo a deixar mais explícito o conceito físico que fundamenta o equacionamento, optou-se por mantê-lo na forma apresentada.

Tabela 24 – Carga Hotel – variáveis e parâmetros

(conclusão)

Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
n_{inv}	número de inversores do MEP	2
m_{51}	margem elétrica funcional	0,05
m_{52}	margem elétrica de projeto	0,05
m_{53}	margem da média de consumo	0,05
kw_{cons}	demanda elétrica dos consoles [kW]	2
kw_{gab}	demanda elétrica dos gabinetes [kW]	1
kw_{inv}	demanda elétrica unitária dos inversores do MEP [kW]	3

Tabela 25 – Carga Hotel - equacionamento

(continua)

Equacionamento	Legenda/Comentários
$KW_{DG} = 0,004332P_{inst}$ eq. (24a)	KW_{DG} = demanda elétrica associada ao funcionamento dos DG's [kW]
$KW_{MEP} = 0,004332P_{MEP}$ eq. (24b)	KW_{MEP} = demanda elétrica associada ao funcionamento do MEP [kW]
$aux_1 = n_{gab}kw_{gab} + n_{cons}kw_{cons}$ eq. (24c)	aux_1 = variável auxiliar
$KW_{pay} = aux + kw_{misc}$ eq. (24d)	KW_{pay} = demanda elétrica associada aos itens de <i>payload</i> [kW]
$KW_1 = 0,09LD$ eq. (24e)	KW_1 = demanda elétrica do aparelho de governo [kW]
$KW_2 = 0,007V_{cr}$ eq. (24f)	KW_2 = demanda elétrica da planta elétrica e de iluminação [kW]
$KW_3 = 15$ eq. (24g)	KW_3 = demanda elétrica de cargas diversas [kW]
$KW_4 = 0,0034V_{cr}$ eq. (24h)	KW_4 = demanda elétrica do sistema de monitoramento e controle de avarias [kW]
$KW_5 = 0,004V_{cr}$ eq. (24i)	KW_5 = demanda elétrica do sistema de manejo de combustível [kW]
$KW_6 = 0,65NT$ eq. (24j)	KW_6 = demanda elétrica de sistemas auxiliares [kW]
$KW_7 = 0,395NT$ eq. (24k)	KW_7 = demanda elétrica de habitabilidade [kW]
$KW_8 = n_{inv}kw_{inv}$ eq. (24l)	KW_8 = demanda elétrica dos inv. do MEP [kW]
$KW_{np} = \sum_{i=1}^8 KW_i$ eq. (24m)	KW_{np} = demanda elétrica não associada aos itens de <i>payload</i> [kW]
$V_{mb} = V_{MEP} + V_{DG}$ eq. (24n)	V_{mb} = volume dos comp. do MEP + DG's [m3]
$aux_2 = 0,024(V_{cr} - V_{mb} - V_{aux})$ eq. (24o)	aux_2 = variável auxiliar

Tabela 25 – Carga Hotel – equacionamento

(conclusão)

Equacionamento	Legenda/Comentários
$aux_2 = 0,024(V_{cr} - V_{mb} - V_{aux})$ eq. (24o)	aux ₂ = variável auxiliar
$aux_3 = 0,1(NT + KW_{pay})$ eq. (24p)	aux ₃ = variável auxiliar
$KW_{ac} = 0,67(aux_2 + aux_3)$ eq. (24q)	KW _{ac} = demanda elétrica do sistema de ar condicionado [kW]
$KW_v = 0,103(KW_{ac} + KW_{pay})$ eq. (24r)	KW _v = demanda elétrica do sistema de ventilação [kW]
$aux_4 = KW_{pay} + KW_{np}$ eq. (24s)	aux ₄ = variável auxiliar
$aux_5 = KW_{ac} + KW_v$ eq. (24t)	aux ₅ = variável auxiliar
$aux_6 = KW_{DG} + KW_{MEP}$ eq. (24u)	aux ₆ = variável auxiliar
$KW_{fl} = \sum_{i=4}^6 aux_i$ eq. (24v)	KW _{fl} = demanda elétrica funcional máxima (sem margens) [kW]
$KW_{max} = (1 + m_{51})(1 + m_{52})KW_{fl}$ eq. (24w)	KW _{max} = demanda elétrica máxima (com margens) [kW]
$aux_7 = \frac{1}{2}(KW_{fl} - KW_8 - KW_1)$ eq. (24x)	aux ₇ = variável auxiliar
$KW_{24} = aux_7 + KW_8 + KW_1$ eq. (24y)	KW ₂₄ = demanda elétrica média [kW]
$HL_3 = (1 + m_{53})KW_{24}$ eq. (24z)	HL ₃ = carga hotel em condição de trânsito [kW]
$HL_p = 0,8HL_3$ eq. (24i)	HL _p = carga hotel em patrulha [kW]
$HL_{snk} = 1,3HL_3$ eq. (24ii)	HL _{snk} = carga hotel em esnorquel [kW]

7.3.7 Grupos de pesos

Os modelos destinados às estimativas dos grupos de peso foram baseados em [34] e, subsidiariamente, [50]. Algumas adaptações ou substituições de equações foram necessárias, de modo a ajustar tal modelo ao escopo deste trabalho¹⁴⁹.

¹⁴⁹ Além da mudança de parte de alguns coeficientes para que o modelo pudesse ser utilizado com unidades S.I, em algumas ocasiões o equacionamento proposto na referência [34] apresentou resultados aparentemente inconsistentes, o que motivou a adoção de equacionamento alternativo. Alguns detalhes sobre as adaptações/mudanças realizadas:

1 – A equação proposta para o peso do CR apresentou aderência limitada às faixas de *MOD* entre 100 e 200 metros. Para valores superiores, o modelo original leva a resultados aparentemente superdimensionados. Optou-se por utilizar um modelo analítico baseado na geometria das cavernas aliado à aplicação de coeficientes típicos (Apêndice E);

O peso do grupo 1 (W_1) é obtido a partir o peso de casco (W_{casco}), estimado por calculo racional (ver Apêndice E) e do peso de jzentes (W_{180}). A soma dessas parcelas é multiplicada por um fator (k_{43}). Ao total obtido, é adicionado o peso do lastro de comissionamento (W_{191}), este último requerido nos REM. Convém observar que o peso de jzentes depende da estimativa dos demais grupos de peso; assim, W_1 só poderá ser estimado com base nas estimativas dos outros grupos.

O peso do grupo 2 (W_2) compreende o peso dos itens básicos da propulsão (MEP, inversores e DG's) e o peso das baterias (W_{bat}). O peso da linha de eixo, estimado a partir da potência do MEP, também compõe este grupo.

O peso do grupo 3 (W_3) compreende o peso das redes de distribuição de energia elétrica e de iluminação.

O peso do grupo 4 (W_4) engloba o peso de gabinetes e consoles, dos sistemas de comunicações interiores, dos sistemas de controle do navio e dos sistemas específicos de comando e controle.

O peso do grupo 5 (W_5) agrega o peso dos sistemas auxiliares e seus fluidos, incluindo o peso dos sistemas de prevenção de poluição.

O peso do grupo 6 (W_6) compreende o peso dos acessórios e itens de acabamento (incluindo tanto os relativos ao casco quanto os relacionados às áreas habitáveis).

O peso do grupo 7 (W_7) diz respeito aos sistemas relacionados ao armamento embarcado e é função do volume do compartimento de torpedos e do número de tubos.

Por fim, o peso de cargas variáveis (W_{LDT}) é agrupado em um vetor de saída. Essas cargas se referem ao armamento embarcado, à tripulação e pertences, aos víveres e ao peso dos fluidos agrupados no vetor w_{tank} (ver item 7.3.5).

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 26 e o equacionamento utilizado é apresentado na Tabela 27.

2 – As equações para o peso de auxiliares também foram adaptadas, pois produziam valores divergentes dos valores típicos esperados (ver Tabela 6 e Tabela 7). Adaptação semelhante foi feita nas equações dos pesos do Grupo 6.

3 – Os equacionamentos para o peso de carga variável (especificamente W_{LDT}) foram adaptados com base em [3], o que melhorou a aderência do equacionamento aos valores típicos esperados.

Tabela 26 – Pesos – variáveis e parâmetros

(continua)

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
$\Delta \uparrow$	deslocamento de superfície [t]	entrada
D	diâmetro do submarino [m]	entrada
KW_{max}	demanda elétrica máxima [kW]	entrada
L	comprimento do submarino [m]	entrada
L_{cil}	comprimento assumido do trecho cilíndrico do CR [m]	entrada
MOD	profundidade de operação [m]	entrada
N_{esp}	número de membros de forças especiais	entrada
n_{cell}	número de células de baterias	entrada
n_{cons}	número de consoles dos itens de <i>payload</i>	entrada
n_{DG}	número de DG's	entrada
n_{gab}	número de gabinetes dos itens de <i>payload</i>	entrada
n_{inv}	número de inversores do MEP [t]	entrada
n_{rlt}	número de torpedos a bordo (exceto em tubos)	entrada
n_{wlt}	número de tubos lançadores de armas	entrada
NT	número de tripulantes	entrada
P_{MEP}	potência do MEP [kW]	entrada
T_s	duração da comissão [dias]	entrada
V_{cr}	volume estimado do CR [m ³]	entrada
V_{wep}	volume do compartimento de torpedos [m ³]	entrada
W_{bat}	peso de uma célula de bateria [t]	entrada
W_{DG}	peso unitário do DG [t]	entrada
W_{inv}	peso unitário dos inversores do MEP [t]	entrada
W_{MEP}	peso unitário do MEP [t]	entrada
W_{tank}	vetor com demanda de pesos de fluidos [t] agrupa [W_{lo} fuel W_{ct} W_{wot} W_{fw} W_{sew}]	entrada
W_{wep}	peso unitário dos torpedos [t]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
W	vetor com os grupos de pesos [t] agrupa [W_1 W_2 W_3 W_4 W_5 W_6 W_7]	saída
W_{LDT}	vetor com pesos de carga variável [t] agrupa [W_{wep} [W_{crew}] [W_{tank}]]	saída
W_{fb}	peso de lastro fixo [t]	saída

Tabela 26 – Pesos – variáveis e parâmetros

(conclusão)

Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
ρ_{sw}	densidade da água do mar [kg/m ³]	1025
ρ_s	densidade do aço HY-80 [t/m ³]	7,85
σ_y	tensão de escoamento do aço HY-80 [MPa]	559
g	aceleração da gravidade [m/s ²]	9,81
k_{61}	fator de segurança (profundidade de colapso)	1,5
k_{62}	parâmetro de redução (espessura do casco)	0,9
k_{63}	parâmetro do peso estrutural	1,5
k_{64}	parâmetro de lastro de comissionamento	0,2%
W_{593}	peso dos sistemas de prevenção de poluição [t]	2,3
W_{gab}	peso unitário de gabinetes e consoles	0,18
W_{misc}	peso das estações de manobra [t]	(250 + 180)/1000

Tabela 27 – Pesos - equacionamento

(continua)

Equacionamento	Legenda/Comentários
$CD = k_{61} \cdot MOD$ eq. (25a)	CD = profundidade de colapso [m]
$p_{col} = \rho_{sw} g CD$ eq. (25b)	p_{col} = pressão de colapso [Pa]
$R = D / 2$ eq. (25c)	R = raio do submarino [m]
$W_{casco} = \rho_s \sum_{i=1}^3 V_i$ eq. (25d)	W_{casco} = peso do casco [t] (ver Tabela 70)
$W_{180} = 0,1 \sum_{i=2}^7 W_i$ eq. (25e)	W_{180} = peso de jazentes [t]
$W_{191} = k_{64} \Delta \uparrow$ eq. (25f)	W_{191} = peso do lastro de comissionamento [t]
$W_1 = k_{63} (W_{casco} + W_{180}) + W_{191}$ eq. (25g)	W_1 = peso do grupo 1 [t]
$W_{bm} = w_{MEP} + n_{DG} w_{DG} + n_{inv} w_{inv}$ eq. (25h)	W_{bm} = peso básico da propulsão [t]
$W_{bat} = w_{bat} n_{cell}$ eq. (25i)	W_{bat} = peso das baterias [t]
$W_{240} = 0,1425 P_{MEP}^{0,64}$ eq. (25j)	W_{240} = peso da linha de eixo [t]
$W_2 = 1,2 (W_{bm} + W_{bat}) + W_{240}$ eq. (25k)	W_2 = peso do grupo 2 [t]

Tabela 27 – Pesos – equacionamento

(continuação)

Equacionamento	Legenda/Comentários
$W_{\text{dist}} = 0,0012KW_{\text{max}}L$ eq. (25l)	W_{dist} = peso do sistema de distribuição elétrica [t]
$W_{\text{light}} = 0,02V_{\text{cr}}$ eq. (25m)	W_{light} = peso do sistema de iluminação [t]
$W_3 = W_{\text{light}} + W_{\text{dist}}$ eq. (25n)	W_3 = peso do grupo 3 [t]
$W_{400} = (n_{\text{gab}} + n_{\text{cons}})w_{\text{gab}}$ eq. (25o)	W_{400} = peso de gabinetes e consoles [t]
$W_{\text{ic}} = 179,4e^{-5}V_{\text{cr}} + 3,56$ eq. (25p)	W_{ic} = peso do sistema de comunicações interiores [t]
$W_{\text{co}} = 0,007V_{\text{cr}}$ eq. (25q)	W_{co} = peso dos sistemas de controle do navio [t]
$\text{aux}_1 = W_{400} + W_{\text{misc}} + W_{\text{ic}} + W_{\text{co}}$ eq. (25r)	aux_1 = variável auxiliar
$W_{\text{cc}} = 0,15\text{aux}_1$ eq. (25s)	W_{cc} = peso dos sistemas de comando e controle [t]
$W_4 = \text{aux}_1 + W_{\text{cc}}$ eq. (25t)	W_4 = peso do grupo 4 [t]
$W_{598} = 212e^{-5}V_{\text{cr}}$ eq. (25u)	W_{598} = peso de fluidos dos sistemas auxiliares [t] ¹⁵⁰
$\text{aux}_2 = 17,4V_{\text{cr}}^{1,443} + 267V_{\text{cr}}^{0,7224}$ eq. (25v)	aux_2 = variável auxiliar
$\text{aux}_3 = 380NT + 26,2P_{\text{MEP}}$ eq. (25w)	aux_3 = variável auxiliar
$\text{aux}_4 = 0,47\text{MOD}V_{\text{cr}} + \text{aux}_2 + \text{aux}_3$ eq. (25x)	aux_4 = variável auxiliar
$W_{\text{aux}} = 1e^{-4}\text{aux}_4$ eq. (25y)	W_{aux} = peso dos sistemas auxiliares [t]
$W_5 = W_{593} + W_{598} + W_{\text{aux}}$ eq. (25z)	W_5 = peso do grupo 5 [t]
$W_{\text{of1}} = 0,027V_{\text{cr}}$ eq. (25i)	W_{of1} = peso de acessórios e acabamento (casco) [t]
$W_{\text{of2}} = 0,81(NT - 9,67)$ eq. (25ii)	W_{of2} = peso de acessórios e acabamento (habitáveis) [t]
$W_6 = W_{\text{of1}} + W_{\text{of2}}$ eq. (25iii)	W_6 = peso do grupo 6 [t]
$W_7 = 0,072V_{\text{wep}} + 6,1n_{\text{wlt}}$ eq. (25iv)	W_7 = peso do grupo 7 [t]
$W_{\text{wep}} = n_{\text{rlt}}w_{\text{wep}}$ eq. (25v)	W_{wep} = peso total do armamento [t]
$W_{\text{F31}} = 3,5e^{-3}T_sNT$ eq. (25vi)	W_{F31} = peso de víveres [t]
$W_{\text{F32}} = (1e^{-3}T_s + 5e^{-3})NT$ eq. (25vii)	W_{F32} = peso de itens associados a mantimentos [t]

¹⁵⁰ Em todas as equações apresentadas neste capítulo, exceto quando explicitamente indicado o contrário, a notação “e^x” indica uma potência de 10 (e.g. $215e^{-3} = 215/1000 = 0,215$). Não se deve confundir a notação com o número de Euler “e”.

Tabela 27 – Pesos – equacionamento

(conclusão)

Equacionamento		Legenda/Comentários
$W_{F10} = 0,125N_T + 0,08N_{esp}$	eq. (25viii)	W_{F10} = peso da tripulação e pertences [t]
$w_{crew} = [W_{F31} \ W_{F32} \ W_{F10}]$	eq. (25ix)	w_{crew} = peso de itens associados à tripulação [t]
$W_{LDT} = [W_{wep} \ w_{crew} \ w_{tank}]$	eq. (25x)	W_{LDT} = vetor de cargas variáveis (note que w_{crew} e w_{tank} são também vetores)
$W_{fb} = \Delta \uparrow - (\sum_{i=1}^7 W_i + \sum_{i=1}^9 W_{LDTi})$	eq. (25xi)	W_{fb} = peso de lastro fixo [t]

7.3.8 Resistência ao Avanço e Potência

O modelo utilizado para cálculo de R_{av} e SHP^{151} segue o equacionamento descrito em [49], [52] e [53]. Em essência, trata-se da mesma abordagem anteriormente discutida no item 5.2.2.2.

Neste modelo, os valores de δC_f , C_{ds} e PC foram arbitrados, respectivamente, conforme recomendado de [49], [52] e [51]. O equacionamento adotado para a estimativa da resistência ao avanço em condição de esnorquel consta em [53].

As variáveis de entrada e saída do modelo são listadas na Tabela 28 e o equacionamento utilizado é apresentado na Tabela 29.

¹⁵¹ Modelos alternativos para tais cálculos estão disponíveis em [51], [32] e nos trabalhos da Virginia Tech (vide [34]).

Tabela 28 – Resistência ao Avanço e Potência - variáveis e parâmetros

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
D	diâmetro do submarino [m]	entrada
L	comprimento do submarino [m]	entrada
WS	área molhada do casco externo [m ²]	entrada
K2	fator de área molhada	entrada
[L _{sa} L _{sp} L _{sf}]	vetor de comprimentos da vela [m]	entrada
[B h] _{sail}	vetor de dimensões da vela [m]	entrada
v	velocidade considerada [m/s]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
SHP	potência no eixo [kW]	saída
SHP _{snk}	potência no eixo em esnorquel [kW]	saída
V _{max}	velocidade máxima do submarino [m/s]	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
ρ_{sw}	densidade da água do mar [kg/m ³]	1025
ν	viscosidade cinemática da água (m ² /s)	1,05e-6
sC _f	coeficiente de correlação	0,0004
C _{ds}	coeficiente de resistência da vela	0,014
g	aceleração da gravidade [m/s ²]	9,81
k ₇₁	fator de área - AR (vela)	1,10
k ₇₂	fator de área - AV (vela)	1,14
k ₇₃	fator de área - topo (vela)	0,89
m ₇₁	margem sobre EHP	15%
PC	coeficiente propulsivo	0,80

Tabela 29 – Resistência ao Avanço e Potência - equacionamento

Equacionamento	Legenda/Comentários
$R_{av} = \frac{1}{2} \rho_{sw} v^2 (WS.C_t + A_s C_{ds} + A_{app} C_{da})$ eq. (26a)	R_{av} = resistência ao avanço [N]
$C_t = C_f + \delta C_f + C_r$ eq. (26b)	C_t = coeficiente de resistência total
$C_f = \frac{0,075}{[\log_{10}(Re) - 2]^2}$ eq. (26c)	C_f = coeficiente de resistência friccional
$Re = \frac{vL}{\nu}$ eq. (26d)	Re = Número de Reynolds
$C_r = \frac{0,00789}{L/D - K_2}$ eq. (26e)	C_r = coeficiente de resistência de forma
$A_{app} C_{da} = LD / 1000$ eq. (26f)	A_{app} = área total de apêndices [m ²]
$L_{sail} = L_{sa} + L_{sp} + L_{sf}$ eq. (26g)	C_{da} = coef. de resistência de apêndices
$aux_1 = L_{sa} k_{71} + L_{sp} + L_{sf} k_{72}$ eq. (26h)	L_{sail} = comprimento total da vela [m]
$A_s = 2h_{sail} aux_1 + L_{sail} B_{sail} k_{73}$ eq. (26i)	aux_1 = variável auxiliar
$EHP = R_{av} v / 1000$ eq. (26j)	A_s = área total da vela [m ²]
$SHP = EHP(1 + m_{71}) / PC$ eq. (26k)	EHP = potência efetiva [kW] SHP = potência no eixo (kW)

O cálculo de SHP em condição de esnorquel considera a formação de uma parcela adicional de resistência, devida aos efeitos de onda, que é somada à R_{av} . Essencialmente, essa parcela depende do número de Froude (F_n) e da relação (L/D) do submarino. No presente modelo, ela é estimada por um polinômio de sexto grau, cujos coeficientes são dados na Tabela 30.

Tabela 30 – Coeficientes do polinômio de resistência adicional

a_n	valor
a_6	3561,3
a_5	-8812,6
a_4	8148,4
a_3	-3454,3
a_2	654,09
a_1	-40,235
a_0	0,2726

Tabela 31 – Parcela adicional (esnorquel) - equacionamento

Equacionamento		Legenda/Comentários
$F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}}$	eq. (27a)	F_n = Número de Froude (calculado na velocidade de esnorquel)
$\text{vet}_{F_n} = [F_n^6 \ F_n^5 \ F_n^4 \ F_n^3 \ F_n^2 \ F_n \ 1]$	eq. (27b)	vet_{F_n} = vetor de potências do Número de Froude.
$\text{vet}_a = [a_6 \ a_5 \ a_4 \ a_3 \ a_2 \ a_1 \ a_0]$	eq. (27c)	vet_a = vetor de coeficientes (ver Tabela 30)
$C_{dw} = \text{vet}_a \cdot \text{vet}_{F_n}$	eq. (27d)	C_{dw} = produto escalar entre os vetores
$C_w = \frac{ C_{dw} }{4(L/D)^2(L/D-1,3606)}$	eq. (27e)	C_w = coeficiente de resistência de ondas
$\Delta R_{av} = \rho_{sw} v^2 W S C_w$	eq. (27f)	ΔR_{av} = parcela de resistência de ondas [N]
$R_{av_snk} = R_{av} + \Delta R_{av}$	eq. (27g)	R_{av_snk} = resistência ao avanço em esnorquel [N]
$EHP_{snk} = R_{av_snk} v / 1000$	eq. (27h)	EHP_{snk} = potência efetiva em esnorquel [kW]
$SHP_{snk} = EHP_{snk} (1 + m_{71}) / PC$	eq. (27i)	SHP_{snk} = potência no eixo em esnorquel [kW]

Por fim, para uma dada potência no eixo do MEP (P_{MEP}), é possível manipular a eq. (26a) e obter uma expressão para estimativa da velocidade máxima do navio. Ressalta-se que, como o C_f é função de Re (que por sua vez é função da velocidade) o problema equivale a encontrar as raízes para a eq. (28a). De fato:

$$\frac{EHP(1 + m_{71})}{PC} = \frac{(1 + m_{71})}{2PC} \rho_{sw} v^3 (WSC_t + A_s C_{ds} + A_{app} C_{da}) \quad \text{eq. (28a)}$$

Fazendo:

$$\alpha_1 = \frac{(1 + m_{71}) \rho_{sw}}{2PC}$$

$$\alpha_2 = 0,075WS$$

$$\alpha_3 = WS(\delta C_f + C_r) + A_s C_{ds} + A_{app} C_{da}$$

$$\beta = \frac{L}{v}$$

Resulta que v_{\max} é a raiz da equação:

$$\alpha_1 v_{\max}^3 \left\{ \frac{\alpha_2}{[\log_{10}(\beta v_{\max}) - 2]^2} + \alpha_3 \right\} - P_{\text{MEP}} = 0 \quad \text{eq. (28b)}$$

7.3.9 Raio de ação, alcances e taxa de indiscrição

Este módulo calcula atributos de fundamental interesse para a avaliação do desempenho do navio: o raio de ação, os alcances e a taxa de indiscrição.

A taxa de indiscrição, calculada a uma determinada velocidade, é um indicador que reflete a quantidade de tempo, durante a comissão, que o submarino permanecerá em condição de esnorquel (portanto, mais vulnerável e passível de detecção). Sua expressão é dada pela eq. (29j).

O raio de ação e os alcances exprimem a distância que o submarino pode percorrer, a uma dada velocidade e sob determinada condição (cumprindo ou não regime de esnorquel).

Nesta dissertação, são avaliados os seguintes alcances e raio de ação:

- Raio de ação misto (RA_{mix}): é o raio de ação cumprido a v_{mix} considerando o tempo total de comissão;
- Alcance submerso (A_{sub}): é o alcance atingido em velocidade de patrulha, em condição submersa, entre duas operações sucessivas de esnorquel. Traduz, portanto, a distância que o submarino pode percorrer de forma discreta em velocidade de patrulha;
- Alcance submerso mínimo (A_{sprint}): é o alcance atingido em velocidade máxima, em condição submersa, entre duas operações sucessivas de esnorquel. Traduz, portanto, a distância que o submarino pode percorrer de forma relativamente discreta¹⁵², em velocidade máxima.

É evidente das definições que $RA_{\text{mix}} \gg A_{\text{sub}} \gg A_{\text{sprint}}$. Na prática, cada um desses atributos terá maior ou menor importância, dependendo do contexto operacional em que é considerado (e.g. aproximação para ataque, evasão após ataque, trânsito até o TO, etc.).

¹⁵² “Relativamente” pois em velocidade máxima o submarino terá maior ruído sonar irradiado, tornando-se mais suscetível à detecção sonar.

Ressalta-se que para o cálculo de RA_{mix} a velocidade média é considerada. Entretanto, neste cálculo, não se utiliza a média ponderada entre HL_p e HL_3 . Adota-se, ao invés disso, o valor de HL_3 . Essa é uma abordagem conservadora, pois conduzirá a valores menores de RA_{mix} .

A propósito, as demandas elétricas de propulsão (D_{MEP}) variam de acordo com a velocidade considerada. Naturalmente, para v_{max} temos $D_{MEP} = P_{MEP}/\eta_{ele}$. Assim, convém salientar que os cálculos do raio de ação e dos alcances são feitos para diferentes velocidades; o que altera o valor das demandas elétricas para a propulsão e afeta o resultado das equações (29b/c/d/e/f/h).

As variáveis utilizadas no modelo constam na Tabela 32. O equacionamento é apresentado na Tabela 33 e dispensa maiores comentários.

Tabela 32 – Raio de ação/alcance e IR - variáveis e parâmetros

(continua)

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
HL	vetor de carga hotel [kW] agrupa [HL_p HL_3 HL_{snk}]	entrada
KW_{prop}	vetor de demanda elétrica da propulsão [kW] agrupa [KW_{DG} KW_{MEP}]	entrada
n_{cell}	número de células de baterias	entrada
P_{MEP}	potência do MEP [kW]	entrada
P_{inst}	potência instalada (n_{DG} x potência unitária do DG) [kW]	entrada
SFC	taxa de consumo específico de combustível [kg/kW.h]	entrada
SHP	potência no eixo [kW]	entrada
SHP_{snk}	potência no eixo em esnorquel [kW]	entrada
v_{max}	velocidade máxima do submarino [m/s]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
RA_{mix}	raio de ação misto (em velocidade média trânsito/patrolha) [MN]	saída
A_{sub}	alcance submerso (em velocidade de patrolha) [MN]	saída
A_{sprint}	alcance submerso mínimo (em velocidade máxima) [MN]	saída
IR	taxa de indiscrição	saída

Tabela 32– Raio de ação/alcance e IR - variáveis e parâmetros

(conclusão)

Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
η_{carga}	eficiência de carga das baterias	0,85
η_{ele}	eficiência elétrica do MEP	0,70
k_{11}	fator de volume de combustível não aspirável	0,95
k_{81}	fator de descarga das baterias	0,80
m_{11}	margem sobre <i>SFC</i>	5%

Tabela 33 – Raio de ação/alcance e IR - equacionamento

(continua)

Equacionamento	Legenda/Comentários
$T_{\text{snk}} = \frac{(1000\text{fuel})k_{11}}{P_{\text{inst}}(1 + m_{11})SFC}$ eq. (29a)	T_{snk} = tempo total de carga (esnorquel) [h]
$\text{Dem}_{\text{MEP}} = \text{SHP}(v) / \eta_{\text{ele}}$ eq. (29b)	Dem_{MEP} = demanda elétrica do MEP [kW]
$\text{Dem}_{\text{MEP_snk}} = \text{SHP}_{\text{snk}}(v) / \eta_{\text{ele}}$ eq. (29c)	$\text{Dem}_{\text{MEP_snk}}$ = demanda elétrica do MEP em esnorquel [kW]
$\text{Dem}_1 = \text{Dem}_{\text{MEP}} + \text{KW}_{\text{MEP}} + \text{HL}_p$ eq. (29d)	Dem_i = demanda elétrica [kW] 1 – patrulha; 2 – trânsito; 3 – esnorquel.
$\text{Dem}_2 = \text{Dem}_{\text{MEP}} + \text{KW}_{\text{MEP}} + \text{HL}_3$ eq. (29e)	P_{carga} = potência de carga das baterias [kW]
$\text{Dem}_3 = \text{Dem}_{\text{MEP_snk}} + \text{KW}_{\text{MEP}} + \text{HL}_{\text{snk}}$ eq. (29f)	E_{total} = energia total disponível na comissão [kW.h]
$P_{\text{carga}} = P_{\text{inst}} \eta_{\text{conv}} - \text{KW}_{\text{DG}} - \text{Dem}_3$ eq. (29g)	T_1 = tempo total submerso em trânsito em velocidade de patrulha [h]
$E_{\text{total}} = T_{\text{snk}} P_{\text{carga}} \eta_{\text{carga}} k_{81}$ eq. (29h)	T_2 = tempo total submerso em trânsito misto [h].
$T_1 = E_{\text{total}} / \text{Dem}_1$ eq. (29i)	w_{disc} = taxa de descarga [kW]
$\text{IR} = T_{\text{snk}} / (T_{\text{snk}} + T_1)$ eq. (29j)	E = energia armazenada nas baterias [kW.h] - (ver Apêndice F)
$T_2 = E_{\text{total}} / \text{Dem}_2$ eq. (29k)	T_{sub} = tempo submerso entre duas operações de esnorquel [h] (@velocidade de patrulha/máxima)
$\text{RA}_{\text{mix}} = 0.5(T_{\text{snk}} + T_2)v_{\text{mix}}$ eq. (29l)	
$w_{\text{disc}} = \text{Dem}_i / n_{\text{cell}}$ eq. (29m)	
$E = f(w_{\text{disc}})$ eq. (29n)	

Tabela 33 – Raio de ação/alcance e IR – equacionamento

(conclusão)

Equacionamento	Legenda/Comentários
$T_{\text{sub}} = Ek_{81} / Dem_i$	eq. (29o)
$A_{\text{sub}} = T_{\text{sub}} X_{\text{veloc}}$	eq. (29p)
$A_{\text{sprint}} = T_{\text{sub}} v_{\text{max}}$	eq. (29q)

7.3.10 Manobrabilidade

Este módulo calcula os índices de estabilidade direcional no plano vertical (G_V) e horizontal (G_H). A definição desses índices é detalhadamente estabelecida em [30] e não será explorada aqui.

Para os presentes propósitos, é suficiente ressaltar que esses índices são indicadores de quão estável/manobrável o submarino é em dado plano (vertical/horizontal). Eles variam de 0 a 1; quanto mais próximo da unidade, mais estável o submarino é em dado plano. Naturalmente, o submarino deve ser direcionalmente estável no plano vertical (ver item 5.2.2.4).

Minnick [30] analisou o desempenho em manobrabilidade de um conjunto de submarinos norte-americanos. Segundo a autora, baseados em projetos anteriores, os seguintes valores são recomendáveis para G_H e G_V :

$$0,15 \leq G_H \leq 0,30$$

$$0,50 \leq G_V \leq 0,70$$

Embora tenha estabelecido as equações paramétricas para a determinação dos índices, a autora não as apresentou em seu trabalho. Entretanto, as formulações, a ela atribuídas, são apresentadas por Blizzard et al. em [53]. Tais equações são utilizadas nesta dissertação [eq.(30) e (31)].

Tabela 34 – Manobrabilidade (G_H)- equacionamento

Equacionamento

$$k = 3,2808399$$

$$a_1 = -0,8710153e^1 + 0,3172744Dk + 0,6818338L / D + 0,1626116n_a - 0,3260974n_f$$

$$a_2 = -0,3504993e^{-2} (Dk)^2 - 0,2365368e^{-1} (L / D)^2 - 0,1080688e^{-1} n_a^2 + 0,1645568e^{-1} n_f^2$$

$$a_3 = -0,3114843e^{-2} Dk \frac{L}{D} - 0,1786924e^{-1} Dk n_a - 0,2145144e^{-2} Dk n_f$$

$$a_4 = 0,3072456e^{-1} \frac{L}{D} n_a + 0,1348954e^{-1} \frac{L}{D} n_f + 0,3955147e^{-1} n_a n_f$$

$$G_H = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \quad \text{eq. (30)}$$

Tabela 35 – Manobrabilidade (G_V)- equacionamento

Equacionamento

$$k = 3,2808399$$

$$b_1 = -0,1422074e^2 + 0,3810203Dk + 0,1456368e^1 L / D + 0,3417729n_a + 0,2548777n_f$$

$$b_2 = -0,3532465e^{-2} (Dk)^2 - 0,5131522e^{-1} (L / D)^2 - 0,3715690e^{-1} n_a^2 + 0,4040887e^{-2} n_f^2$$

$$b_3 = -0,8089447e^{-2} Dk \frac{L}{D} - 0,2325680e^{-1} Dk n_a - 0,2950826e^{-2} Dk n_f$$

$$b_4 = 0,3943816e^{-1} \frac{L}{D} n_a - 0,2947461e^{-1} \frac{L}{D} n_f + 0,3464663e^{-1} n_a n_f$$

$$G_V = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 \quad \text{eq. (31)}$$

7.3.11 Custo

Conforme anteriormente destacado, é utilizado neste trabalho um modelo simplificado de custo por grupos de peso, com refinamentos relativos à complexidade de integração/ montagem dos sistemas e grau de automação do submarino. Além disso, o modelo considera percentuais para estimativa de custos indiretos e de margem de lucro do estaleiro.

Este modelo, adaptado a partir do modelo disponível na referência [54]¹⁵³, fornece parâmetros (KN e KM) para estimativa dos custos diretos de mão de obra e custos diretos de material para os sete grupos de peso do submarino (Tabela 36).

Tabela 36 – Parâmetros KN e KM (módulo de custos)

Grupo	KN (h/t)	KM (kUS\$/t)
1	700	20
2	800	150
3	1000	700
4	1500	80/C _{man}
5	1500	100
6	1600	50
7	1600	200

A partir da estimativa de tais custos, coeficientes específicos permitem derivar os custos adicionais relativos à integração e montagem dos sistemas. Dessa forma, o custo direto do submarino pode ser obtido.

Após essa etapa, o custo indireto de produção é estimado a partir da adoção de um percentual típico.

Por fim, também com base em um percentual típico para a margem de lucro do estaleiro, o custo final é obtido.

As variáveis de entrada e saída do modelo de custos são listadas na Tabela 37.

Tabela 37 – Custos - variáveis e parâmetros

(continua)

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
W	vetor com o peso dos grupos 1 a 7 (t)	entrada
C _{man}	coeficiente de automação do submarino	entrada

¹⁵³ O modelo original considera um fator de correção inflacionária para os custos de material (atualização de valores à taxa anual específica durante o período entre a finalização do projeto e o término da construção). Tal correção não é adotada neste trabalho. Além disso, os parâmetros de custo originais são dados em horas/tonelada longa e dólares/tonelada longa. Em rigor, seria necessário corrigir os parâmetros para pesos dados em toneladas (ou converter os pesos para toneladas longas antes do cálculo do custo). Neste trabalho, optou-se por não fazer tal correção. Para os propósitos de pesquisa aqui almejados, admite-se que as simplificações adotadas são desprovidas de implicações significativas.

Tabela 37 – Custos - variáveis e parâmetros

(conclusão)

Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
CBCC	custo do submarino (MUS\$)	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
Mh	custo de homem-hora (US\$/h)	75
KN _i	parâmetro de custo de mão de obra do grupo "i" (h/t)	vide Tabela 36
KM _i	parâmetro de custo de material do grupo "i" (kUS\$/t)	vide Tabela 36
I _L	coef. de custo de integração - mão de obra	0,5
I _M	coef. de custo de integração - material	0,001
A _L	coef. de custo de montagem - mão de obra	0,25
A _M	coef. de custo de montagem - material	0,02
ovhd	percentual de custos indiretos	0,25
profit	margem de lucro do estaleiro	0,1

O equacionamento do modelo de custo é detalhado na Tabela 38.

Tabela 38 – Custos - equacionamento

(continua)

Equacionamento		Legenda/Comentários
$CL_i = KN_i W_i Mh$	eq. (32a)	CL _i = custo direto de mão de obra (grupo 'i') (US\$)
$CM_i = KM_i W_i$	eq. (32b)	CM _i = custo direto de material (grupo 'i') (US\$)
$CL_{1-7} = \sum_{i=1}^7 CL_i$	eq. (32c)	CL ₁₋₇ = custo direto de mão de obra (grupos 1 a 7) (US\$)
$CM_{1-7} = 10^3 \sum_{i=1}^7 CM_i$	eq. (32d)	CM ₁₋₇ = custo direto de material (grupos 1 a 7) (US\$)
$CL_8 = I_L CL_{1-7}$	eq. (32e)	CL ₈ = custo integração (mão de obra) (US\$)
$CM_8 = I_M CM_{1-7}$	eq. (32f)	CM ₈ = custo integração (material) (US\$)
$CL_9 = A_L CL_{1-7}$	eq. (32g)	CL ₉ = custo de montagem (mão de obra) (US\$)
$CM_9 = A_M CM_{1-7}$	eq. (32h)	CM ₉ = custo de montagem (material) (US\$)

Tabela 38 – Custos – equacionamento

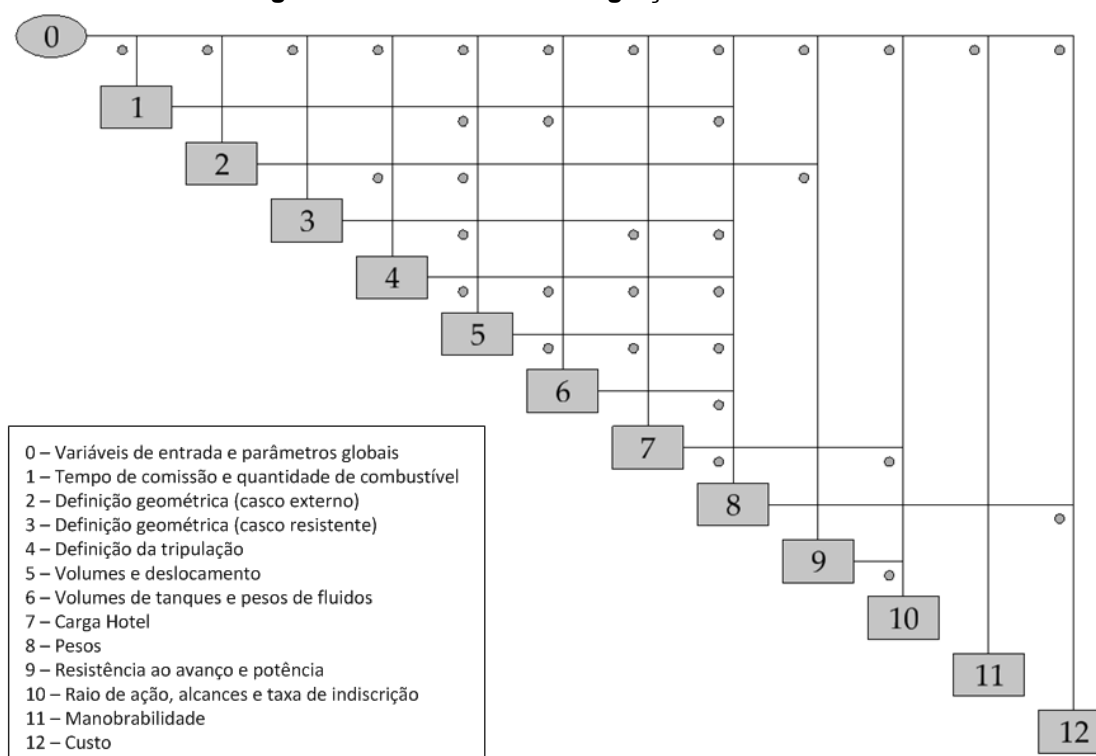
(conclusão)

Equacionamento		Legenda/Comentários
$CL = CL_{1-7} + CL_8 + CL_9$	eq. (32i)	CL = custo direto total de mão de obra (US\$)
$CM = CL_{1-7} + CM_8 + CM_9$	eq. (32j)	CM = custo direto total de material (US\$)
$DC = CL + CM$	eq. (32k)	DC = custo direto total (US\$)
$IC = \text{ovhd} \cdot DC$	eq. (32l)	IC = custo indireto total (US\$)
$CBC = \frac{(1+\text{profit})}{10^6} (DC + IC)$	eq. (32m)	

7.4 Estrutura de integração dos módulos

A estrutura de integração dos módulos é apresentada na Figura 51, que ilustra graficamente o fluxo de variáveis de entrada/saída entre os módulos integrados. Um pequeno ponto, adjacente aos elos de ligação entre módulos, indica que o(s) módulo(s) acima fornece(m) dados de entrada ao(s) módulo(s) abaixo. A estrutura em cascata da figura reflete a ordem em que os cálculos são efetuados.

Figura 51 – Estrutura de integração dos módulos



Fonte: autor

(página deixada intencionalmente em branco)

8 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

If you know a thing only qualitatively, you know it no more than vaguely. If you know it quantitatively - grasping some numerical measure that distinguishes it from an infinite number of other possibilities - you are beginning to know it deeply¹⁵⁴.

Carl Sagan

Este capítulo descreve o modelo de otimização proposto e sua integração com o modelo de síntese exposto no capítulo 7.

Para tanto, são estabelecidas as restrições e os atributos a otimizar (i.e. maximização da efetividade militar e minimização do custo). Além disso, conceito de *OMOE* é discutido e delimitado. Enunciadas as restrições e atributos de interesse, o problema de otimização pode ser então formulado.

Por fim, a estrutura implementada (integração entre os softwares utilizados) é apresentada.

8.1 Especificidades do problema abordado

Embora o problema geral de otimização em engenharia naval tenha sido brevemente tratado no capítulo 6, algumas considerações adicionais são pertinentes.

Andrade [48] apresenta as principais características do problema de projeto em Engenharia Naval, quais sejam:

1. O problema demanda um grande número de variáveis para a definição de uma solução;
2. É um problema que envolve múltiplos requisitos e restrições;

¹⁵⁴ “Se conhecemos algo apenas qualitativamente, nós o conhecemos apenas de maneira vaga. Se o conhecemos quantitativamente – entendendo alguma medida numérica que o distingue de um número infinito de outras possibilidades – começamos a conhecê-lo profundamente.” (Tradução livre).

3. Os requisitos geram objetivos, normalmente, conflitantes.

O autor ressalta, ainda, que essas características induzem importante propriedade ao problema: a de ser um problema aberto que admite grande número de possíveis soluções viáveis e com diferentes níveis de desempenho (atributos considerados na função objetivo).

Nesse sentido, o autor expõe as duas principais dificuldades para modelar um problema de projeto em Engenharia Naval como um problema de otimização:

- a) Estabelecer um critério satisfatório para julgar o mérito das diferentes soluções;
- b) Possuir alguma certeza de que entre as soluções geradas, para comparação, encontram-se aquelas de melhor mérito possível segundo o critério de julgamento estabelecido (i.e. as "soluções ótimas").

Neste trabalho, com vistas a superar a dificuldade enunciada no item "a", optou-se por tratar o problema como um *MOP*. Por hipótese, julgam-se como "melhores" as soluções de maior efetividade alcançável (*OMOE*) associadas aos menores custos básicos de construção (*BCC*) possíveis. Para a determinação da *OMOE*, a técnica de *AHP* foi utilizada.

Por seu turno, a dificuldade listada no item "b" é contornada pelo uso de Algoritmos Genéticos para o estabelecimento de uma Fronteira de Pareto. Conforme discutido no capítulo 6, esses algoritmos são adequados para solucionar o tipo de problema em pauta.

8.2 Modelo de otimização proposto

8.2.1 Restrições

Para o problema de otimização, o primeiro passo da análise consiste na definição da região do espaço de projeto que se deseja explorar. Inicialmente, isso é parcialmente feito ao se fixar os intervalos das variáveis (i.e. restrições laterais) e/ou definir os valores alternativos que elas podem assumir. Nesta dissertação, as variáveis de projeto, juntamente com seus intervalos e valores alternativos, foram estabelecidas no capítulo 7 (Tabela 8).

Em seguida, novas restrições limitam ainda mais as fronteiras do espaço de interesse, definindo o espaço de soluções viáveis. Aqui, as restrições são *MEDC/MIDC* provenientes da análise dos Requisitos de Estado Maior (ver Anexo B), restrições estabelecidas com base em critérios técnicos ou restrições convenientemente arbitradas para limitar o escopo da análise. Elas são apresentadas¹⁵⁵ na Tabela 39.

Tabela 39 - Restrições

(continua)

Restrições Geométricas		
nº	Forma matemática	Descrição
g ¹	$L_{\text{stack}} \leq L_{\text{cil}}$	Espaço longitudinal (comprimento) maior que o demandado
g ²	$D_{\text{stack}} \leq D$	Espaço transversal (diâmetro) maior que o demandado
g ³	$L / D \geq 6$	Razão comprimento/diâmetro no intervalo desejado
g ⁴	$L / D \leq 13$	Razão comprimento/diâmetro no intervalo desejado
g ⁵	$\frac{\sum V_{\text{int}} + \sum v_{\text{tank}}}{V_{\text{cr}}} \leq 0,98$	Volume disponível maior que volume demandado
g ⁶	$\frac{\sum V_{\text{int}} + \sum v_{\text{tank}}}{V_{\text{cr}}} \geq 0,90$	Volume demandado próximo ao volume disponível (essa restrição visa a descartar soluções com subaproveitamento de volume interno)
Arquitetura Naval		
nº	Forma matemática	Descrição
g ⁷	$\Delta \uparrow \leq 3500$	Deslocamento de superfície dentro limite máximo estipulado
g ⁸	$W_{\text{fb}} \geq 0,1\Delta \uparrow$	Lastro fixo dentro do percentual estipulado
g ⁹	$W_{\text{fb}} \leq 0,2\Delta \uparrow$	Lastro fixo não superior a 20% do deslocamento de superfície (essa restrição visa a descartar soluções com excesso de deslocamento) ¹⁵⁶

¹⁵⁵ As inequações apresentadas não estão na forma canônica (i.e. $g_i(x^T) \geq 0$), mas podem ser manipuladas para assumir tal forma.

Tabela 39 - Restrições

(conclusão)

Requisitos Operativos		
nº	Forma matemática	Descrição
g ¹⁰	$IR \leq 0,12$	Taxa de indiscrição dentro do limite máximo estipulado
g ¹¹	$v_{\max} \geq 15$	Velocidade máxima igual ou superior à requerida
g ¹²	$RA_{\text{mix}} \geq 2500$	Raio de ação misto igual ou superior ao requerido
g ¹³	$A_{\text{sub}} \geq 50$	Alcance submerso igual ou superior ao requerido
g ¹⁴	$G_H \geq 0,15$	Estabilidade direcional mínima no plano horizontal
g ¹⁵	$G_V \geq 0,50$	Estabilidade direcional mínima no plano vertical
Custo		
nº	Forma matemática	Descrição
g ¹⁶	$CBCC \leq 735e6$	Custo inferior a 1,05 do patamar máximo estabelecido ¹⁵⁷

8.2.2 Medida geral de Efetividade (OMOE)

Conforme anteriormente tratado, o projeto de submarinos convencionais envolve a análise de diversos requisitos operativos/técnicos, de natureza por vezes conflitante, cujo resultado reflete o estabelecimento de soluções de compromisso entre tais demandas. Entretanto, sem certo cuidado, essa análise (i.e. a busca de soluções balanceadas) pode não capturar efeitos importantes de tais *tradeoffs* sobre a efetividade militar do submarino. Em realidade, alguns autores destacam a

¹⁵⁶ Naturalmente, já se espera que diversos desempenhos do navio sejam penalizados por um excesso de deslocamento (o que afetará a OMOE da solução), além dos naturais impactos em custo. De qualquer modo, esta restrição torna inviáveis soluções com excesso de deslocamento.

¹⁵⁷ Admite-se uma excursão da busca em valor ligeiramente superior ao custo máximo. Com isso, é possível preservar, entre as soluções, alternativas cujo custo esteja situado um pouco acima do preconizado mas cuja efetividade possa justificar sua escolha. Nesse caso, o cliente poderá avaliar se o aumento de custo é aceitável diante dos potenciais ganhos em efetividade.

importância de que esse e outros aspectos sejam considerados desde o projeto de concepção. Por exemplo, Rains [55] aponta:

*“Combatant ship design is a series of tradeoffs often made with little knowledge of the impact of the decisions, except on ship size or displacement. However, many other considerations, such as combat effectiveness, survivability, and initial cost may be equally important in the design process.”*¹⁵⁸

Destarte, é necessário estabelecer alguma métrica que permita avaliar a efetividade militar de determinada solução. Neste trabalho, optou-se pela utilização de uma abordagem fundamentada no Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process - AHP*), conforme proposta por Brown [6]¹⁵⁹. Em essência, o método permite estabelecer, de forma sistemática, funções capazes de mensurar, quantitativamente, a contribuição de cada atributo de interesse (e.g. velocidade, autonomia, armamento, etc.) para o cumprimento da missão.

O emprego do método, inicialmente, consiste no estabelecimento de uma hierarquia de decisão/otimização (Figura 52). No presente caso, deseja-se maximizar a efetividade militar do submarino e a hierarquia estabelecida representa uma abstração de como os atributos do sistema interagem entre si e de como eles contribuem para o cumprimento da missão.

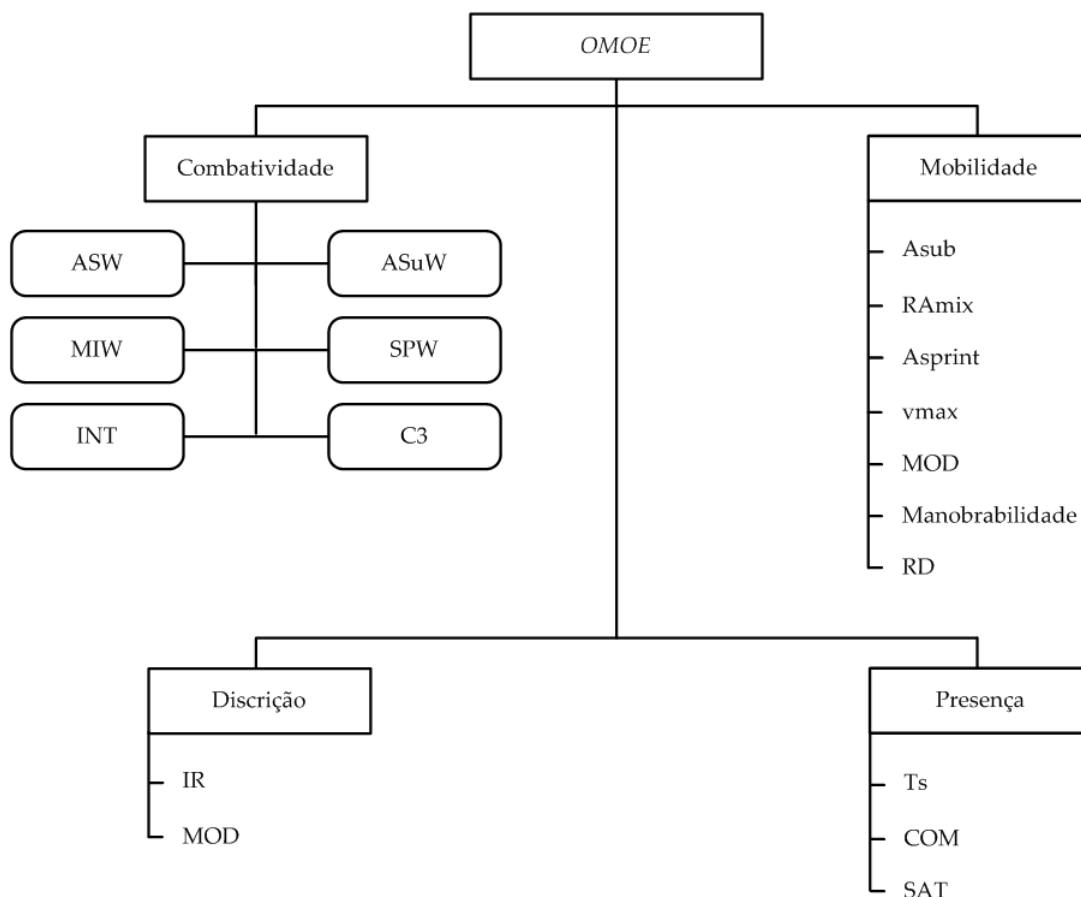
Em primeira análise, são qualitativamente identificadas performances consideradas críticas para o cumprimento do objetivo considerado. Subordinadas a cada uma dessas performances críticas, pode haver "performances derivadas" que impactam o atingimento das performances críticas. Estabelece-se, assim, uma estrutura de performances (dos aspectos mais abrangentes para os mais detalhados). No limite, determinados atributos/variáveis de projeto (e.g. velocidade, raios de ação, número de tubos, etc.) estarão subordinados a uma dada performance derivada/crítica, contribuindo em maior ou menor medida para que ela

¹⁵⁸ O projeto de navios de guerra consiste em uma série de soluções de compromisso, frequentemente estabelecidas com pouco conhecimento acerca do impacto das decisões tomadas, exceto sobre as dimensões principais e o deslocamento do navio. Entretanto, muitas outras considerações, como efetividade militar, "capacidade de sobrevivência" [do navio no Teatro de Operações] e custo inicial podem ser igualmente importantes durante o projeto. (Tradução livre).

¹⁵⁹ Embora não seja objetivo deste texto cobrir o assunto detalhadamente, um pequeno resumo sobre o *AHP* é fornecido no Apêndice H.

seja atingida. Isso pode ser observado na Figura 52. Nela, o objetivo principal (maximização da efetividade) agrega performances críticas. Estas, por seu turno, agregam performances derivadas e/ou atributos/variáveis de interesse. Por fim, as performances derivadas agregam outras performances derivadas e/ou atributos/variáveis de interesse (conforme evidenciado na Figura 53, no caso da performance de combatividade).

Figura 52 – Hierarquia da OMOE



Fonte: autor

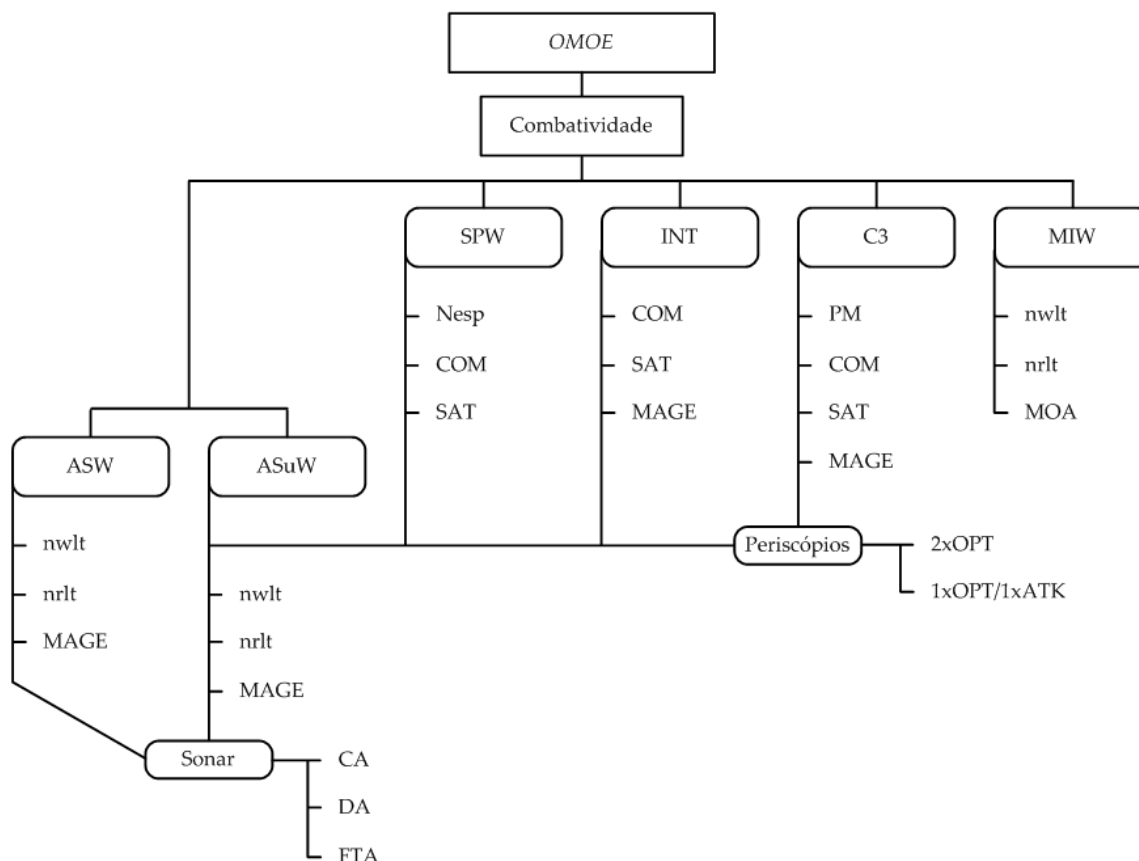
Na hierarquia utilizada neste trabalho, são consideradas performances críticas:

- a) **Combatividade**: Capacidade de empreender ações de combate no Teatro de Operações (TO). Mais especificamente, conduzir as missões de guerra antissuperfície (*Anti-Surface Warfare - ASuW*), guerra antissubmarina (*Anti-Submarine Warfare - ASW*), operações especiais (*Special Warfare - SPW*), guerra de minas (*Mine Warfare - MIW*), ações de inteligência,

vigilância e reconhecimento (*Intelligence, Surveillance and Reconnaissance - INT*) e ações de comando, controle e comunicações (*Command, Control, Communications - C3*);

- b) Mobilidade: Capacidade de se mover no TO. Inclui a capacidade de assumir posição (trânsito até a zona de patrulha), engajar (movimentos na zona de patrulha para condução de ataques) e se evadir (deixar a área de ameaça após a realização do ataque);
- c) Discrição: Capacidade de evitar a detecção durante a operação (trânsito/patrulha);
- d) Presença: Capacidade de se manter autonomamente no TO (e.g. víveres, aguada, etc.) e em condições de comunicar-se com as forças amigas/bases para coordenação das ações.

Figura 53 – Hierarquia da OMOE



Fonte: autor

Depois de estabelecida a hierarquia, a técnica de *AHP* permite que, através de questionários de avaliação da opinião de especialistas, sejam estabelecidos pesos para cada atributo/variável - performance derivada - performance crítica, em relação à sua contribuição para a performance/objetivo hierarquicamente superior.

A cada atributo estará associada uma medida de performance (MP), que varia¹⁶⁰ entre 0 e 1. A soma das MP, multiplicadas pelos respectivos pesos, resultará em um valor de performance (VP) para cada performance derivada (também variando entre 0 e 1).

Por fim, em processo semelhante, a soma dos VP, multiplicadas pelos respectivos pesos, permite a obtenção da *OMOE*. Dessa forma:

$$OMOE = g[VP_i(MP_i)] = \sum_i w_i VP_i(MP_i) \quad \text{eq. (33)}$$

Maiores detalhes sobre o estabelecimento da *OMOE* estão disponíveis nos Apêndices H, I e J.

8.2.3 Escopo da determinação da *OMOE*

São pertinentes algumas observações sobre o escopo no qual a tentativa de estabelecimento (ou maximização) da efetividade militar do submarino ocorre.

Em rigor, conforme aponta Brown [6], essa determinação deveria envolver uma infinidade de considerações (e.g. política de defesa do país, potenciais ameaças, estrutura existente da Marinha, cenários da missão, simulações extensivas de jogos de guerra, opinião de especialistas, etc.). Teoricamente, todas essas considerações poderiam ser reunidas em um macromodelo de simulação, no qual a efetividade militar seria amplamente testada, para um conjunto de características do navio avaliadas sob diferentes cenários probabilísticos.

Entretanto, ressalta o autor, há limitações para o grau de complexidade que tal modelo poderia assumir em aplicações reais; o que impede sua implementação prática, pelo menos por ora. Ele aponta que o *AHP* tem o mérito de capturar, através da opinião de especialistas, ao menos certa parcela dessas complexas interações.

¹⁶⁰ Quando a variável/atributo assume seu valor inferior/mínimo o valor da MP será nulo. Quando a variável/atributo assume seu valor desejável/máximo o valor da MP será unitário. Valores intermediários das variáveis/atributos correspondem a valores intermediários de MP.

Já Hootman [26] frisa que a efetividade de um navio/submarino deve ser avaliada em termos de seu macrossistema. Ou seja, não basta que o submarino seja isoladamente considerado (i.e. sua interação com a força naval durante o cumprimento da missão é mais importante que seu desempenho quando isoladamente considerado).

Em que pese a consistência do argumento, as dificuldades de implementar tal abordagem são semelhantes às apontadas por Brown. Ademais, há extensa bibliografia em que a efetividade tem sido isoladamente considerada. Dessa forma, para os propósitos desta dissertação, julga-se adequado o uso do *AHP* e da abordagem “isolada”.

8.2.4 O problema de otimização tratado

As definições anteriormente estabelecidas permitem enunciar o problema de otimização multiobjetivo tratado nesta dissertação. Sendo $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]^T$ o vetor das N variáveis de projeto, o problema consiste em:

Minimizar $\text{Custo}(x)$;

Maximizar $\text{OMOE}(x)$;

Sujeito a:

$$g_j(x) \geq 0 \quad j = 1 \dots 16;$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i = 1, 2, \dots N.$$

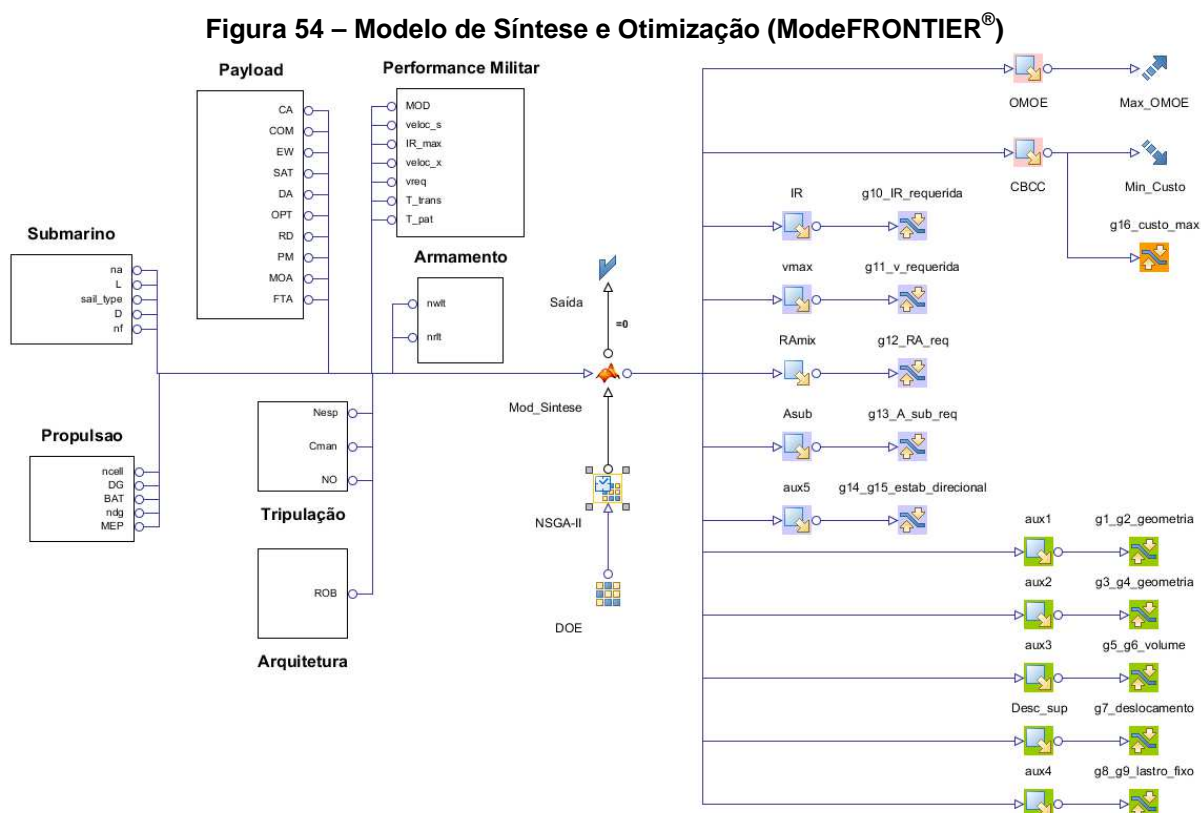
8.3 Estrutura utilizada para a otimização

O modelo de síntese apresentado no capítulo 7 e a estrutura para avaliação de *OMOE* foram implementados no software MATLAB[®] e integrados a uma estrutura de otimização implementada no software ModeFRONTIER[®] (Figura 54)¹⁶¹.

¹⁶¹ O MATLAB[®] é desenvolvido pela MathWorks e possui aplicação difundida nas comunidades acadêmica, científica e de engenharia aplicada. Já o ModeFRONTIER[®] é uma ferramenta de otimização multiobjetivo desenvolvida para trabalhar em conjunto com outros softwares de análise em engenharia. Originalmente fruto de uma iniciativa acadêmica, conduzida por pesquisadores europeus da área de otimização, o software foi posteriormente convertido em produto comercial. Sua participação no mercado de simulação computacional em engenharia cresceu consideravelmente nos últimos anos. A empresa ESTECO é a atual proprietária e desenvolvedora do ModeFRONTIER.

A estrutura agrega as variáveis de entrada e parâmetros globais do modelo de acordo com o campo a que se referem (i.e. geometria do submarino, propulsão, *payload*, tripulação, arquitetura, performance militar e armamento).

As restrições se dividem basicamente entre aquelas relacionadas à geometria e à arquitetura naval do submarino (g_1 a g_9 , destacadas em verde na figura), aos requisitos operativos (g_{10} a g_{15} , destacadas em lilás na figura) e ao custo (g_{16} , destacada em laranja na figura).



Fonte: autor

A população inicial¹⁶² para teste de viabilidade e condução do processo de otimização é gerada pela técnica SOBOL¹⁶³ (caixa DOE na figura). O algoritmo de otimização *NSGA II* é utilizado. O modelo de síntese, implementado em MATLAB, permite a obtenção dos atributos de interesse para a otimização (*OMOE* e custo) e outras características necessárias à avaliação da viabilidade das soluções.

¹⁶² Ou seja, o conjunto de vetores x^T de variáveis de projeto.

¹⁶³ O algoritmo para obtenção de sequências quasi-aleatórias SOBOL foi proposto pelo matemático russo Ilya Mierovitch Sobol, na década de 1960, e seus detalhes fogem ao escopo deste trabalho. A técnica permite um “preenchimento” mais homogêneo do hiper-cubo gerado pelos vetores de variação de cada variável de projeto, permitindo uma avaliação mais uniforme do espaço de soluções candidatas.

9 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A intuição, não testada e não comprovada, é uma garantia insuficiente da verdade.

Bertrand Russell

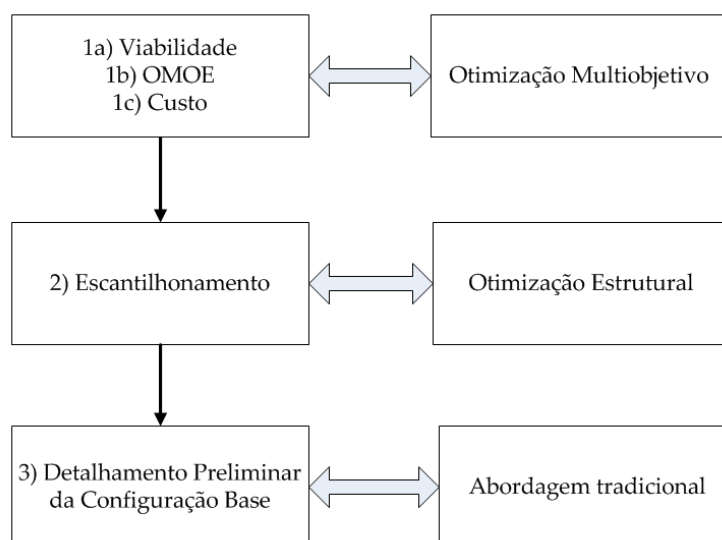
Este capítulo descreve a análise conduzida e os resultados obtidos.

9.1 Análise conduzida

A análise conduzida se dividiu em três etapas:

1. Otimização multiobjetivo: destinada à obtenção de uma Fronteira de Pareto, composta de soluções viáveis que permita a seleção de uma configuração base;
2. Otimização estrutural: destinada à obtenção de um escantilhamento viável, capaz de prover o volume necessário com o menor peso estrutural possível;
3. Detalhamento preliminar da configuração base: destinada à determinação de outros aspectos de interesse (como o arranjo interno, estabilidade e equilíbrio do navio) bem como à validação dos resultados do modelo de síntese.

Essas etapas são graficamente representadas na Figura 43.

Figura 55 – Análise conduzida

Fonte: adaptado [48]

9.2 Otimização multiobjetivo

9.2.1 Exploração inicial do espaço de soluções – Bateria 1

Uma primeira avaliação do espaço de soluções, com os limites de variação e parâmetros originalmente apresentados no capítulo 7 (modelo de síntese) foi conduzida.

O objetivo desta primeira varredura é determinar se há “estreitamento” dos intervalos limites das variáveis, dentro do espaço de soluções viáveis, e se há restrições inativas. Assim, é possível focar uma varredura posterior em uma região mais específica do espaço de projeto.

Nessa primeira iteração um total de 500 alternativas de projeto foram geradas por meio da técnica SOBOL¹⁶⁴. Essas soluções foram submetidas a um processo de otimização via *NSGA II*, em um total de 60 gerações. Dessa forma, aproximadamente 30 mil alternativas de projeto foram analisadas.

Observaram-se, ao final do processo, os seguintes resultados:

- a) 7918 soluções viáveis dentre as 27944 analisadas (28,3% de viáveis);
- b) Na região viável, houve restrição dos limites de três variáveis de projeto conforme valores apresentados na Tabela 40;

¹⁶⁴ Nesta, e nas demais iterações, o tamanho da população inicial foi arbitrariamente definido.

- c) Os valores dos atributos de interesse, dentro da região viável, variaram conforme apresentado na Tabela 41;
- d) A restrição g_{13} não foi violada por nenhuma das alternativas, as demais foram violadas conforme descrito na Tabela 42.

Tabela 40 – Variáveis de projeto (intervalos viáveis)

Variável	Descrição	Intervalo viável
D	diâmetro do submarino [m]	6,0 – 7,3
L	comprimento do submarino [m]	62,8 – 88,0
MOD	profundidade de operação [m]	200 – 350

Tabela 41 – Variação dos atributos de interesse (soluções viáveis)

Atributo	Descrição	Soluções viáveis
$\Delta\uparrow$	deslocamento de superfície [t]	1425 - 2965
A_{sub}	alcance submerso [MN]	95 - 408
IR	taxa de indiscrição	5,51% – 12,0%
RA_{mix}	raio de ação em trânsito misto [MN]	2511 - 7430
v_{max}	velocidade máxima [kt]	15,0 – 18,6
CBCC	custo [MUS\$]	293,3 – 623,9
OMOE	Medida Geral de Efetividade	0,15 – 0,62

Além disso, o número de alternativas de projeto inviabilizadas por cada restrição, ou por um par de restrições correlatas, é exposto na Tabela 42. Cumpre notar que uma mesma alternativa pode violar mais de uma restrição.

Tabela 42 – Restrições violadas

nº	Descrição	Nr. de soluções que a(s) violaram
g ₁ e g ₂	Espaço longitudinal e transversal suficientes para comportar as respectivas demandas	9021
g ₃ e g ₄	Razão comprimento/diâmetro no intervalo desejado	1531
g ₅ e g ₆	Volume disponível maior que e próximo do volume demandado	15512
g ₇	Deslocamento de superfície dentro limite máximo estipulado	362
g ₈ e g ₉	Lastro fixo entre 10% e 20% do deslocamento de superfície	12465
g ₁₀	Taxa de indiscrição igual ou menor que a requerida	1832
g ₁₁	Velocidade máxima igual ou superior à requerida	3148
g ₁₂	Raio de ação misto igual ou superior ao requerido	448
g ₁₄ e g ₁₅	Estabilidade direcional mínima nos planos horizontal e vertical	6189
g ₁₆	Custo inferior a 1,05 do patamar máximo estabelecido	91

9.2.2 Análise dos resultados obtidos – Bateria 1

Para a discussão dos resultados, o espaço total de soluções (viáveis e inviáveis) será denominado S_t . O espaço de soluções viáveis será denominado S_v .

Da análise das restrições, observa-se que g_{13} pode ser descartada ou reformulada; já que em S_t , o menor valor de A_{sub} foi de 62 MN e em S_v , o menor valor de A_{sub} foi 95 MN.

Em S_v , os patamares superiores de autonomia submersa e raio de ação misto excedem os valores desejáveis descritos nos Requisitos de Estado Maior. Em termos de efetividade, esses excessos não contribuem para aumento de *OMOE*, já que o VP desses atributos será unitário a partir dos valores desejáveis expressos nos REM ($A_{sub} = 300$ e $RA_{mix} = 6000$)¹⁶⁵.

¹⁶⁵ Uma opção no caso seria reformular o cálculo da *OMOE* para diferenciar as soluções. Optou-se, entretanto, em manter essas “margens” em relação ao requisitado nos REM. Em um projeto real, esses “ganhos” adicionais poderiam ser apresentados ao cliente como melhorias alcançadas pelo projeto. Em outra perspectiva, eles podem

Observa-se que as restrições mais violadas foram as relativas aos percentuais de demanda por espaço interno (g_5 e g_6) e de lastro fixo (g_8 e g_9). Da observação dos resultados do ModeFRONTIER[®], verifica-se que em 5573 soluções inviáveis¹⁶⁶ esses pares são violados em conjunto¹⁶⁷. Esse “acoplamento” entre tais restrições já era esperado. De fato, soluções com excesso de volume (g_5) acarretam uma força de flutuação maior, que terá que ser compensada por um aumento de lastro fixo. Nessas soluções, haverá tendência de que g_9 seja violada. O “acoplamento” entre g_6 e g_8 se dá de maneira análoga porém alternativa (i.e. soluções com oferta escassa de volume interno apresentarão uma força de flutuação reduzida, acompanhada de conseqüente diminuição do peso de lastro fixo).

Seguem-se as restrições relativas à demanda por espaço longitudinal e transversal (g_1 e g_2) e relativas à estabilidade direcional (g_{14} e g_{15}). Verifica-se, aqui, que em 3076 soluções inviáveis¹⁶⁸ esses pares são violados em conjunto (i.e. essas soluções têm deficiência de espaço longitudinal/transversal e violaram também os critérios de estabilidade direcional). Isso decorre, muito provavelmente, das combinações de L e D presentes nas soluções geometricamente inviáveis: elas não só são insuficientes para prover espaço interno adequado, mas também conduzem a geometrias desfavoráveis em termos de manobrabilidade. Frise-se que as equações de Minnick [53] foram derivadas de submarinos existentes (logo, viáveis do ponto de vista de espaço interno).

Com relação ao deslocamento de superfície, embora g_7 tenha sido violada em S_t , ela não limita S_v . Em realidade, o maior deslocamento encontrado entre as soluções viáveis foi de 2965 t (aquém do limite de 3500 t).

Em primeira análise, seria razoável supor que a restrição de custo máximo, g_{16} , estaria limitando o deslocamento das soluções (pois navios maiores tendem a possuir maiores valores para os grupos de peso e, conseqüentemente, maiores

ser usados como “margem” para soluções de compromisso (i.e. podem ser reduzidos sem afetar negativamente a *OMOE* em detrimento de outros atributos de interesse).

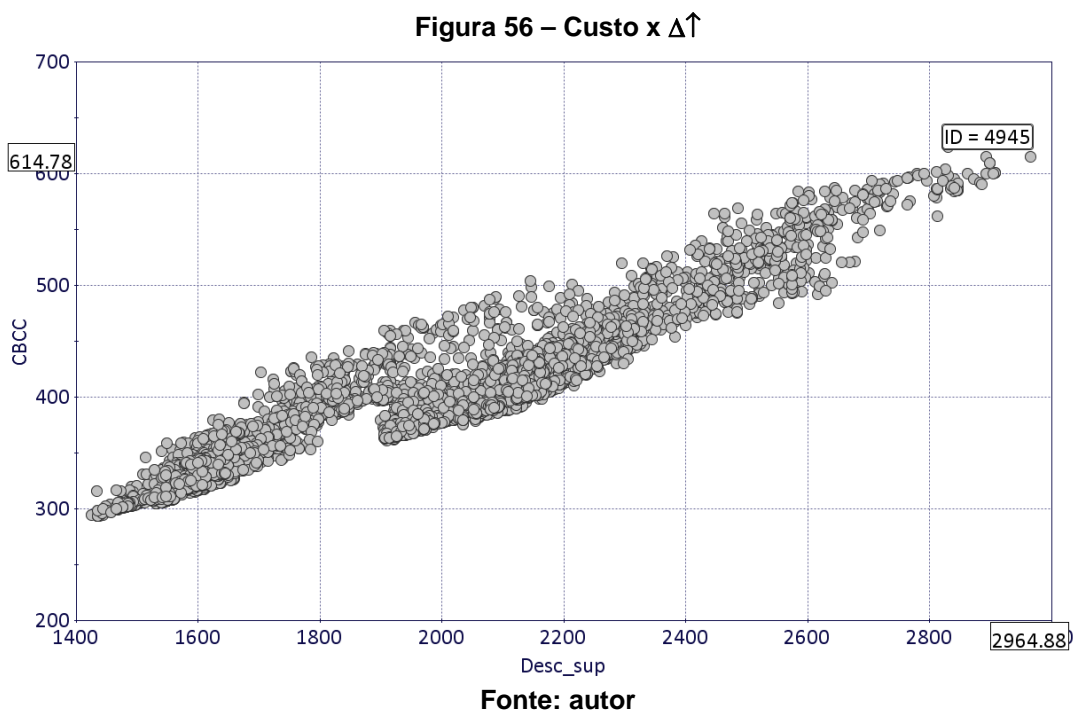
¹⁶⁶ Isto representa 27,8% do total de soluções inviáveis (20026 soluções).

¹⁶⁷ Isto é, soluções que possuem relação demanda/oferta de volume fora do intervalo entre 90% e 98% e peso de lastro fixo em relação a $\Delta\uparrow$ fora do intervalo entre 10% e 20%.

¹⁶⁸ Isto representa 15,4% do total de soluções inviáveis (20026 soluções).

custos). De fato, verifica-se certa proporcionalidade entre deslocamento e custo na varredura, conforme ilustrado na Figura 56 (apenas S_v é retratado).

Entretanto, apesar de o maior custo viável encontrado, 623,96 MUS\$, ser próximo do da solução com maior $\Delta\hat{\uparrow}$ (a solução 4945¹⁶⁹ com 2965 t e custo de 614,78 MUS\$), ele está longe do patamar máximo estabelecido em g_{16} .



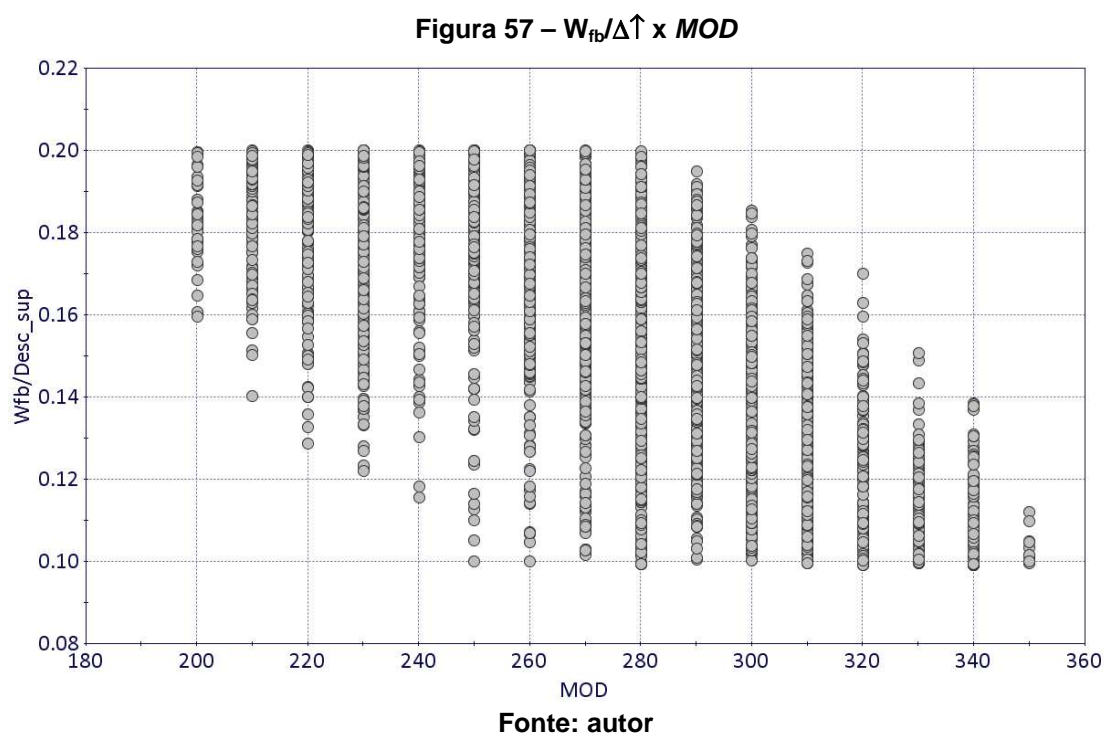
Dessa forma, a explicação mais plausível para a limitação do deslocamento de superfície reside na restrição g_6 . Ela opera, em essência, limitando o volume dos CR's, e conseqüentemente o tamanho dos submarinos, ao tamanho necessário para atender às demandas por volume interno¹⁷⁰.

De fato, no caso da solução 4945 as demandas por volume interno (V_{int} e V_{tank}) totalizam 2482 m³, enquanto V_{cr} é de 2754 m³. Assim, a demanda por volume representa um total de 90,1% do volume do casco resistente. Como o limite dado por g_6 para a relação demanda/oferta de volume interno é de 90%, o navio não poderia ser maior (pois isso reduziria tal relação, ferindo g_6). Por exemplo, um aumento no comprimento da 4945 de 86,7 para 86,8 metros faria com que essa relação caísse para 89,9%, tornando a solução inviável.

¹⁶⁹ De forma a permitir a reprodução dos cálculos por leitores eventualmente interessados, o Apêndice K traz a descrição (variáveis de entrada) de todas as soluções discutidas neste capítulo.

¹⁷⁰ O que é a essência da abordagem “volume limitado” do projeto. Ou seja, a priori o tamanho do submarino deve se limitar ao estritamente necessário para atender às demandas de volume interno.

Por fim, cabe foco sobre os valores de MOD obtidos no domínio viável. O valor máximo obtido foi 350 m. Novamente, há certa distância entre o limite máximo desta variável (400 m) e o máximo valor viável obtido. A questão que se coloca é qual restrição, ou restrições, impede(m) que soluções viáveis com maiores valores de MOD sejam encontradas.



A Figura 57 ilustra os valores de MOD e os respectivos valores de $W_{fb}/\Delta\hat{\uparrow}$ para as soluções viáveis. Observa-se que na profundidade de operação de 200 metros a relação entre o lastro fixo e o deslocamento de superfície excursions entre 0,16 e 0,20. Conforme MOD aumenta, a amplitude dessa excursão cresce até contemplar toda a faixa prevista pelas restrições g_8 e g_9 (0,10 a 0,20). Isso ocorre nas MOD de 250 a 280 m. A partir daí, aumentos de MOD passam a restringir a faixa de variação de $W_{fb}/\Delta\hat{\uparrow}$, que atinge um mínimo (0,100 a 0,112) na profundidade de 350 m.

Um exercício interessante consiste em aumentar o valor de MOD de dada solução até que alguma restrição seja violada. Intuitivamente, pode-se supor que o peso estrutural aumentará, o que forçará uma redução de lastro fixo, até que o valor inferior ao limite preconizado por g_8 seja atingido. Tomando a solução de maior $W_{fb}/\Delta\hat{\uparrow}$ para a MOD máxima (solução 3637), aumentos na profundidade de

operação têm, sobre o lastro fixo, os efeitos listados na Tabela 43. A cada 10 metros adicionais de MOD uma redução de 1,15% no percentual de lastro fixo ocorreu. A solução é inviável em 370 m.

Tabela 43 – Efeitos do aumento de MOD sobre o percentual de lastro fixo

Solução <u>3637</u>	
MOD	W _{fb} /Δ↑ (%)
350	11,19
360	10,04
<u>370</u>	<u>8,89</u>

A explicação para a limitação da MOD é um pouco mais complexa que a da limitação do deslocamento de superfície, mas parece também estar associada à g₆. De fato, no caso da solução 3637 a relação entre a demanda/oferta de volume interno é de 90,46%, muito próxima do limite mínimo estabelecido por g₆. É possível que soluções com maior volume “livre”, por possuírem maior flutuação, sejam capazes de comportar maior aumento do peso estrutural, associado a um aumento de MOD, sem violar g₈ (i.e. percentual de lastro fixo acima do preconizado). Assim, em teoria, permitir que as alternativas tenham maior volume livre pode ter o efeito subsidiário de aumentar o valor de MOD das soluções viáveis. De qualquer modo, essa é uma hipótese que precisa ser testada.

Diante dos resultados obtidos na Bateria 1, as seguintes alterações foram feitas nos limites das variáveis e nas restrições do problema:

Tabela 44 - Restrições

nº	Forma matemática	Descrição
g ₆	$\frac{\sum V_{\text{int}} + \sum v_{\text{tank}}}{V_{\text{cr}}} \geq 0,80$	Volume demandado próximo ao volume disponível (essa restrição visa a descartar soluções com subaproveitamento de volume interno, mas foi relaxada em relação à formulação da Bateria 1)
g ₉	$W_{\text{fb}} \leq 0,25\Delta \uparrow$	Lastro fixo não superior a 25% do deslocamento de superfície (a mudança nesta restrição visa a acompanhar o aumento do limite de espaço “livre” permitido pela alteração de g ₆)
g ₁₃	$A_{\text{sub}} \geq 100$	Alcance submerso igual ou superior a 100 MN (essa restrição não se mostrou ativa na busca da Bateria 1, de forma que seu limite foi reformulado)

9.2.3 Nova exploração do espaço de soluções – Bateria 2

Nessa nova iteração manteve-se um total de 500 alternativas de projeto geradas por meio da técnica SOBOL. Entretanto, as soluções viáveis da Bateria 1 com *OMOE* maior que 0,60 e custo inferior a 450 MUS\$ foram também incorporadas às soluções iniciais dessa segunda Bateria.

Dessa forma, o experimento se iniciou com 824 alternativas para análise. Essas soluções foram submetidas a um processo de otimização via *NSGA II*, em um total de 50 gerações. Assim, analisou-se um número aproximado de 50 mil alternativas de projeto, reduzidas para cerca de 30 mil após filtragem de alternativas idênticas.

Observaram-se, ao final do processo, os seguintes resultados:

- 11811 soluções viáveis dentre as 30283 analisadas (39% de viáveis);
- Na região viável, houve restrição dos limites de duas variáveis de projeto conforme valores apresentados na Tabela 45;
- Os valores dos atributos de interesse, dentro da região viável, variaram conforme apresentado na Tabela 46;
- As violações de restrições são apresentadas na Tabela 47.

Tabela 45 – Variáveis de projeto (intervalos viáveis)

Variável	Descrição	Intervalo viável
D	diâmetro do submarino [m]	6,2 – 7,7
L	comprimento do submarino [m]	64,2 – 91,3

Tabela 46 – Variação dos atributos de interesse (soluções viáveis)

Atributo	Descrição	Soluções viáveis
$\Delta\uparrow$	deslocamento de superfície [t]	1517 - 3059
A_{sub}	alcance submerso [MN]	100 - 364
IR	taxa de indiscrição	5,45% – 12,0%
RA_{mix}	raio de ação em trânsito misto [MN]	2540 - 7349
v_{max}	velocidade máxima [kt]	15,0 – 17,6
CBCC	custo [MUS\$]	299,5 – 648,5
<i>OMOE</i>	Medida Geral de Efetividade	0,20 – 0,63

Além disso, o número de alternativas de projeto inviabilizadas por cada restrição, ou por um par de restrições correlatas, é exposto na Tabela 47. Cumpre notar que uma mesma alternativa pode violar mais de uma restrição.

Tabela 47 – Restrições violadas

nº	Descrição	Nr. de soluções que a(s) violaram
g ₁ e g ₂	Espaço longitudinal e transversal suficientes para comportar as respectivas demandas	6892
g ₃ e g ₄	Razão comprimento/diâmetro no intervalo desejado	1780
g ₅ e g ₆	Volume disponível maior que e próximo do volume demandado	13556
g ₇	Deslocamento de superfície dentro limite máximo estipulado	2200
g ₈ e g ₉	Lastro fixo entre 10% e 20% do deslocamento de superfície	7447
g ₁₀	Taxa de indiscrição dentro do limite máximo estipulado	1486
g ₁₁	Velocidade máxima igual ou superior à requerida	1001
g ₁₂	Raio de ação misto igual ou superior ao requerido	708
g ₁₃	Alcance submerso igual ou superior ao requerido	601
g ₁₄ e g ₁₅	Estabilidade direcional mínima nos planos horizontal e vertical	4543
g ₁₆	Custo inferior a 1,05 do patamar máximo estabelecido	15

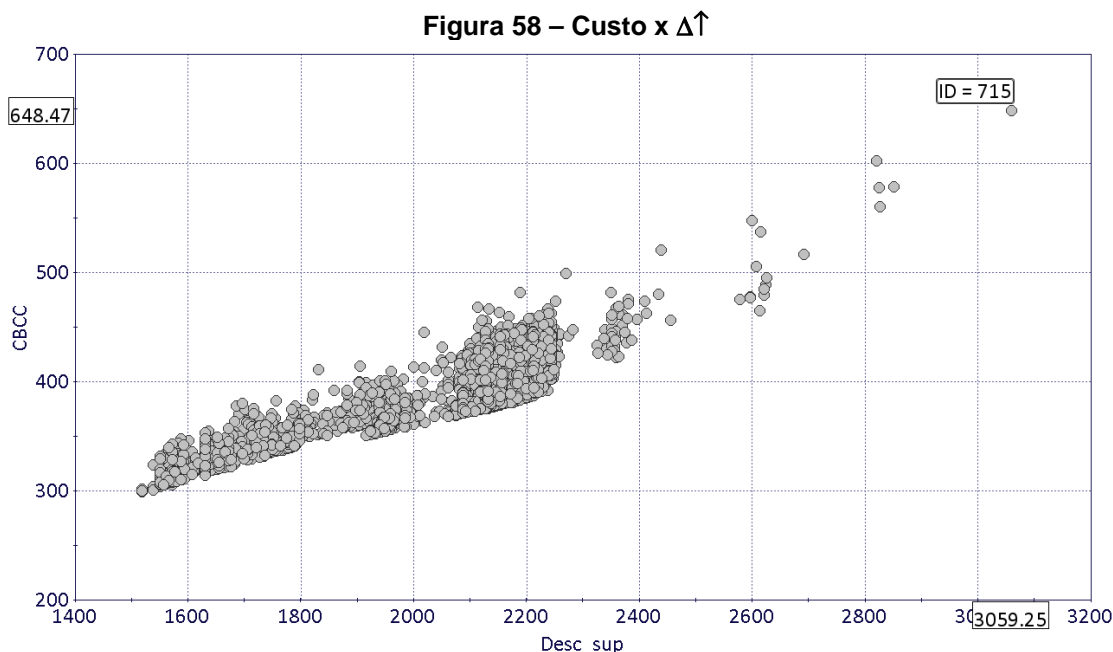
9.2.4 Análise dos resultados obtidos – Bateria 2

Com os novos limites estabelecidos, verifica-se que g₁₃ tornou-se ativa. Permanecem como restrições mais violadas os pares g₅/g₆ e g₈/g₉, (violadas em conjunto em 5250 soluções inviáveis¹⁷¹). Seguem-se os pares g₁/g₂ e g₁₄/g₁₅ com respectivo “acoplamento” (violação conjunta em 1485 soluções inviáveis¹⁷²).

¹⁷¹ Isto representa 28,4% do total de soluções inviáveis (18472 soluções).

¹⁷² Isto representa 8,0% do total de soluções inviáveis (18472 soluções).

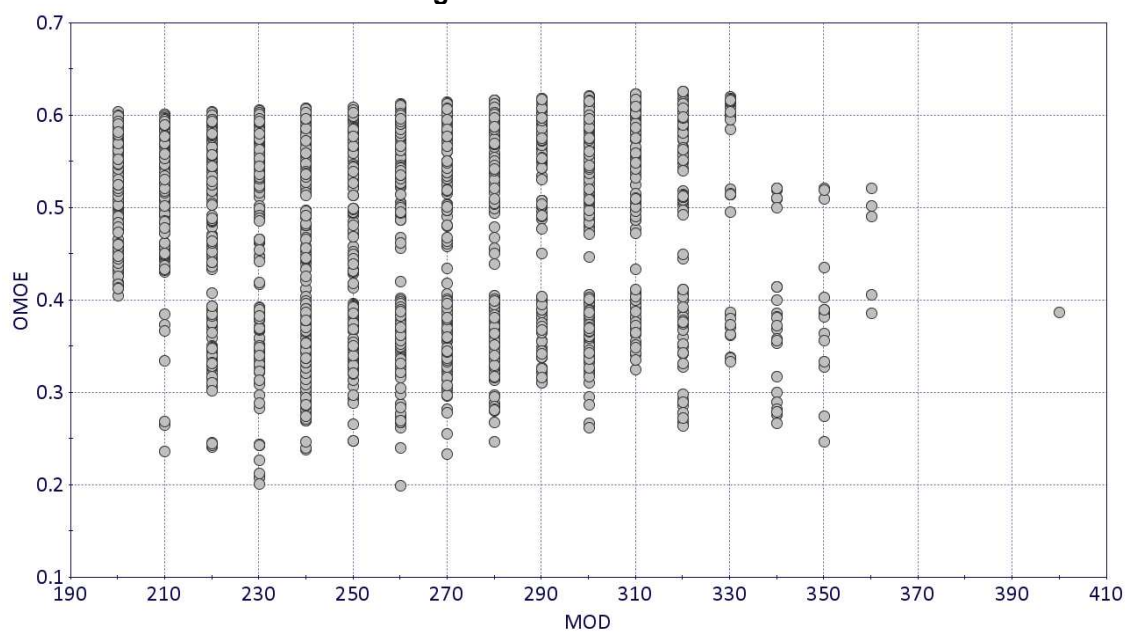
Nesta Bateria, g_7 continua violada em S_t sem limitar S_v (vide Figura 58 na qual S_v é retratado).



Fonte: autor

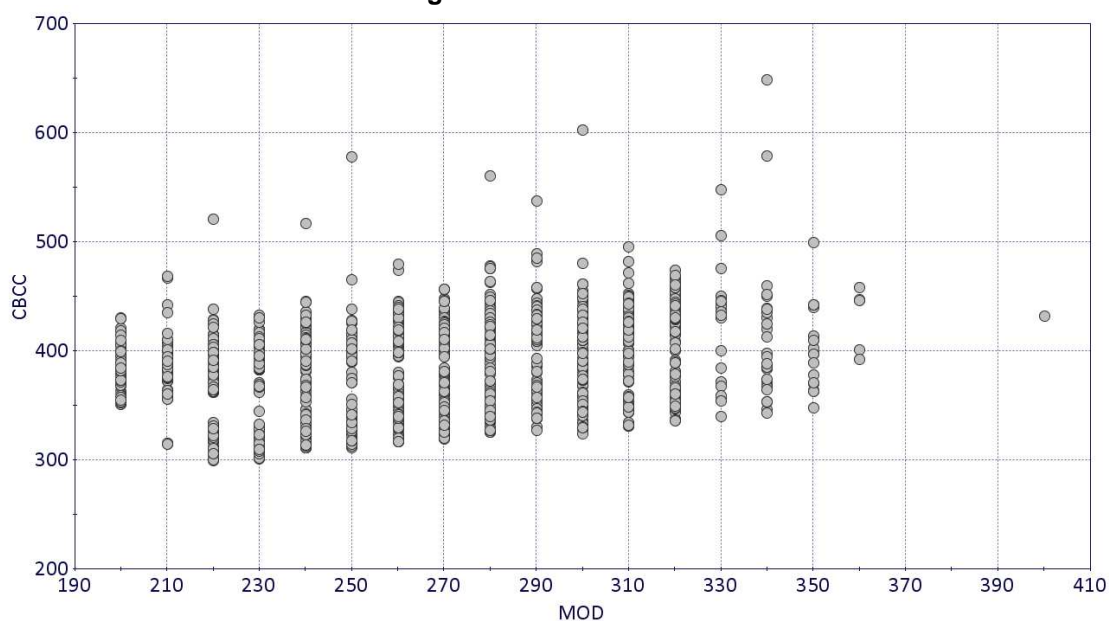
O maior deslocamento de superfície encontrado é da solução 715 (3059 t, que representa um aumento de 94 t em relação ao maior deslocamento da Bateria 1). Essa solução possui também o maior custo e comprimento encontrados (648,47 MUS\$ e 91,3 m). Na 715 as demandas por volume interno totalizam 2341 m³, enquanto V_{cr} é de 2842 m³ (a demanda representa 82,4% de V_{cr}). O novo limite dado por g_6 é de 80%. O comprimento da 715 pode ser aumentado de 91,3 até 93,9 metros ($\Delta\hat{\uparrow} = 3173$ t) sem inviabilizar a solução. A partir de 94 metros, a solução tornar-se-ia inviável, com a relação entre oferta/demanda de volume reduzida a 79,9%.

No caso da *MOD*, o relaxamento de g_6 permitiu que o valor máximo de 400 m fosse atingido nesta Bateria (o que corrobora a hipótese anterior de que g_6 limitava indiretamente o valor de *MOD*). Entretanto, cabe a questão quanto a esse aumento de *MOD* ter se traduzido em alguma vantagem em termos dos objetivos buscados na otimização. Neste sentido, as figuras 59 e 60 retratam os valores de *OMOE* e *CBCC* versus *MOD* em S_v .

Figura 59 – *OMOE x MOD*

Fonte: autor

Observa-se que soluções de alta efetividade (maior que 0,6) são encontradas em toda a faixa de *MOD* entre 200 e 330 metros. A partir de 340 metros a efetividade máxima se reduz para aproximadamente 0,5, tornando-se menor que 0,4 em 400 m.

Figura 60 – *CBCC x MOD*

Fonte: autor

Quanto ao custo, uma associação categórica entre ele e a *MOD* não pode ser estabelecida a partir do gráfico. Percebe-se, entretanto, que os valores mínimos de custo para cada valor de *MOD* crescem de 300 para 430 milhões entre 220 e 400 metros.

Ou seja, na Bateria 2 a tendência foi de que um aumento de *MOD* se associasse a aumentos de custo e diminuição de efetividade¹⁷³.

Para a próxima Bateria optou-se por manter as formulações das restrições usadas na Bateria 2. Os limites das variáveis *L* e *D* foram reduzidos conforme a Tabela 48. Deve-se notar que essa redefinição de *L* e *D*, automaticamente, torna g_3 inativa (já que o *L/D* mínimo no domínio de busca será 7,75).

Tabela 48 – Novos limites de D e L

Variável	Descrição	Intervalo
D	diâmetro do submarino [m]	6,0 – 8,0
L	comprimento do submarino [m]	62,0 – 95,0

9.2.5 Exploração detalhada do espaço de soluções – Bateria 3

Essa iteração envolveu 1000 alternativas de projeto geradas via SOBOL adicionadas às soluções não dominadas da Bateria 2 (119). Assim, o experimento se iniciou com 1119 alternativas para análise, submetidas a um processo de otimização via *NSGA II* de 100 gerações (resultando em análise de cerca de 110 mil alternativas, reduzidas a cerca de 70 mil após filtragem de alternativas idênticas).

Os seguintes resultados foram obtidos:

- a) 24397 soluções viáveis dentre as 73571 analisadas (33,2% de viáveis);
- b) Na região viável, houve restrição apenas do valor de *L* (64,5 a 94,5 m). e *MOD* (200 a 390 m). Entretanto, a análise dos resultados anteriores aponta que pode haver soluções viáveis dentro dos intervalos inicialmente definidos para a Bateria 3;

¹⁷³ Isso já era esperado. No caso do custo (em geral): o aumento de *MOD* implica em um aumento do peso estrutural, que deverá ser equilibrado por um aumento de deslocamento (ou redução de W_{fb}). O aumento do deslocamento implica em aumento de outros grupos de peso e conseqüentemente do custo. No caso da efetividade, grosso modo, uma maior *MOD* contribui para um aumento de *OMOE* mas o aumento de deslocamento associado em geral implica em redução da velocidade e possível aumento da taxa de indiscrição (ambos os fatores contribuindo para uma redução da *OMOE*).

- c) Os valores dos atributos de interesse, dentro da região viável, variaram conforme apresentado na Tabela 49;
- d) As restrições foram violadas conforme descrito na Tabela 50. Ressalta-se que no par g_3/g_4 apenas g_4 é violada.

Tabela 49 – Variação dos atributos de interesse e objetivos (soluções viáveis)

Atributo	Descrição	Soluções viáveis
$\Delta\uparrow$	deslocamento de superfície [t]	1452 – 3438
A_{sub}	alcance submerso [MN]	100 – 406
IR	taxa de indiscrição	5,37% – 12,0%
RA_{mix}	raio de ação em trânsito misto [MN]	2500 – 7422
V_{max}	velocidade máxima [kt]	15,0 – 18,5
CBCC	custo [MUS\$]	288,1 – 730,1
OMOE	Medida Geral de Efetividade	0,12 – 0,63

Além disso, o número de alternativas de projeto inviabilizadas por cada restrição, ou por um par de restrições correlatas, é exposto na Tabela 50. Cumpre notar que uma mesma alternativa pode violar mais de uma restrição.

Tabela 50 – Restrições violadas

(continua)

nº	Descrição	Nr. de soluções que a(s) violaram
g_1 e g_2	Espaço longitudinal e transversal suficientes para comportar as respectivas demandas	16879
g_3 e g_4	Razão comprimento/diâmetro no intervalo desejado	748
g_5 e g_6	Volume disponível maior que e próximo do volume demandado	36762
g_7	Deslocamento de superfície dentro limite máximo estipulado	43
g_8 e g_9	Lastro fixo entre 10% e 20% do deslocamento de superfície	17802
g_{10}	Taxa de indiscrição dentro do limite máximo estipulado	1644
g_{11}	Velocidade máxima igual ou superior à requerida	5090
g_{12}	Raio de ação misto igual ou superior ao requerido	464

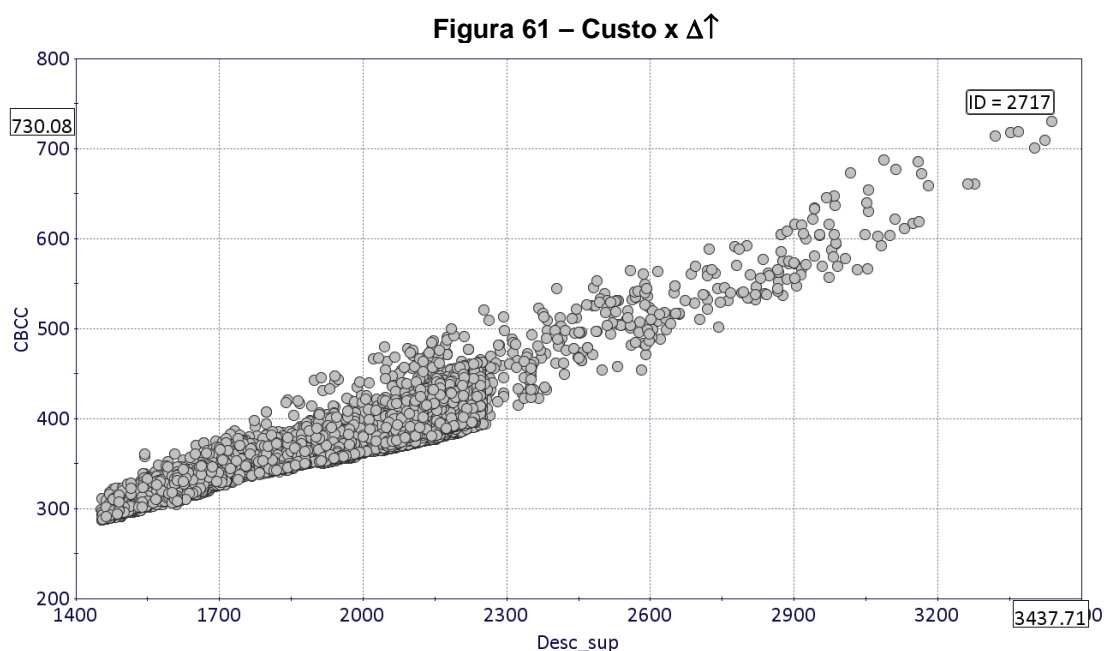
Tabela 50 – Restrições violadas

(conclusão)

nº	Descrição	Nr. de soluções que a(s) violaram
g ₁₃	Alcance submerso igual ou superior ao requerido	266
g ₁₄ e g ₁₅	Estabilidade direcional mínima nos planos horizontal e vertical	6082
g ₁₆	Custo inferior a 1,05 do patamar máximo estabelecido	2

9.2.6 Análise dos resultados obtidos – Bateria 3

Nesta Bateria g₃ tornou-se inativa. Permanecem como restrições mais violadas os pares g₅/g₆ e g₈/g₉, (violadas em conjunto em 13843 soluções inviáveis¹⁷⁴). Seguem-se os pares g₁/g₂ e g₁₄/g₁₅ (violação conjunta em 4063 soluções inviáveis¹⁷⁵). Os maiores deslocamento e custo encontrados são os da solução 2717 (3438 t e 730,08 MUS\$) conforme apresentado na Figura 61.



Fonte: autor

¹⁷⁴ Isto representa 28,2% do total de soluções inviáveis (49174 soluções).

¹⁷⁵ Isto representa 8,3% do total de soluções inviáveis (49174 soluções).

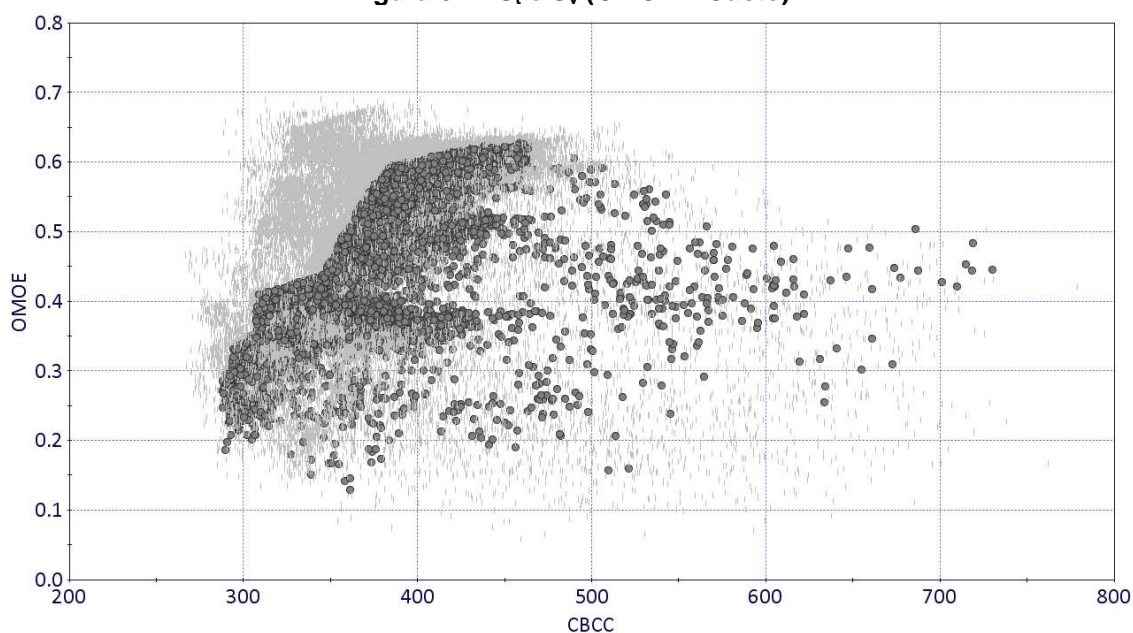
A Tabela 51 apresenta a variação dos atributos de interesse ao longo das três Baterias.

Tabela 51 – Evolução dos atributos de interesse e objetivos entre Baterias (soluções viáveis)

Atributo	Bateria 1	Bateria 2	Bateria 3
$\Delta\hat{\uparrow}$ (max) [t]	2965	3059	3438
A_{sub} (max) [MN]	408	364	406
IR (min)	5,51%	5,45%	5,37%
RA_{mix} (max) [MN]	7430	7349	7422
v_{max} [kt]	18,6	17,6	18,5
CBCC (min) [MUS\$]	293,3	299,5	288,1
OMOE (max)	0,62	0,63	0,63

Houve aumento expressivo em $\Delta\hat{\uparrow}$ entre as Baterias 2 e 3. Muito embora a mudança de g_6 e g_9 tenha ocorrido já a partir da Bateria 2, o número de soluções pesquisadas foi bem maior na Bateria 3. Isso permitiu que regiões viáveis com soluções de maior deslocamento fossem mais extensivamente exploradas, o que provavelmente explica o aumento. Além disso, ocorreu suave decréscimo no valor de IR mínimo (novamente, a explicação reside provavelmente na busca mais detalhada realizada na Bateria 3). As demais variáveis não sofreram variações significativas entre as Baterias.

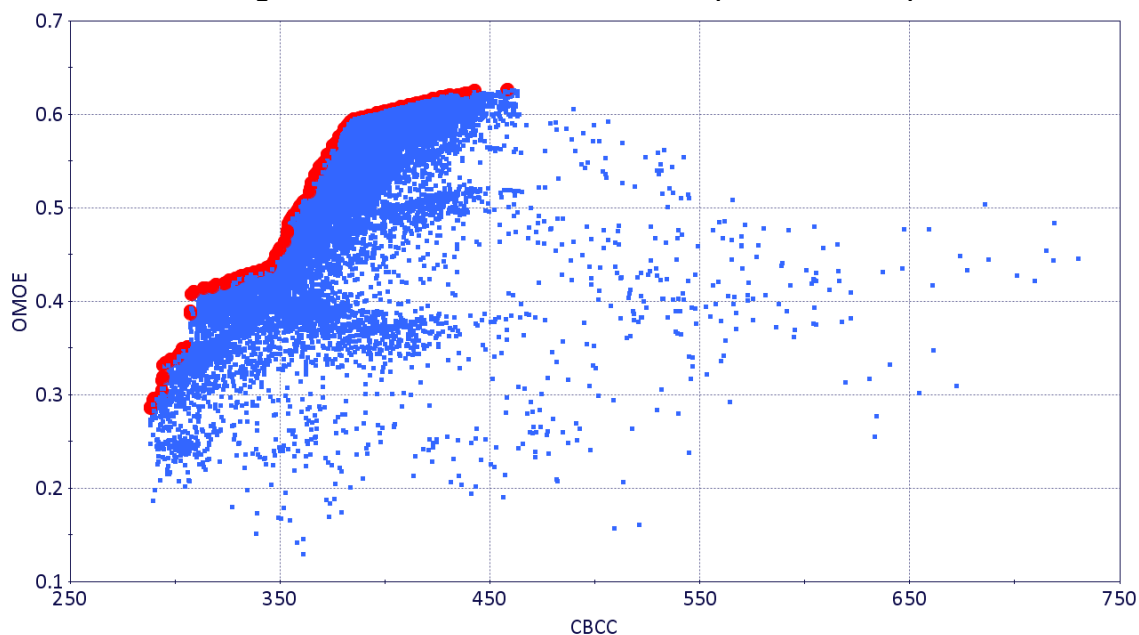
Figura 62 – S_t e S_v (OMOE x Custo)



Fonte: autor

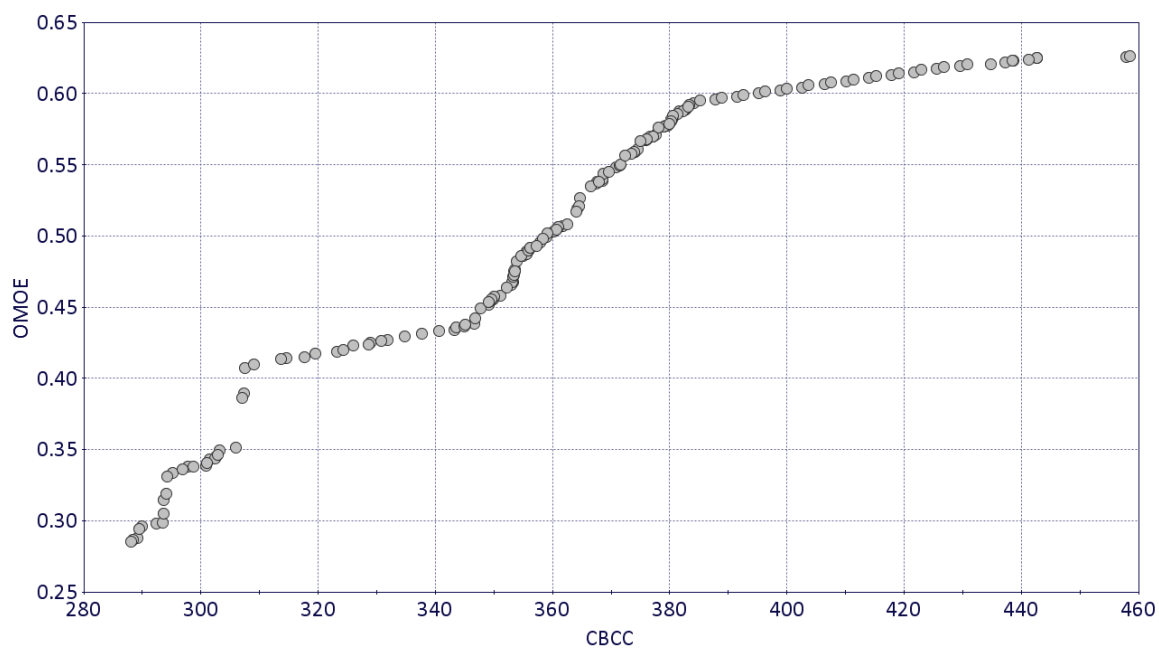
St e Sv, em termos de *OMOE* x Custo são representados na Figura 62. Os pontos escuros preenchidos representam soluções viáveis. Os traços verticais claros são soluções inviáveis. A Figura 63 destaca, em vermelho, a Fronteira de Pareto obtida no espaço de soluções viáveis (S_v) da Bateria 3. Ela é apresentada isoladamente na Figura 64.

Figura 63 – Fronteira de Pareto em S_v (*OMOE* x Custo)



Fonte: autor

Figura 64 – Fronteira de Pareto em S_v (*OMOE* x Custo)



Fonte: autor

A Fronteira de Pareto possui 167 soluções não dominadas. Nela, algumas variáveis tiveram seus intervalos limitados, conforme a Tabela 52.

Tabela 52 – Limitação dos intervalos das variáveis (Fronteira de Pareto)

Variável	Descrição	Intervalo/Valor
D	diâmetro do submarino [m]	6,2 – 6,7
L	comprimento do submarino [m]	65,2 – 78,8
n_a	fator de forma AR	2,8 - 3,9
sail	configuração da vela	2 - 4
BAT	bateria	2
DG	Diesel Gerador	2 - 3
MEP	Motor Elétrico de Propulsão	1
n_{cell}	número de células de bateria	2 x 180
COM	sistema de comunicações	1
EW	sistema MAGE	1
PM	sistema integrado de gerenciamento da plataforma	2 - 3
C_{man}	coeficiente de automação do submarino	0,5
MOD	profundidade de operação [m]	200 – 320

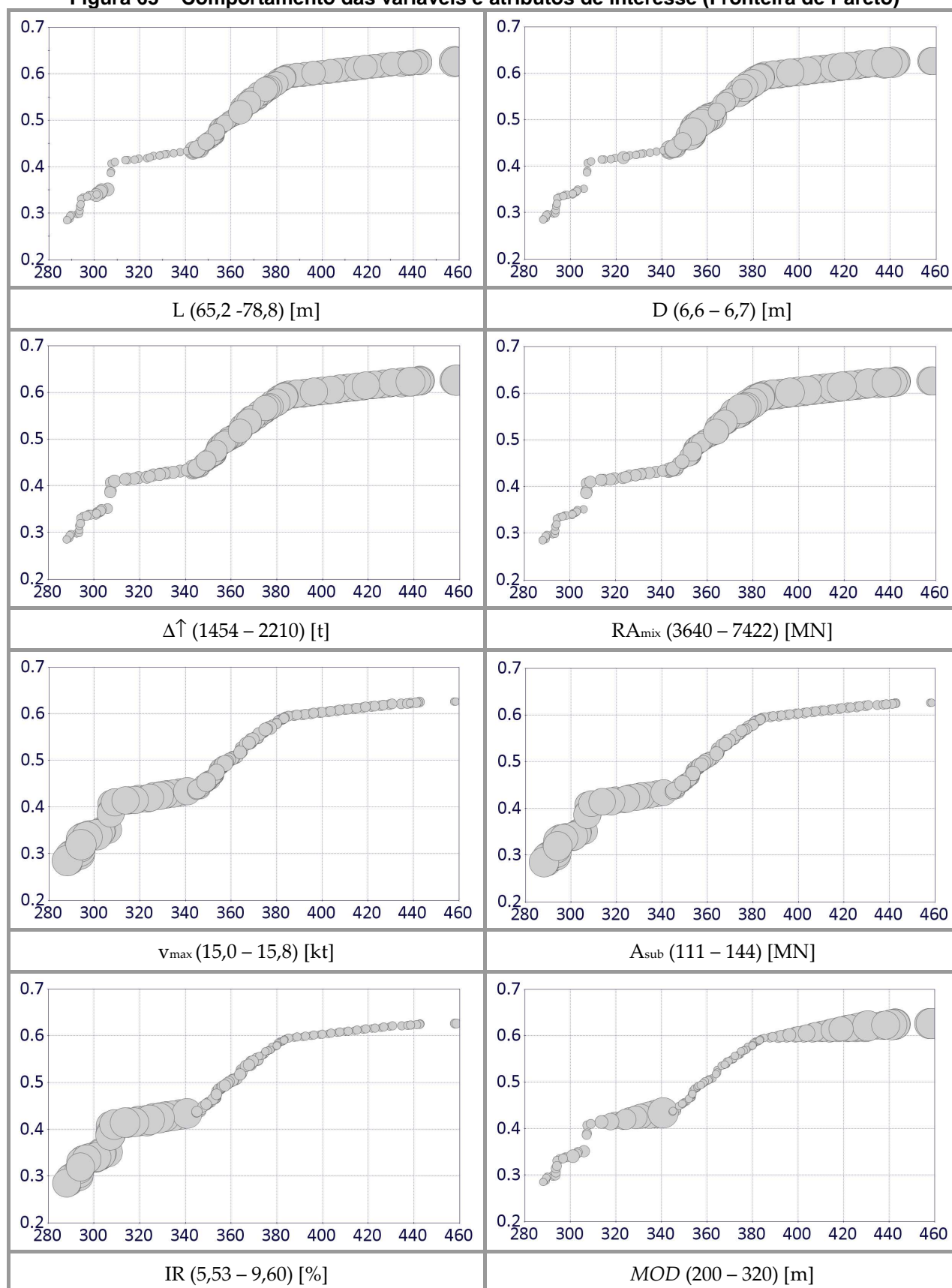
O valor dos atributos na Fronteira de Pareto são dados na Tabela 53.

Tabela 53 – Variação dos atributos de interesse (Fronteira de Pareto)

Atributo	Descrição	Fronteira
$\Delta \uparrow$	deslocamento de superfície [t]	1454 – 2210
A_{sub}	alcance submerso [MN]	111 – 144
IR	taxa de indiscrição	5,53% – 9,60%
RA_{mix}	raio de ação em trânsito misto [MN]	3640 – 7422
v_{max}	velocidade máxima [kt]	15,0 – 15,8
CBCC	custo [MUS\$]	288,1 – 730,1
OMOE	Medida Geral de Efetividade	0,12 – 0,63

O comportamento de algumas variáveis e dos atributos de interesse, ao longo da fronteira, é indicado pelos gráficos bolha da Figura 65. Os eixos são OMOE x Custo e o aumento do diâmetro das bolhas representa aumento nas variáveis listadas.

Figura 65 – Comportamento das variáveis e atributos de interesse (Fronteira de Pareto)



Como esperado, soluções com maiores L , D e (consequentemente) $\Delta\hat{\uparrow}$ possuem maior custo. Essas características estão implicitamente associadas a aumentos de efetividade. Isto decorre, dentre outros motivos, de sua ligação intrínseca com o atributo RA_{mix} .

Maiores raios de ação contribuem para o aumento da efetividade. Entretanto, aumentar RA_{mix} implica em aumentar a demanda por combustível a bordo e, consequentemente, o tamanho do navio (L , D e $\Delta\hat{\uparrow}$), o que resulta em aumentos de custo.

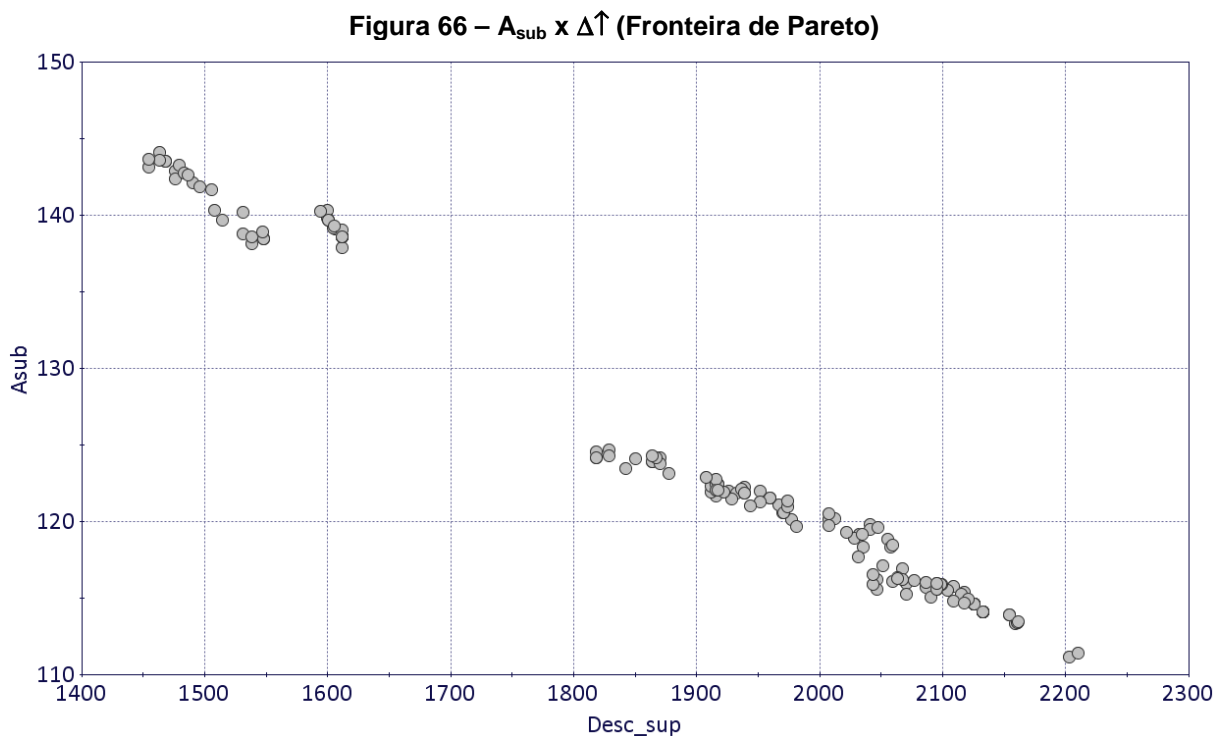
É importante ressaltar que todas as soluções na Fronteira de Pareto possuem a mesma potência de MEP instalada e o mesmo número de baterias. Tal fato é de interesse para a análise dos atributos v_{max} e A_{sub} . É mister salientar que v_{max} praticamente não varia (variação inferior a 1 nó).

Com a mesma potência de MEP, navios menores, por ter menor resistência ao avanço, terão maior velocidade. Daí, o comportamento de v_{max} é inverso ao de $\Delta\hat{\uparrow}$ (que, como discutido, está associado a RA_{mix}). Muito embora v_{max} contribua para a efetividade, sua parcela de contribuição é inferior à de RA_{mix} (ambos atributos da performance de mobilidade)¹⁷⁶.

O atributo A_{sub} decresce à medida que aumentam $OMOE$ e custo¹⁷⁷. Novamente, esse decrescimento está na realidade associado ao aumento de $\Delta\hat{\uparrow}$ (devido ao aumento da resistência ao avanço e diminuição da velocidade). Assim, o comportamento de A_{sub} é inverso ao de $\Delta\hat{\uparrow}$. A situação é graficamente demonstrada na Figura 66.

¹⁷⁶ Observe que a máxima MP de v_{max} nesta fronteira será de 0,080. Por outro lado, a MP de RA_{mix} será de no mínimo 0,326. Tomando os coeficientes da Tabela 87, é possível verificar que a contribuição máxima de v_{max} para a $OMOE$ será de 0,00158 pontos, enquanto a contribuição mínima de RA_{mix} será de 0,00645 pontos.

¹⁷⁷ A contribuição de A_{sub} para a $OMOE$ acaba ofuscada pela de outros atributos que melhoram com o aumento do deslocamento, como menores taxas de indiscrição e maiores raios de ação. Assim, mesmo com a diminuição de A_{sub} nas soluções de maior deslocamento, no geral, persiste o aumento de $OMOE$.



A diminuição da taxa de indiscrição contribui para o aumento da efetividade e está associada, no problema em tela, a aumentos de custo. Essa segunda associação decorre, novamente, do elo implícito entre IR e $\Delta \uparrow$. A relação inversa entre essas variáveis pode parecer contraintuitiva à primeira vista (i.e. mantidos constantes o número de baterias e a potência instalada de MEP para todas as soluções da fronteira, navios menores, por possuírem menor carga hotel e resistência ao avanço, deveriam possuir menor taxa de indiscrição). A resposta a essa aparente contradição reside no número de diesel-geradores. Uma maior potência instalada de DG's permite carga mais rápida de baterias, o que diminui o tempo em esnorquel e reduz a taxa de indiscrição. Entretanto, aumentar o número de DG's implica em aumentar a demanda por espaço interno e o tamanho do submarino. Daí a evidenciada associação entre menores taxas de indiscrição (maior efetividade) e maiores deslocamentos (maiores custos). De fato, a Figura 67 ilustra essa associação, enquanto o gráfico de eixos paralelos da Figura 68 demonstra que ela decorre na realidade do aumento do número de DG's (valores menores de IR associados a 4 DG's e valores maiores associados a 2 DG's).

Figura 67 – Comportamento de IR e n_{DG} (Fronteira de Pareto)

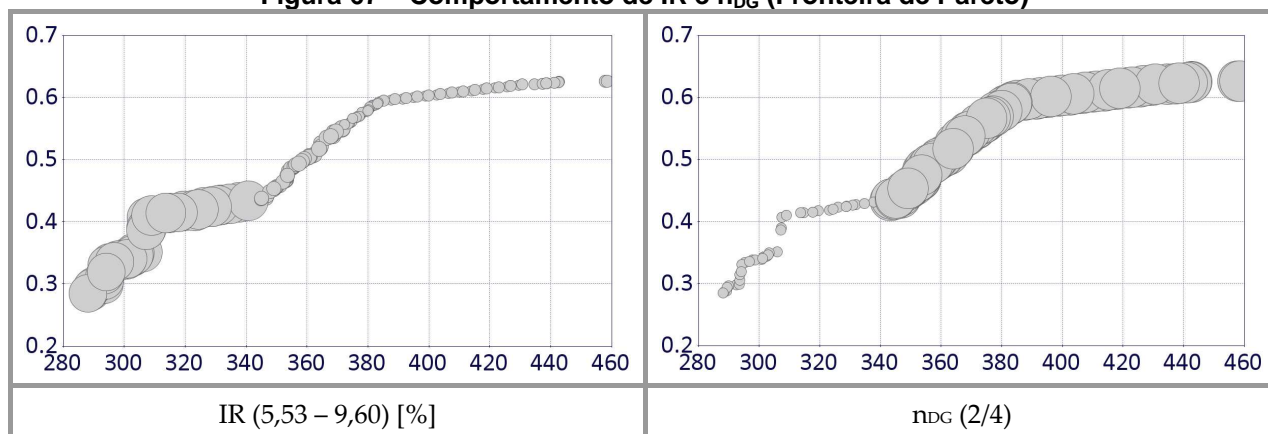
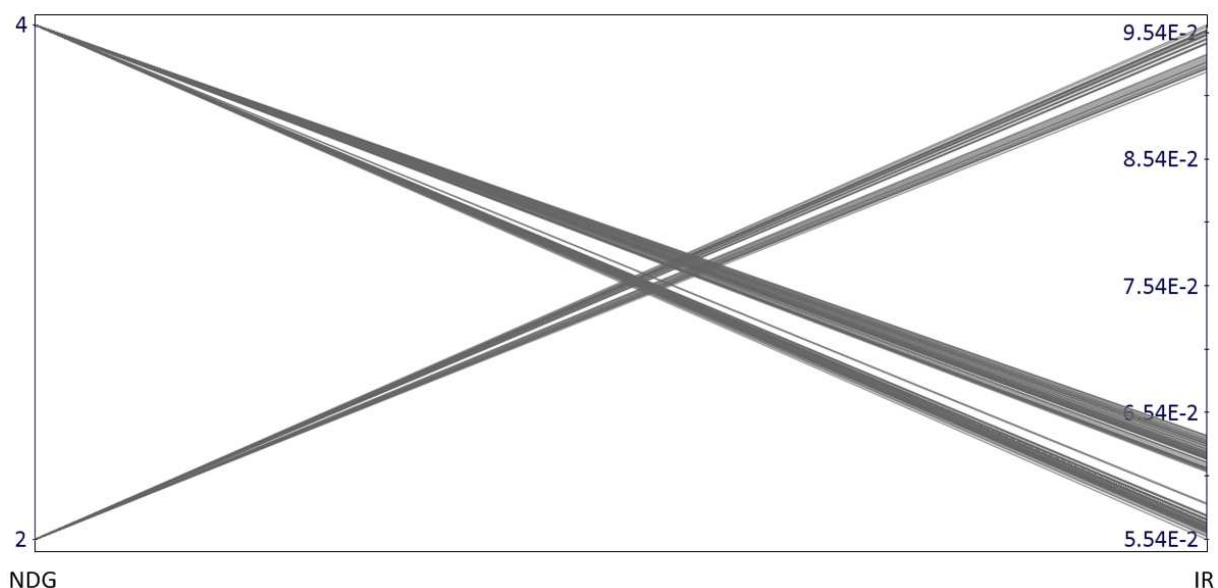


Figura 68 – Relação entre IR e n_{DG} (Fronteira de Pareto)



Por fim, a variação de MOD parece errática ao longo da fronteira (Figura 65) e não pode ser categoricamente associada ao aumento/diminuição de efetividade e custo.

Voltando à Fronteira de Pareto, observa-se, das inclinações nos diversos trechos da curva, que ela apresenta três regiões de crescimento acentuado de $OMOE$ e quatro regiões onde esse crescimento é mais suave. Cada região é aproximadamente delimitada pelas soluções indicadas na Tabela 54 e na Figura 69 (extremos), para as quais os valores de $OMOE$ e custo são apresentados.

Figura 69 – Soluções na Fronteira de Pareto (extremos)

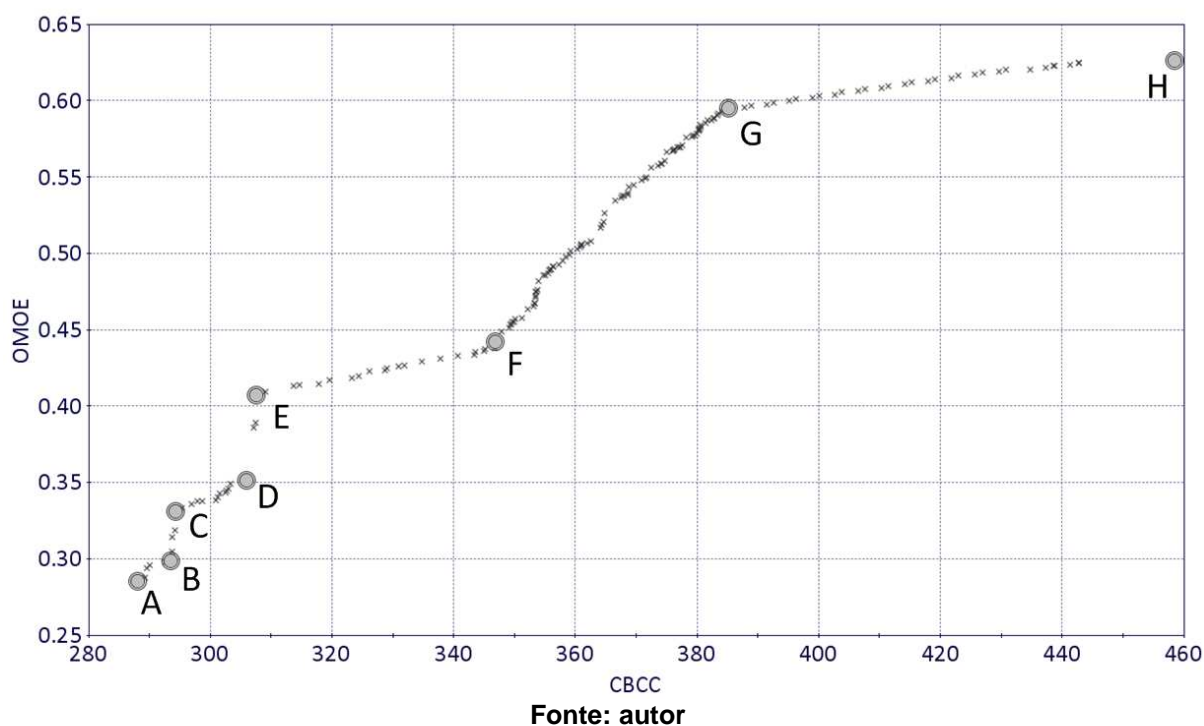


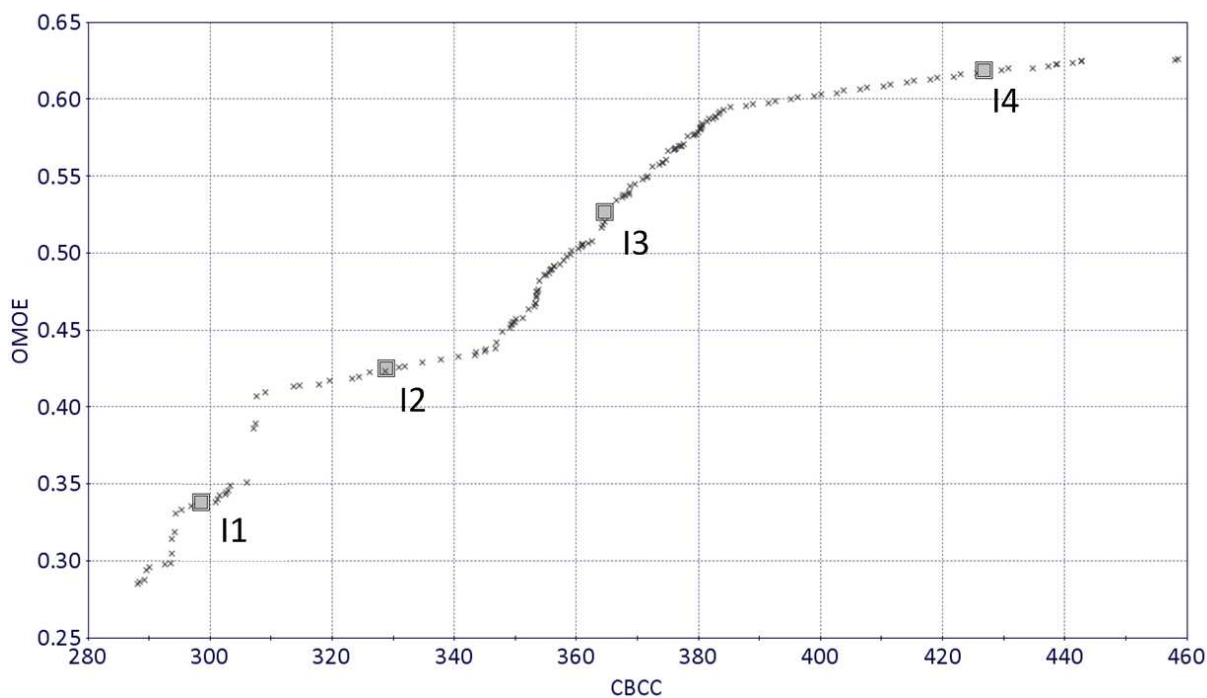
Tabela 54 – Algumas soluções da Fronteira de Pareto

Solução	A	B	C	D	E	F	G	H
OMOIE	0,285	0,299	0,331	0,352	0,407	0,443	0,595	0,627
CBCC	288,1	293,4	294,2	305,8	307,4	346,8	385,1	458,4

A solução A é a de menor custo e menor efetividade. A solução H é a de maior efetividade e maior custo. Nas regiões de inclinação acentuada, pequenas variações de custo representam variações consideráveis em efetividade (e.g. B-C, D-E e menos notadamente em F-G).

Em tese, as soluções na região média das áreas de pequena inclinação podem representar bons compromissos entre custo e efetividade. Soluções nessas regiões são indicadas na Figura 70 e detalhadas na Tabela 55.

Figura 70 – Soluções candidatas



Fonte: autor

Tabela 55 – Soluções candidatas

Variável/Atributo	<u>I1</u>	<u>I2</u>	<u>I3</u>	<u>I4</u>
L [m]	66,0	65,4	74,8	75,0
D [m]	6,2	6,2	6,4	6,6
$\Delta \hat{\uparrow}$ [t]	1514	1611	2012	2132
A_{sub} [MN]	139	138	120	114
IR	9,48%	9,55%	6,27%	5,69%
RA_{mix} [MN]	3679	4613	6552	7227
v_{max} [kt]	15,7	15,7	15,2	15,1
CBCC [MUS\$]	298,60	328,85	364,65	426,72
OMOE	0,338	0,425	0,527	0,619

Com base na Fronteira de Pareto apresentada, pode-se decidir sobre qual solução adotar. Na prática, esta etapa envolve considerações multidisciplinares e eventual detalhamento da busca sobre certas regiões do espaço viável. Para o propósito desta dissertação, qualquer das soluções apresentadas na Tabela 55 é adequada ao prosseguimento da análise. Aqui, a solução I4 é arbitrariamente escolhida como configuração base.

9.3 Otimização estrutural

Uma otimização estrutural foi conduzida a partir da configuração base (I4)¹⁷⁸. Os intervalos de variação e valores fixos são apresentados na Tabela 56. O modelo de análise estrutural é descrito no Apêndice E.

Tabela 56 – Análise estrutural

Variáveis de Projeto				Parâmetros do Modelo		
Var.	Definição	Valor		Par.	Definição	Valor
D	diâmetro do submarino [m]	6,6		ν	coeficiente de Poisson	0,3
L	comprimento do submarino [m]	75,0		ρ_s	densidade do aço [kg/m ³]	7850
L_{cil}	comprimento do trecho cilíndrico do CR [m]	56,6		ρ_{sw}	densidade da água do mar [kg/m ³]	1025
				σ_y	tensão de escoamento do aço (MPa)	559
Var.	Definição	Min	Máx	E	Módulo de Young (GPa) do aço	206
b_f	largura do flange [m]	0,100	0,450	g	aceleração da gravidade [m/s ²]	9,81
d	espessura do flange [m]	0,010	0,080	k_{61}	fator de segurança (profundidade de colapso)	1,5
h_w	altura da alma [m]	0,100	0,250			
L_f	espaçamento de cavernas [m]	0,450	1,000			
t	espessura do casco [m]	0,010	0,080			
t_w	espessura da alma [m]	0,010	0,080			
MOD	profundidade de operação [m]	310	350			

O processo de otimização poderia ser formulado fixando a *MOD* (em 310 m) e buscando minimização do peso do casco. Entretanto, procura-se verificar se há aumento possível de *MOD* sem impacto considerável no peso estrutural. O peso estimado do casco da I4 é 421 t. Admite-se um aumento de 5% nesse valor como restrição no processo de otimização. Daí, o problema é formulado como:

Minimizar $W_{casco}(x)$;

Maximizar $MOD(x)$;

Sujeito a:

$$g_j(x) \geq 0 \quad j = 1 \dots 7;$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i = 1, 2, \dots 7.$$

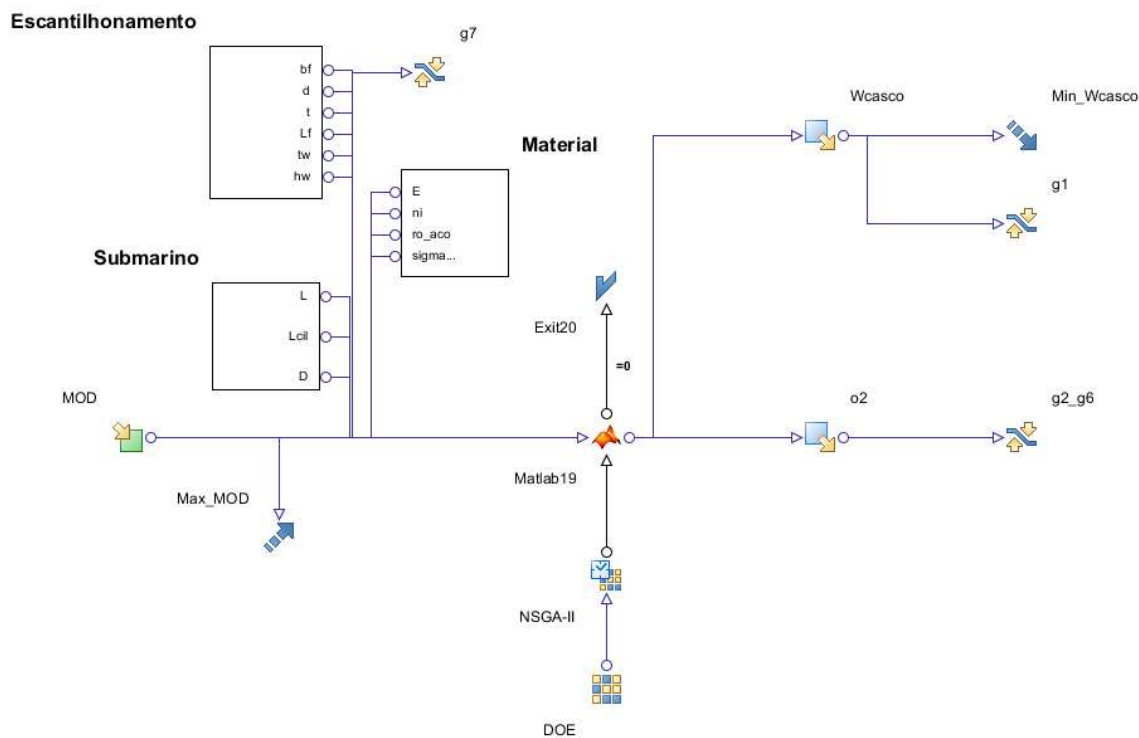
¹⁷⁸ Ressalta-se que o processo de otimização e os resultados obtidos não contemplam as especificidades listadas no item 5.4.5 (e.g. análise de fadiga, reforços internos, penetrações no casco, etc.)

As restrições utilizadas no modelo são descritas na Tabela 57. O modelo de integração no ModeFRONTIER® é apresentado na Figura 71.

Tabela 57 - Restrições

nº	Forma matemática	Descrição
g ¹	$W_{\text{casco}} \leq 442$	Peso do casco [t] não superior a 1,05 do da configuração base
g ²	$p_y \geq p_{\text{col}}$	Pressão de escoamento entre cavernas maior que a pressão de colapso
g ³ e g ⁴	$p_b \in [1,5p_{\text{col}}; 2,5p_{\text{col}}]$	Pressão de flambagem entre cavernas na faixa preconizada
g ⁵	$p_b \geq p_y$	Pressão de flambagem maior ou igual à pressão de escoamento
g ⁶	$p_{\text{cr}} \geq p_b$	Pressão de colapso global maior ou igual à pressão de flambagem
g ⁷	$L_f - b_f \geq 0,12$	Restrição de proximidade entre cavernas.

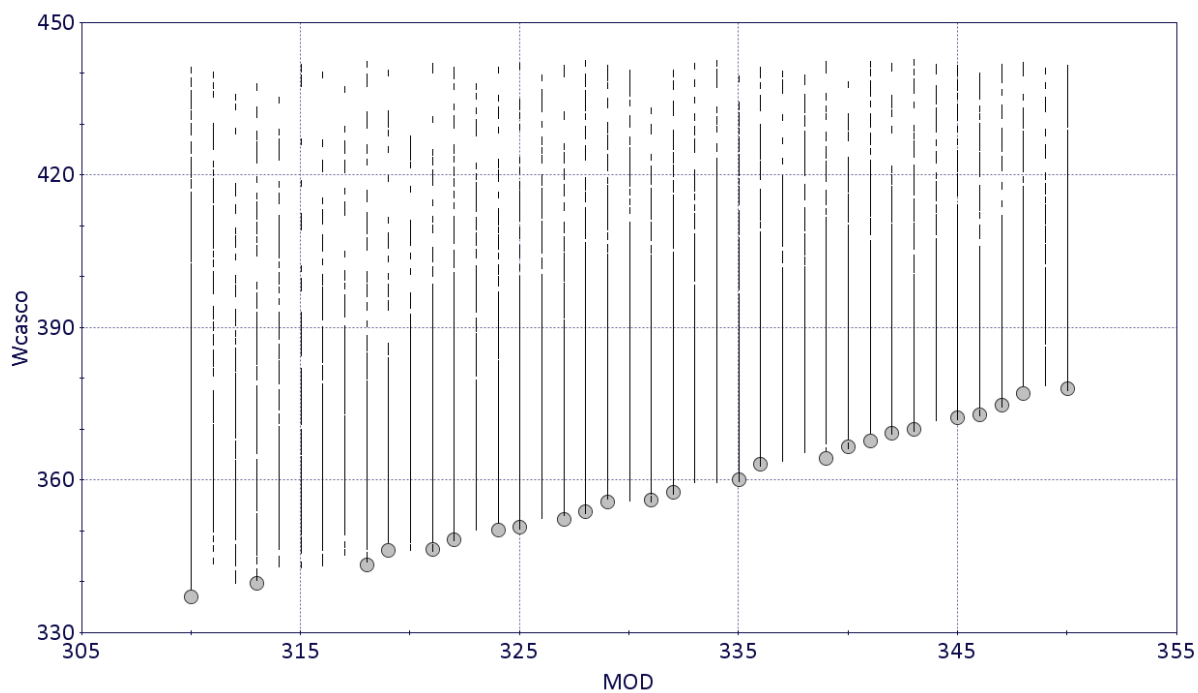
Figura 71 – Modelo de Otimização Estrutural (ModeFRONTIER®)



Fonte: autor

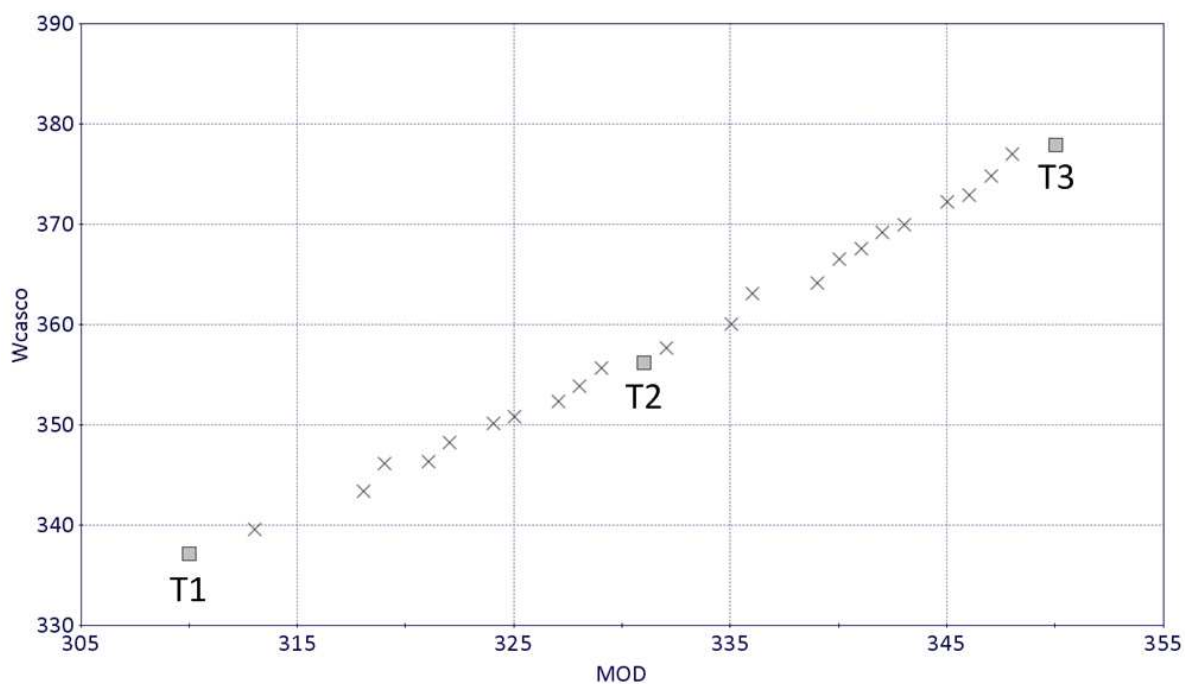
Os resultados obtidos são retratados na Figura 72. Ela apresenta 10163 escantilhamentos viáveis (traços verticais na figura) dentre os 22 mil analisados. Soluções não dominadas são indicadas por círculos preenchidos. A Fronteira de Pareto obtida é destacada na Figura 73.

Figura 72 – $W_{\text{casco}} \times MOD$



Fonte: autor

Figura 73 – Fronteira de Pareto (Otimização Estrutural)



Fonte: autor

No escantilhamento T1, mantida a *MOD* de 310 m, obtém-se uma redução de 20% no peso do casco. No T3 há aumento de 13% em profundidade e redução de 10% no peso do casco. Os escantilhonamentos destacados são apresentados na Tabela 58.

Tabela 58 – Alguns escantilhonamentos (Fronteira de Pareto)

Var.	Definição	T1	T2	T3
b_f	largura do flange [m]	0,120	0,100	0,102
d	espessura do flange [m]	0,029	0,039	0,045
h_w	altura da alma [m]	0,250	0,249	0,249
L_f	espaçamento de cavernas [m]	0,510	0,500	0,500
t	espessura do casco [m]	0,023	0,024	0,025
t_w	espessura da alma [m]	0,010	0,010	0,010
<i>MOD</i>	profundidade de operação [m]	310	331	350
W_{casco}	peso do casco [t]	337	356	378
ΔW_{casco}	diminuição do peso do casco [t]	84	65	43

Cumprir notar a natureza conservadora do método de estimativa de peso do casco inicialmente utilizado (ver discussão do Apêndice E). Observa-se que, após a otimização estrutural, redução considerável de peso pode ser obtida. Na prática, caberia ao projetista analisar qual a melhor linha de ação a adotar com relação ao “ganho” decorrente da redução de peso¹⁷⁹.

Outra opção, seria a adaptação do equacionamento de proposto no Apêndice E para a estimativa do peso do casco. Por exemplo, tomando a 14 e mantida a profundidade de operação em 310 m, a mera alteração do fator k_{62} poderia aproximar a estimativa inicial ao valor “otimizado” (337 t), sem ferir a viabilidade da solução (Tabela 59).

¹⁷⁹ Em primeira análise, mantidas as dimensões do navio e a flutuação original, a redução do peso estrutural se traduzirá em um aumento de lastro fixo (para manter o equilíbrio do navio: assim, W_A não é alterado pela otimização estrutural). Por si só, a diminuição do peso estrutural já resultará em uma diminuição de custo, mesmo sem alteração de W_A . Alternativa mais elegante consistiria em avaliar possíveis aumentos de *MOD*, em contraponto à redução de peso, estabelecendo soluções de compromisso (custo x *OMOE*).

Tabela 59 – Adaptações possíveis de k_{62}

k_{62}	0,90	0,85	0,80	0,75
W_{casco} [t]	421	395	369	344
$W_{\text{fb}}/\Delta\uparrow$ [%]	11,5	13,4	15,2	16,9
MOD [m]	310	310	310	310
CBCC [MUS\$]	462,72	420,72	414,78	408,90
OMOE	0,619	0,619	0,619	0,619

Neste trabalho, optou-se por manter a natureza conservadora da estimativa inicial do peso do casco (adotada durante a otimização multiobjetivo).

9.4 Detalhamento preliminar da configuração base

Os detalhamento preliminar da configuração base (I4) é apresentado no Apêndice L. Algumas mudanças, discutidas naquele apêndice, foram feitas na configuração base, gerando uma nova configuração denominada S4. As tabelas seguintes apresentam ambas as configurações, sendo as alterações ressaltadas.

Tabela 60 – Comparação I4 e S4 (variáveis de entrada)

Variável	I4	S4	Variável	I4	S4
BAT	2	2	N_{esp}	12	12
CA	1	1	OPT	1	1
COM	1	1	PM	2	2
C_{man}	0,5	0,5	RD	1	1
D	6,6	6,6	SAT	1	1
DA	1	1	T_{pat}	50	50
DG	3	3	n_a	3,5	3,5
EW	1	1	n_{cell}	360	360
FTA	1	1	n_{DG}	4	4
L	75,0	74,0	n_f	4,0	4,0
MEP	1	1	n_{rlt}	18	18
MOA	1	1	n_{wlt}	4	6
MOD	310	350	sail	2	2

Tabela 61 – Comparação I4 e S4 (pesos [t] e volumes [m³])

Pesos					
Variável	I4	S4	Variável	I4	S4
W ₁	737,6	697,5	W ₅	148,4	146,8
W ₂	379,6	319,6	W ₆	74,0	72,5
W ₃	64,2	62,5	W ₇	37,7	50,3
W ₄	31,7	31,1	W _{fb}	245,7	300,0
W _A	1658,8	1680,3			
W _{LDT}	437,4	390,9			
W _N	2132,3	2071,2			
Volume					
Variável	I4	S4			
V _{cr/CR}	1981	1924			
V _{env}	2238	2235			
V _{MBT}	213	215			

Tabela 62 – Evolução dos atributos de interesse entre Baterias (soluções viáveis)

Atributo	I4	S4
$\Delta \uparrow$ [t]	2132	2071
A _{sub} [MN]	114	120
IR	5,69%	5,43%
RA _{mix} [MN]	7227	5326
v _{max} [kt]	15,1	15,8
CBCC [MUS\$]	426,72	424,22
OMOE	0,619	0,644

O S4 tem menor comprimento, um número maior de tubos e uma profundidade de operação maior (Tabela 60). Com exceção de W₇ (que aumentou devido ao maior número de tubos adotado no S4), seus grupos de peso são também menores; reflexo do menor deslocamento e, no caso do grupo 1, da otimização estrutural.

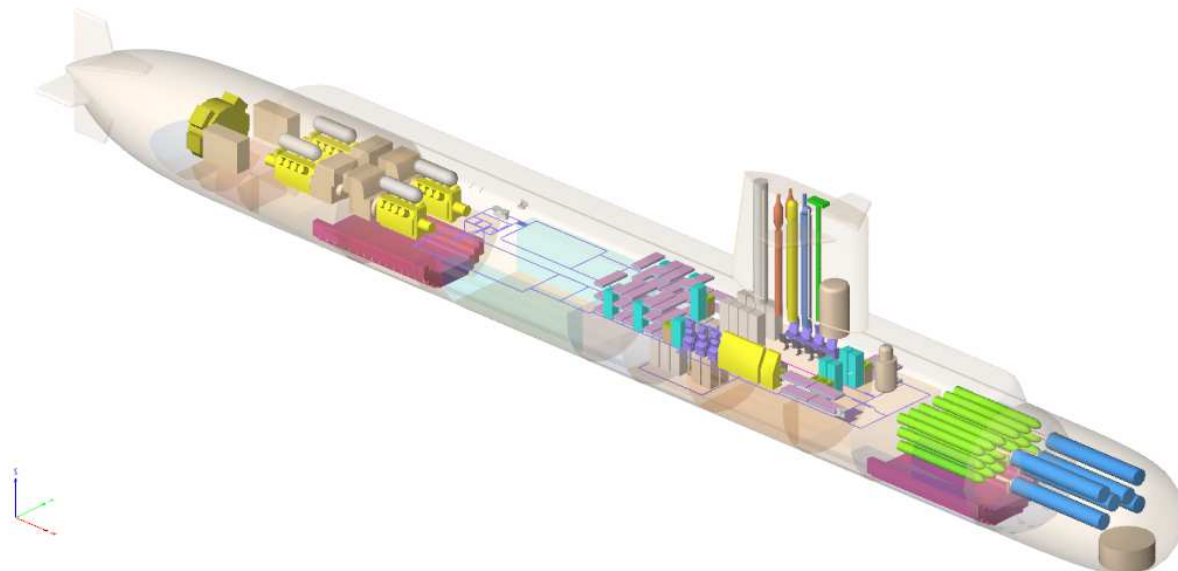
Seu peso de lastro fixo é maior (reflexo da diminuição de W_{A1}), enquanto seu peso de cargas variáveis é menor.

Houve melhoria dos atributos (exceto pela diminuição do raio de ação em trânsito misto, ocasionada pela redução do combustível a bordo). O custo sofreu leve redução (0,6%) e a efetividade aumentou (cerca de 4%)¹⁸⁰.

¹⁸⁰ Se analisado via modelo de síntese, o S4 ferirá g₁ pois o comprimento crítico calculado será de 54,60 m e o comprimento do casco resistente é de 54,42 m. Obviamente, isto pode ser negligenciado uma vez que o arranjo preliminar do navio já mostrou a viabilidade em termos de espaço longitudinal.

O submarino é apresentado na Figura 74.

Figura 74 – S4



Fonte: autor

9.5 Comparação do S4 com navios existentes

Por fim, cabe análise da solução S4 em relação a navios existentes. Para tanto, seis submarinos foram selecionados [1]. Os dados comparativos são apresentados na Tabela 63, dispostos em ordem crescente de $\Delta\uparrow$. Os dados de custo foram obtidos da referência [56], ou em sites especializados¹⁸¹. Nesse segundo caso, os dados são marcados com uma interrogação.

Há que se ressaltar a natureza hipotética dos equipamentos de propulsão e dos itens de *payload* adotados neste trabalho, o que tem implicações diretas nas performances estimadas para o S4. Qualquer comparação com navios existentes deve colocar tal fato em perspectiva apropriada.

¹⁸¹ Há, na internet, diversas informações esparsas sobre o custo de submarinos. Há pelo menos uma tentativa de concentrá-las, disponível em <https://newwars.wordpress.com/warship-costs/>. Obviamente, o grau de confiabilidade de tais fontes pode não ser dos mais altos.

Tabela 63 – Comparação com submarinos existentes

Variável/Atributo	Tikuna	Type 214	Scorpene	Dolphin	Sauro	S4	Kilo
D [m]	6,2	7,0	6,2	6,8	6,8	6,6	9,9
L [m]	62,0	57,0	67,6	57,3	66,4	74,0	73,8
$\Delta\uparrow$ [t]	1454	1490	1559	1640	1653	2071	2325
$\Delta\downarrow$ [t]	1586	1700	1758	1900	1862	2280	3076
A_{sub} [MN@kt]	400@4kt	??	360@4kt	420@8kt	250@4kt	120@4kt	400@3kt
MOD [m]	300	??	300	350	300	350	300
NT [tripulantes]	41	27	31	30	51	35	52
nwlt	8	6	6	6	6	6	6
P_{MEP} [kW]	??	2850	3200	2850	2300	2200	4340
RA_{mix} [MN@kt]	??	4000@8kt	??	4000@8kt	??	5328@5kt	3500@7kt
v_{max} [kt]	22	20	20	20	19	15,8	25
CBCC [MUS\$]	380	633	611	635 (?)	??	424	350 (?)

O S4 possui características situadas dentro do espectro definido pelos navios existentes. Destacam-se:

- A solução possui o segundo maior deslocamento de superfície entre os navios listados;
- O navio possui o menor alcance submerso listado;
- Sua profundidade de operação se iguala à maior listada (frise-se, entretanto, que os dados de *MOD* disponíveis em fonte aberta são, em geral, propositalmente distorcidos);
- Seu número de tripulantes se situa em patamar intermediário dentre os observados;
- O número de tubos é igual aos dos demais navios, exceto pelo Tikuna (variante nacional da classe *Type 209* alemã);
- O navio possui a menor potência de MEP instalada e a menor velocidade;
- O navio possui o maior raio de ação (5328 MN), porém cumprido à menor velocidade (5 kt);
- Seu custo se situa em nível intermediário dentre os observados.

O baixo alcance submerso pode ter origens diversas. No caso do S4, a bateria de menor capacidade dentre as disponíveis foi utilizada, logo há menor quantidade

de energia disponível para empreender a travessia submersa entre duas operações de esnorquel. Além disso, os métodos usados para estimar a resistência ao avanço e a carga hotel são aparentemente conservadores (i.e. eles resultam em maiores valores de consumo de energia pela propulsão e pelos demais utilizadores de bordo) e isso conduz a menores alcances submersos.

Quanto à velocidade reduzida, quando comparada com as dos navios existentes, há que se ressaltar que o S4 possui a menor potência de MEP listada e o segundo maior deslocamento (que se traduz em maior área molhada). Intuitivamente, isso já conduziria a valor menor de v_{max} .

Entretanto, a explicação pode também residir na natureza conservadora do método de estimativa. Nesse sentido, a velocidade do S4 foi estimada por dois métodos empíricos alternativos, listados no Apêndice M. Aqueles resultados apontam que o S4 poderia ter uma velocidade máxima maior (entre 17 e 18 kt).

De qualquer modo, os resultados alcançados não diferem expressivamente dos valores encontrados em navios semelhantes existentes. Essa constatação aponta no sentido de que o modelo de síntese e otimização empregado possui consistência apropriada aos propósitos de pesquisa desta dissertação. Ademais, com as devidas adaptações, o método poderia ser efetivamente aplicado em projetos de concepção reais.

(página deixada intencionalmente em branco)

10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

*Great treasure halls hath Zeus in heaven,
From whence to man strange dooms be given,
Past hope or fear.
And the end men looked for cometh not,
And a path is there where no man thought¹⁸².*

Eurípides, *Medeia*

Este capítulo apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

10.1 Conclusões

Conforme enunciado no capítulo 1, o principal objetivo desta pesquisa foi propor um modelo de síntese e otimização com múltiplos objetivos adequado ao projeto de concepção de submarinos convencionais.

O modelo de síntese/otimização foi apresentado nos capítulos 7 e 8 e sua aplicação foi discutida e demonstrada no capítulo 9.

Especificamente, foi possível verificar que as soluções não dominadas identificadas (ver Tabela 53) apresentaram atributos compatíveis com os encontrados em submarinos convencionais existentes [1]. O detalhamento de uma dessas soluções demonstrou sua viabilidade preliminar e, mais ainda, evidenciou que suas características situaram-se dentro do espectro definido pelas características de navios semelhantes (ver Tabela 63).

No que concerne à obtenção de alternativas de projeto viáveis e à investigação de soluções de compromisso, o modelo proposto permite:

¹⁸² “Grandes galerias de tesouros tem Zeus nos céus/De onde ao homem concede estranhas fatalidades/Muito além da esperança e do medo/E o fim que os homens procuravam não surgirá/E o caminho está lá onde nenhum homem imaginou” (Tradução livre).

1. A pronta identificação dos atributos e da viabilidade das alternativas de projeto (modelo de síntese);
2. A avaliação concisa da efetividade militar de dada solução, por meio de uma métrica que agrega uma multiplicidade de características de interesse (*OMOE* calculada via *AHP*);
3. A estimativa de custo do submarino já nas etapas iniciais do projeto;
4. A identificação das soluções não dominadas no espaço viável de projeto (otimização via algoritmos genéticos), a partir da qual soluções de compromisso (efetividade x custo) podem ser investigadas e estabelecidas.

Com base nos resultados apresentados, pode-se afirmar que o modelo de síntese/otimização proposto é apropriado para a condução do projeto de concepção de submarinos convencionais.

Em relação aos demais objetivos propostos na introdução, uma análise do impacto de variações nos requisitos operativos e técnicos sobre o espaço de soluções viáveis foi conduzida no capítulo 9.

Destaca-se a identificação de alguns requisitos de projeto que possuem considerável impacto sobre a arquitetura e/ou desempenho do navio:

- a) O tempo total de comissão tem implicação direta na quantidade de combustível que deverá ser embarcada. Conseqüentemente, ele influi na demanda por volumes internos, no deslocamento/área molhada do navio, na velocidade máxima, no raio de ação e nos alcances;
- b) O requisito de máxima profundidade de operação afeta o peso estrutural (grupo 1) e pode levar à necessidade de aumento do deslocamento do navio (afetando assim a quantidade de lastro fixo a bordo). Naturalmente, um eventual aumento no deslocamento tem as implicações sobre desempenho acima discutidas;
- c) A taxa de indiscrição é diretamente influenciada pela potência instalada de DG's. Aumentar a potência de DG's permite reduzir IR, ao preço de uma maior demanda por volume interno e conseqüente aumento de $\Delta\uparrow$.

O objetivo subsidiário de registro dos principais aspectos de interesse ligados ao projeto de concepção de submarinos foi tratado do capítulo 2 ao 5 e nos Anexos C, D, E, F, L e M.

10.2 Recomendações para trabalhos futuros

Há uma infinidade de assuntos de interesse, ligados ao objeto de estudo desta dissertação, que pode ser foco da atenção de trabalhos futuros. Especificamente, pode-se citar:

- a) Refinamento do modelo de síntese;
- b) Aprofundamento do estudo voltado ao estabelecimento da efetividade militar do submarino (*OMOE*);
- c) Detalhamento e atualização do modelo de custo do submarino;
- d) Aplicação de métodos de otimização alternativos;
- e) Análise de robustez das soluções não dominadas identificadas.

O refinamento do modelo de síntese envolveria a avaliação e eventual aprofundamento do equacionamento apresentado. Como discutido ao longo deste trabalho, algumas distorções nos equacionamentos propostos em fonte aberta puderam ser prontamente identificadas e corrigidas (ver capítulo 7). Entretanto, o equacionamento proposto poderia ser objeto de reavaliação e alterações futuras. Por exemplo, o método de estimativa de resistência ao avanço parece ser conservador quando comparado a outras formulações empíricas disponíveis. Semelhantemente, a demanda de volume dos sistemas auxiliares parece ligeiramente superestimada. Por fim, a estimativa de peso do casco resistente poderia ser refinada (ver item 9.3 e Apêndice E).

Esforços de reformulação do modelo de síntese envolveriam o detalhamento de um maior número de soluções (e.g. o estudo detalhado do arranjo das praças de máquinas auxiliares poderia subsidiar a alteração das equações de volume propostas) e/ou o estudo de dados reais de submarinos já construídos, caso disponíveis, e/ou a adição de equações mais sofisticadas.

A determinação da efetividade militar (*OMOE*) poderia ter seu escopo ampliado por meio de uma reestruturação da hierarquia de decisão/otimização e/ou pela

ampliação do número de especialistas consultados. Os pesos estabelecidos via Processo Analítico Hierárquico afetam a efetividade e têm influência direta na forma que a fronteira de soluções não dominadas assumirá. O aprimoramento desta métrica seria de especial interesse no caso de utilização em aplicações práticas do modelo de síntese/otimização proposto.

O modelo de custo poderia ser objeto de análise mais aprofundada. Novamente, o maior obstáculo a tal esforço seria a dificuldade na obtenção de dados fidedignos e atualizados. De qualquer modo, modelos mais elaborados poderiam incluir a análise do custo de operação, a estimativa de custo por parâmetros funcionais, etc.

Métodos alternativos de otimização poderiam ser utilizados. Neste âmbito, algoritmos de otimização diferentes poderiam ser testados. Além disso, rotinas mais sofisticadas (e.g. método híbrido com emprego de GA's aliados a técnicas baseadas em gradientes) poderiam ser propostas. Finalmente, o uso do Método de Superfície de Resposta parece prontamente aplicável ao problema em tela.

Por fim, a análise da robustez das soluções não dominadas obtidas é ponto de fundamental interesse. Fruto da própria natureza do método de otimização, é comum que essas soluções se situem nas fronteiras extremas do espaço viável de projeto. Em outras palavras, elas tendem a se posicionar nos limites das restrições e pequenas variações em suas características podem inviabilizá-las. Grosso modo, soluções robustas "comportariam" eventuais alterações, necessárias durante o projeto preliminar, sem degradação de suas características de otimalidade.

Há técnicas específicas para análise de robustez das soluções não dominadas em problemas de otimização multiobjetivo. Além de ser um campo de pesquisa bastante promissor, sua aplicação ao problema tratado nesta dissertação seria uma complementação valiosa aos resultados apresentados.

GLOSSÁRIO

Este glossário apresenta definições de expressões técnicas de uso restrito, ou pouco conhecidas, utilizadas neste texto. Ressalta-se que as definições apresentadas não possuem caráter exaustivo, tendo grau de detalhe compatível com o escopo desta dissertação.

Alcance – máxima distância que o submarino pode percorrer até que seu combustível, ou a carga de suas baterias, esteja esgotado(a). Em geral, o alcance submerso (i.e. aquele cumprido entre duas operações sucessivas de esnorquel para carga de baterias) é o de maior interesse.

Assinatura acústica – conjunto de emissões sonoras que o submarino irradia durante seu funcionamento. É composto pelos ruídos decorrentes da interação fluido-estrutura, do ruído irradiado pela operação dos equipamentos, pela tripulação, etc. A redução da assinatura acústica é de especial interesse no projeto e na operação de submarinos, visto que o ruído irradiado é detectável por monitoramento sonar passivo.

Assinatura magnética – em termos simplificados, diz respeito aos distúrbios induzidos no campo magnético terrestre pela presença do submarino (devidos ao seu casco metálico). Parte da assinatura magnética do navio é decorrente do magnetismo permanente, induzido pelo campo magnético da Terra, e adquirido pelas seções do casco durante a construção. A outra parte decorre da própria interação magnética entre casco em movimento e o campo magnético terrestre. A assinatura magnética pode ser detectada por sensores montados em aeronaves (*Magnetic Anomaly Detection – MAD*) ou pode acionar minas de influência magnética.

Assinatura térmica – em termos simplificados, consiste no calor irradiado pelo submarino durante seu funcionamento. Mais especificamente, é formada pelas emissões eletromagnéticas do submarino visíveis na faixa de ondas infravermelhas, portanto passíveis de detecção por sensores de calor.

Autonomia – número de dias que um submarino pode permanecer em operação até que seus víveres estejam esgotados.

Carga Hotel – carga elétrica demandada a bordo para todos os propósitos não relacionados à propulsão do submarino (e.g. condicionamento de ar, iluminação, produção de água, uso da tripulação, refrigeração, etc.).

Contramedidas – consistem em equipamentos ou sistemas, instalados em certo meio naval, que permitem a neutralização ou mitigação de determinada ação empreendida pelo oponente. Como exemplo, podem ser citadas as contramedidas acústicas que são dispositivos geradores de grande ruído, lançados pelo submarino com vistas a atrair ou confundir o sistema sonar de torpedos disparados contra a embarcação.

Corpo Principal – em termos simplificados, pode ser definido como um conjunto de belonaves navegando em formação, em geral centralizada por um navio aeródromo ou por um navio de transporte de tropas (em jargão naval, comumente denominados Unidades de Maior Valor). Submarinos convencionais (por limitações de velocidade) costumam operar de forma destacada do corpo principal.

Cota periscópica – uma profundidade pequena, próxima à superfície do mar, que permite ao submarino içar seus mastros de comunicação, periscópios e, sobretudo, o mastro de esnorquel para admissão de ar durante a operação dos motores diesel para a carga de baterias.

Diâmetro táctico – é a distância, perpendicular ao rumo inicial do submarino, percorrida por seu centro de gravidade durante uma guinada de 180°. Em outras palavras, é a distância perpendicular entre a linha de rumo inicial do submarino e sua linha de rumo final, depois de efetuada uma inversão de rumo (guinada de 180°).

Discrição acústica – diz respeito à intensidade da assinatura acústica do submarino. Quanto menor essa assinatura, maior a discrição acústica da embarcação.

Discrição magnética – diz respeito à intensidade da assinatura magnética do submarino. Quanto menor essa assinatura, maior a discrição magnética da embarcação.

Discrição térmica – diz respeito à intensidade da assinatura térmica do submarino. Quanto menor essa assinatura, maior a discrição térmica da embarcação.

Força-Tarefa – organização temporária estabelecida com o objetivo de cumprir determinada missão. A Força-Tarefa pode ser composta por navios de guerra, submarinos, aeronaves, tropas, unidades de apoio, etc.

Lastro de comissionamento – quantidade de lastro incorporada ao navio com vistas as suas futuras modernizações e alterações. Durante a vida operativa do navio, os equipamentos eventualmente substituídos ou novos sistemas instalados podem representar peso adicional, inicialmente não previsto em projeto. O lastro de comissionamento permite que esse peso adicional seja compensado pela remoção de uma quantidade de lastro equivalente ao peso dos novos equipamentos.

Meio Naval – em contexto amplo, define-se meio naval como um veículo que pode ser empregado na condução ou em apoio às operações militares navais (sejam elas marítimas e/ou aéreas e/ou terrestres). São exemplos de meios navais: navios de combate, navios de apoio, submarinos, aeronaves, carros de combate, viaturas anfíbias, etc. Nesta dissertação, o termo é empregado predominantemente para indicar navios de superfície ou submarinos.

Minagem ofensiva/defensiva – consistem em operações de lançamento de minas em determinada área do Teatro de Operações. Quando a minagem é realizada para limitar a movimentação do inimigo em águas sob seu controle ou restringir o uso de seus portos, a minagem é dita ofensiva. Quando usada para proteger meios navais aliados, criar corredores de segurança ou proteger a entrada de portos amigos, é dita defensiva

Mísseis de cruzeiro – mísseis guiados, de considerável poder destrutivo e alta precisão, usados para atacar alvos de superfície (terrestres ou marítimos). O termo

"de cruzeiro" deriva do fato da maior parte de sua trajetória entre a origem e o alvo ser cumprida à velocidade de cruzeiro (que pode ser subsônica ou supersônica). Tipicamente, seus alcances variam entre 200 e 2500 km.

Navegação inercial – modalidade de navegação em que sistemas inerciais são empregados. Esses sistemas consistem em giroscópios e acelerômetros que permitem o cálculo de aceleração, velocidade e posição. Assim, é possível atualizar constantemente a estimativa de posição do navio (i.e. conhecida a posição inicial do movimento do navio, é possível estimar suas coordenadas atuais).

Operações de patrulha – operações conduzidas pelo submarino em uma área específica do Teatro de Operações (zona de patrulha). A patrulha é empreendida sob trânsito furtivo, procurando-se manter a maior discrição possível, de forma que baixas velocidades são empregadas (velocidade de patrulha).

Operações especiais – operações que consistem na infiltração, lançamento ou recolhimento de forças especiais. Tais forças conduzem operações não convencionais em áreas de interesse militar (e.g. sabotagem, inteligência, reconhecimento, retomada de instalações, resgate, ataques localizados, etc.).

Raio de ação – máxima distância que o submarino pode atingir, retornando posteriormente ao seu ponto de origem, sem reabastecer-se de combustível.

SSN – *Ship Submersible Nuclear*: submarino nuclear de ataque (propulsão nuclear).

SSBN – *Ship Submersible Ballistic Nuclear*: submarino nuclear balístico (propulsão nuclear, armado com mísseis estratégicos balísticos).

SSGN – *Ship Submersible Guided Nuclear*: submarino nuclear de mísseis guiados (propulsão nuclear, armado com mísseis de cruzeiro).

SSK – *Ship Submersible (Conventional)*: submarino convencional (propulsão diesel-elétrica).

Taxa de indiscrição – fração do tempo que o submarino passa em esnorquel durante sua operação. Como a operação de esnorquel ocorre próxima à superfície do mar, com mastros içados, o submarino encontra-se mais vulnerável à detecção visual/térmica durante essa atividade. O submarino também se torna mais suscetível à detecção acústica pois estará operando os motores diesel para a carga das baterias.

Teatro de Operações – área na qual operações militares são conduzidas ou se desenrolam. Tal área pode ser marítima e/ou terrestre e pode incluir o espaço aéreo sobrejacente.

Velocidade de patrulha – velocidade empregada na zona de patrulha, de forma a manter trânsito furtivo e elevada discrição. Geralmente varia de 3 a 6 nós.

(página deixada intencionalmente em branco)

REFERÊNCIAS

- [1] IHS GLOBAL INC. **Jane's fighting ships**. Coulsdon: Jane's Information Group, 2010.
- [2] BRASIL. Ministério da Defesa. **Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília: MD, 2008.
- [3] KORMILITSIN, Y. N.; KHALIZEV, O. A. **Theory of submarine design**. São Petersburgo: SMTU, 2001.
- [4] BURCHER, R.; RYDILL, L. **Concepts in submarine design**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [5] ALLMENDINGER, E. E. **Submersible vehicle systems design**. Jersey City: SNAME, 1990.
- [6] BROWN, A.; SALCEDO, J. Multi-Objective Optimization in naval ship design. **Naval Engineers Journal**, v. 115, n. 4, p. 49-61, 2003.
- [7] DEMKO, D. T. **Tools for multi-objective and multi-disciplinary optimization in naval ship design**. 2005. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2005.
- [8] VAN DER NAT, C. G. J. M. **A knowledge-based concept exploration model for submarine design**. Delft: Delft University Press, 1999.
- [9] WATSON, D. G. M. **Practical ship design**. Nova Iorque: Elsevier, 1998.
- [10] EAMES, M. E.; DRUMOND, T. G. Concept exploration - An approach to small warship design. **Transactions RINA**, v. 119, p. 29-54, 1982.
- [11] REED, M. R. **Ship synthesis model for naval surface ships**. 1976. 278 p. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1976.
- [12] UNITED STATES. Bureau of Naval Personnel. **The fleet type submarine**. Washington: Naval Institute Press, 1946.
- [13] FRIEDMAN, N. **U.S. submarines through 1945: an illustrated design history**. Annapolis: Naval Institute Press, 1995.
- [14] DELGADO, J. P. **Silent killers: submarines and underwater warfare**. Oxford: Osprey, 2011.

- [15] GABLER, U. **Submarine design**. Koblenz: Bernard & Graefe, 1986.
- [16] ZIMMERMAN, S. **Submarine technology for the 21st century**. Arlington: Pasha Publications, 1990.
- [17] APALKOV, Y. V. **Podvodnye lodki Sovetskogo Flota 1945-1991**. Moscou: Morkniga, 2010.
- [18] KORMILITSIN, Y. N.; KHALIZEV, O. A. **Ustroistvo podvodnykh lodok**. São Petersburgo: SMTU, 2008.
- [19] BENEDICT, J. R. Future undersea warfare perspective. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, v. 21, p. 269-279, 2000.
- [20] _____. The unraveling and revitalization of U.S. Navy Antisubmarine Warfare. **Naval War College Review**, v. 58, p. 93-120, 2005.
- [21] PITTMAN, J. C. **Zone Defense - Anti-Submarine Warfare in the age of littoral warfare**. 2008. 76 p. Dissertação (Mestrado) – U.S. Army General Staff College, Fort Leavenworth, 2008.
- [22] UNITED STATES. Congress Committee on Armed Services. **A cooperative strategy for 21st century seapower**. Washington: U.S. G.P.O., 2009.
- [23] MILL, M.; MAMIKONIAN, A. **NS 310: strategy and tactics**. Annapolis: Naval Institute Press, 2005.
- [24] COLLINS, L. E.; WROBEL, P. The current state of RIM drive technology and its application to submarine propulsion. **Warship 2014: Naval Submarines & UUV's**. v.1, 14 p., 2014.
- [25] SCHANK, J. F.; RAMAN, R. **The United Kingdom's nuclear submarine industrial base**. Santa Monica: RAND, 2005.
- [26] HOOTMAN, J. C. **A military effectiveness analysis and decision making framework for naval ship design and acquisition**. 2003. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003.
- [27] EVANS, J. H. Basic design concepts. **Naval Engineers Journal**, v.1, p. 671-678, 1959.
- [28] UNITED STATES. National Aeronautics and Space Administration. **Systems engineering handbook**. Washington: NASA, 2007.

- [29] BUDDER, R. Future submarine programmes: observations/lessons. **Warship 2014: Naval Submarines & UUV's**. v.1, 4 p., 2014.
- [30] MINNICK, L. M. **A parametric model for predicting submarine dynamic stability in early stage design**. 2006. 146 p. Dissertação (Mestrado) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2006.
- [31] RENILSON, M. **Submarine hydrodynamics**. Londres: Springer, 2015.
- [32] STENARD, J. K. **Comparative naval architecture of modern foreign submarines**. 1988. 181 p. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1988.
- [33] PRICE, D. J. **Comparison of approaches for determining the failure of stiffened cylindrical shells**. 2002. 223 p. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2002.
- [34] SHINGLER, K. et al. **ATLAS - Advanced tactics littoral warfare alternative submarine**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005. (Design Report)
- [35] PEREIRA, M. H.; ANDRADE, B. L. R.; NISHIMOTO, K. Algoritmos genéticos aplicados ao projeto de concepção de submarinos. **Revista Pesquisa Naval**, v.1, n. 26, p. 34-47, 2015.
- [36] SILVA, E. C. N. **Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos**. São Paulo: EPUSP, 2009. Apostila para disciplina de pós graduação do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, PMR 5215 – Otimização Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos.
- [37] IQBAL, K. **Fundamental engineering optimization methods**. Londres: Bookboon, 2013.
- [38] PARSONS, M. G. Applications of optimization in early stage ship design. **Ship Science and Technology**, v.1, p. 9-31, 2009.
- [39] BROWN, A. et al. **Optimization and Overall Measure of Effectiveness (OMOE) for the preliminary design of LHA(R)**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006. (Design Report).
- [40] PAPANIKOLAOU, A. D. Holistic ship design optimization: merchant and naval ships. **Ship Science and Technology**, v.5, p. 9-26, 2011.

- [41] HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [42] GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Reading: Addison-Wesley, 1989.
- [43] SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to genetic algorithms**. Nova Iorque: Springer, 2007.
- [44] MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: MIT, 1996.
- [45] DENNETT, D. C. **Breaking the spell: religion as a natural phenomenon**. Nova Iorque: Viking, 2006.
- [46] DEB, K. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.
- [47] ZITZLER, E. **Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: methods and applications**. Zurique: ETH, 1999.
- [48] ANDRADE, B. L. R. **Modelo de síntese e otimização por múltiplos critérios para o projeto preliminar de embarcações**. 2001. 238 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- [49] JACKSON, H. A. Fundamentals of submarine concept design. **SNAME Transactions**, v. 100, p. 419-448, 1992.
- [50] TORKELSON, K. O. **Comparative naval architecture analysis of diesel submarines**. 2005. 91 p. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2005.
- [51] GILLMER, T. C.; JOHNSON, B. **Introduction to naval architecture**. Annapolis: Naval Institute Press, 1982.
- [52] JACKSON, H. A. Submarine parametrics. **Warship 1983: Naval Submarines**. v.1, 10 p., 1983.
- [53] BLIZZARD, C. R. et al. **Ballistic defense missile submarine**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008. (Design Report).
- [54] ALEMAYEHU, D. et al. **Guided missile submarine - SSG(X)**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006. (Design Report).

- [55] RAINS, D. Combatant ship design guidance through mission effectiveness analysis. **Naval Engineers Journal**, v. 96, n. 3, p. 112-127, 1984.
- [56] DE MOURA, J. A. A. **A estratégia naval brasileira no pós-guerra fria**. Rio de Janeiro: Femar, 2014.
- [57] RAWSON, K. J.; TUPPER, E. C. **Basic ship theory**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [58] UNITED STATES. National Aeronautics and Space Administration. **Buckling of thin-walled doubly curved shells**. Washington: NASA, 1969.
- [59] HARBOUR, J. P. **Evaluation and comparison of electric propulsion motors for submarines**. 2001. 176 p. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001.
- [60] BUCKINGHAM, J. Submarine power and propulsion: balancing the energy elements. In: Pacific 2012, 2012, Sydney. **Anais...** Sydney: University of Sydney, 2012. 11 p.
- [61] MCGUINNES, M.; BENJAMIM, B. Submarine lead-acid battery performance. In: Proceedings of the Mathematics-in-Industry Study Group, 2003, Adelaide. **Anais...** Adelaide: University of South Australia, 2003. 27 p.
- [62] SAATY, T. L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. **International Journal of Service Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.
- [63] VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic Hierarchy Process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**, n. 169, 29 p., 2004.
- [64] KLUTHO, S. **Mathematical desision making: An overview of the Analytic Hierarchy Process**. Washington: Whitman College, 2013. Apostila para disciplina de pós graduação.
- [65] UNITED STATES. Naval Sea Systems Command. **Naval Ships' Technical Manual (ch096) - Weight and Stability**. Washington: NAVSEA, 1996.

(página deixada intencionalmente em branco)

APÊNDICE A - SHIP WORK BREAKDOWN STRUCTURE (SWBS)

A Estrutura Analítica de Projeto utilizada neste trabalho segue a numeração proposta pela sistemática SWBS da Marinha Americana¹⁸³. Seus componentes são resumidamente elencados nos itens seguintes. Maiores detalhes estão disponíveis em [5].

A-1) Grupo 1 - Casco e Estruturas

Grupo que agrega os diversos elementos estruturais do submarino. Estes podem ser agrupados em elementos que compõem o CR e elementos das estruturas externas.

Os itens principais deste grupo são:

- Casco e estruturas de suporte;
- Apêndices estruturais do casco;
- Elementos estruturais (anteparas, calotas, torreões e tanques);
- Conveses;
- Elementos estruturais de fechamento (escotilhas);
- Jazentes;
- Mastros.

A-2) Grupo 2 - Sistemas de Propulsão

Refere-se a todos os sistemas necessários para mover o submarino, tanto em condições normais quanto em condição de emergência. Entre seus principais sistemas, podem ser citados:

- Planta de propulsão (equipamentos principais);
- Baterias;
- Diesel-Geradores;
- MEP;
- Engrenagens redutoras e eixo;
- Hélice;

¹⁸³ Documento publicado pelo NAVSEA, sob título S9040-AA-IDX-010/SWBS 5D - *Expanded Ship Work Breakdown Structure*. Vol I e II.

- Sistema de controle da propulsão;
- Equipamentos auxiliares da propulsão;
- Sistemas de alimentação de combustível;
- Sobressalentes da propulsão.

A-3) Grupo 3 - Sistemas Elétricos

Grupo dos sistemas destinados a prover e distribuir energia elétrica entre os diversos utilizadores de bordo, além de prover iluminação elétrica.

São exemplos desse grupo:

- Planta elétrica (equipamentos principais);
- Cabos e acessórios;
- Conversores;
- Sistemas de distribuição de energia;
- Sistemas de iluminação;
- Sobressalentes dos sistemas elétricos.

A-4) Grupo 4 - Comando e Controle

Este grupo reúne os sistemas de comando e controle do submarino (e.g. disseminação de ordens, apoio à tomada de decisão, compilação do quadro tático, navegação, direção de tiro, etc.)

Inclui itens como:

- Sistemas de comando e controle (equipamentos principais);
- Sistemas de navegação;
- Sistemas de comunicações interiores;
- Periscópios;
- Sonares;
- Contramedidas;
- MAGE;
- Sistemas de direção de tiro;
- Sobressalentes dos sistemas de comando e controle.

A-5) Grupo 5 - Sistemas Auxiliares

Grupo que reúne diversos sistemas auxiliares (e.g. suporte à vida e conforto a bordo, sistemas de manutenção do equilíbrio hidrostático, etc.).

Inclui itens como:

- Sistemas e máquinas auxiliares (equipamentos principais);
- Bombas e itens associados;
- Tubulações e dutos;
- Sistemas de climatização (e.g. ventilação e condicionamento de ar);
- Sistemas de água salgada (circulação e utilização);
- Sistemas de água doce (circulação e utilização);
- Sistemas de manejo de combustíveis e lubrificantes;
- Sistemas de ar comprimido (alta e baixa pressão);
- Sistemas de extinção de incêndio;
- Sistema de governo do navio;
- Sistemas de fundeio e atracação;
- Sobressalentes dos sistemas auxiliares;

A-6) Grupo 6 - Acessórios e Acabamento

Grupo que abriga os itens necessários para concluir o acabamento do submarino e torná-lo habitável e tripulável.

São exemplos de itens desse grupo:

- Acessórios de casco;
- Anteparas de subdivisão (não estruturais);
- Pintura e proteção catódica;
- Sistemas dos espaços habitáveis;
- Sistemas relacionados às áreas de armazenamento de gêneros;
- Sobressalentes.

A-7) Grupo 7 - Armamento

Grupo que inclui sistemas ligados ao manejo, armazenamento, lançamento e guiagem de armas. Ressalta-se que as armas propriamente ditas (torpedos, minas e mísseis) são incluídas como carga variável e não compõem o referido grupo.

Neste grupo, destacam-se:

- Sistemas de manejo de armas;
- Sistemas de lançamento;
- Tubos de torpedos;
- Sistemas de ejeção dos torpedos;
- Sobressalentes dos sistemas de armamentos.

APÊNDICE B - REQUISITOS DE ESTADO MAIOR (REM)

B-1) Itens típicos

O conteúdo dos Requisitos de Estado Maior (REM) pode variar consideravelmente¹⁸⁴. A discussão seguinte explora os itens típicos e se baseia em [3], [8], [18], [15] e [34].

Em geral, os requisitos poderão tratar dos seguintes assuntos (lista não exaustiva):

Missões

- a) Cenário típico da missão (ou missões);
- b) Capacidade militar do oponente (meios navais/recursos);
- c) Missões de guerra de superfície e submarina (capacidades requeridas);
- d) Missões de minagem (capacidades requeridas);
- e) Projeção de poder sobre terra (operações com forças especiais e/ou lançamento de mísseis contra alvos em terra);
- f) Missões de inteligência (capacidades requeridas).

Parâmetros ambientais

- a) Faixas de densidade da água;
- b) Faixa de temperatura da água;

Arquitetura naval

- a) Profundidade de operação;
- b) Deslocamento de superfície máximo;
- c) Reserva de flutuabilidade;

¹⁸⁴ Já que as situações sob as quais ocorre a elaboração desses requisitos variam muito. Em certas situações, os requisitos podem ser elaborados para a adaptação de certo submarino, já existente no mercado externo, às necessidades do cliente. Podem também ser relativos à adaptação/aprimoramento de um projeto nacional já existente ou relativos a um projeto nacional inteiramente novo. Em todo caso, a divisão de tarefas entre Marinha/Escritório de Projeto/Estaleiro de Construção poderá afetar, em maior ou menor grau, o conteúdo e o nível de detalhe dos Requisitos de Estado Maior.

- d) Restrições de dimensões principais (comprimento, diâmetro, calado, etc.);
- e) Estabilidade;
- f) Lastro fixo e lastro de comissionamento;
- g) Vela (número de mastros, espaços reserva, etc.).

Armamento

- a) Número de tubos;
- b) Tipo de lançamento (*swim out*, ejeção pneumática, etc.);
- c) Número de torpedos/mísseis/minas armazenados a bordo;
- d) Tipo de armamento (torpedos/mísseis/minas).

Requisitos operativos

- a) Velocidades (máxima, patrulha, transito, máxima em esnorquel);
- b) Velocidade em superfície;
- c) Alcances e/ou raios de ação requeridos (misto, submerso, mínimo);
- d) Taxa de indiscrição;
- a) Autonomia (víveres e aguada);

Manobrabilidade

- a) Diâmetro tático;
- b) Mudança de cota (e.g. variação de cota em dado tempo sob determinado ângulo de hidroplanos);
- c) Tempo de parada em emergência (i.e a uma dada velocidade inicial, sendo todos os comandos de parada executados, o tempo para que o submarino cesse seu movimento);

Tripulação

- a) Número de oficiais e praças;
- b) Número de passageiros/forças especiais eventualmente embarcados;

Requisitos técnicos

- a) Materiais (casco, tubulações, etc.);
- b) Resistência à corrosão (proteção catódica, tolerâncias, etc.);
- c) Níveis máximos de ruído (irradiado, interno, etc.);
- d) Tipos/configuração/desempenho do sistema de propulsão;
- e) Sistemas de comando, comunicações e controle;
- f) Sistemas de navegação;
- g) Sistemas de gerenciamento integrado da plataforma;
- h) Sensores;
- i) Mastros (optrônicos/penetrantes);
- j) Vibrações e choque;
- k) Sistemas de suporte à vida e resgate;
- l) Sistemas auxiliares;
- m) Sistemas de prevenção e controle de avarias/incêndios;
- n) Sistemas de segurança de imersão;
- o) Sistema de fundeio;

Disponibilidade, manutenção e apoio logístico

- a) Manutenção de primeiro escalão (e.g. número de horas de manutenção a cargo da tripulação);
- b) Períodos de manutenção no cais;
- c) Períodos de docagem;
- d) *MTBF* (*mean time between failure*) dos equipamentos;

B-2) REM para esta dissertação

Para o estudo conduzido nesta dissertação, uma versão bastante simplificada de Requisitos de Estado Maior foi elaborada. Ao invés de formular uma versão hipotética completa dos REM, optou-se por limitar os requisitos àqueles que, em primeira leitura, têm maior impacto nas características principais do navio; e, conseqüentemente, influenciam em maior grau o projeto de concepção.

O cenário base considerado para as missões a serem desempenhadas pelo submarino é ilustrado na Tabela 64.

Tabela 64 – Missão (cenário base)

Dia	Cenário da Missão
1 a 10	Partida do porto base. Trânsito em cruzeiro de guerra até o TO. Carga completa das baterias imediatamente antes do início da patrulha.
11 a ($T_{pat} + 10$)	Conduzir as missões atribuídas (controle de área marítima e/ou operações especiais e/ou missões de minagem e/ou inteligência).
($T_{pat} + 10$) a ($T_{pat} + 20$)	Fim da missão. Trânsito em cruzeiro de guerra até o porto base.

Os principais Requisitos de Estado Maior, no que concerne ao projeto de concepção, são listados na Tabela 65.

Tabela 65 – Requisitos de Estado Maior

(continua)

Missão	
Descrição	Limites/valor
Tempo de patrulha/missão	30 a 50 dias
Parâmetros ambientais	
Descrição	Limites/valor
Densidade da água do mar	1,020 a 1,030 t/m ³
Arquitetura Naval	
Descrição	Limites/valor
MOD	200 a 400m
$\Delta\uparrow_{max}$	3500 t
ROB	10%
BG _{min}	4%D
GM _{min}	BG _{min} + 0,1m
Lastro fixo mínimo (percentual de $\Delta\uparrow$)	10%
Lastro de comissionamento (percentual de $\Delta\uparrow$)	0,2%

Tabela 64 – Requisitos de Estado Maior

(conclusão)

Requisitos Operativos	
Descrição	Limites
V _{max}	≥ 15 nós (desejável = 25 nós)
X _{veloc}	= 4 nós
S _{veloc}	= 8 nós
A _{sub}	≥ 50 MN (desejável = 300 MN)
RA _{mix}	≥ 2500 MN (desejável = 6000 MN)
IR _{max} (@4kt)	12%
Tripulação	
Descrição	Limites/valor
Oficiais	6
Membros de operações especiais	6 - 12

(página deixada intencionalmente em branco)

APÊNDICE C - FORÇAS E MOMENTOS

C-1) Fontes e natureza das forças e momentos atuantes¹⁸⁵

Os princípios da Mecânica dos Fluidos, quando aplicados ao projeto de submarinos, dizem respeito ao comportamento do navio quando exposto a forças/momentos originados das seguintes fontes [5]:

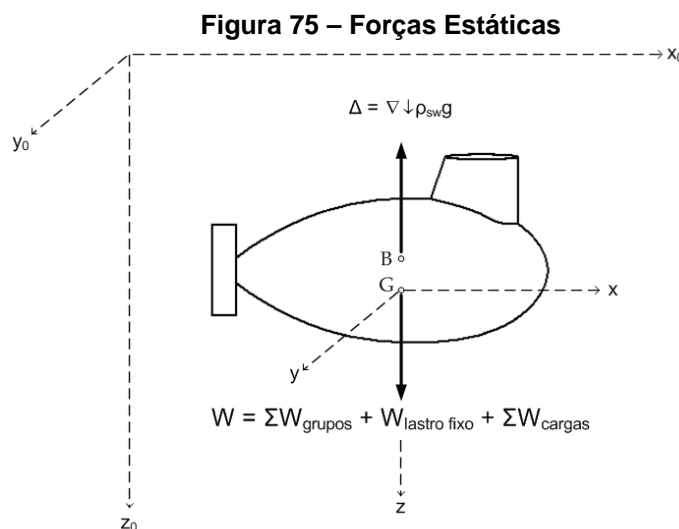
1. Campo gravitacional da terra (peso);
2. Resultante da pressão hidrostática agindo sobre o submarino (força de flutuação ou empuxo);
3. Movimento relativo entre submarino e o fluido circundante (forças de sustentação e resistência ao avanço);
4. Reações causadas pela atuação do sistema propulsor (i.e. hélice) do submarino (empuxo e torque);
5. Acelerações lineares e angulares derivadas da resistência a mudanças no estado de repouso/movimento do submarino (forças inerciais);
6. Contato do submarino com outros objetos, ondas, vento, etc. (forças de contato).

As forças, e seus momentos associados, podem ser classificadas como estáticas e dinâmicas. Essa classificação diz respeito à existência das forças na ausência/presença de movimento relativo entre o submarino e fluido circundante. Forças associadas às fontes 1 e 2 são ditas estáticas, pois existirão mesmo na ausência de movimento relativo. Já as forças associadas às fontes 3, 4 e 5 são ditas dinâmicas, pois só surgem na presença desse movimento. As forças associadas à fonte 6, dependendo do tipo de contato, podem ser estáticas (e.g. objetos) ou dinâmicas (e.g. vento e ondas).

¹⁸⁵ A discussão não leva em conta carregamentos dinâmicos relacionados à atividade militar do submarino, como ondas de choque provenientes de cargas explosivas.

C-2) Forças Estáticas

A Figura 75 ilustra exemplos de forças estáticas [5].



Fonte: adaptado [5]

O peso total (W), originado da fonte 1, representa a soma do peso de todos os itens que compõe o submarino (ΣW_{grupos}), agrupados em uma EAP conveniente¹⁸⁶, do peso do lastro fixo ($W_{\text{lastro fixo}}$) e do peso dos seus itens de carga¹⁸⁷ (ΣW_{carga}). O peso total pode variar durante o cumprimento da missão (e.g. itens de carga variável).

A força de flutuação (Δ), originada da fonte 2 e comumente denominada empuxo¹⁸⁸, é o produto de todos os volumes estanques (i.e. volumes que efetivamente deslocam água) do submarino ($\nabla \downarrow$) pelo peso específico da água ($\gamma = \rho_{sw} g$). Essa força pode variar durante a missão (e.g. pela compressibilidade dos volumes estanques devido à pressão hidrostática e/ou pela variação da densidade da água). A diferença entre Δ e W (i.e. a resultante entre elas) é denominada flutuabilidade. Ela pode ser positiva, neutra ou negativa:

- $\Delta > W \rightarrow$ flutuabilidade positiva;

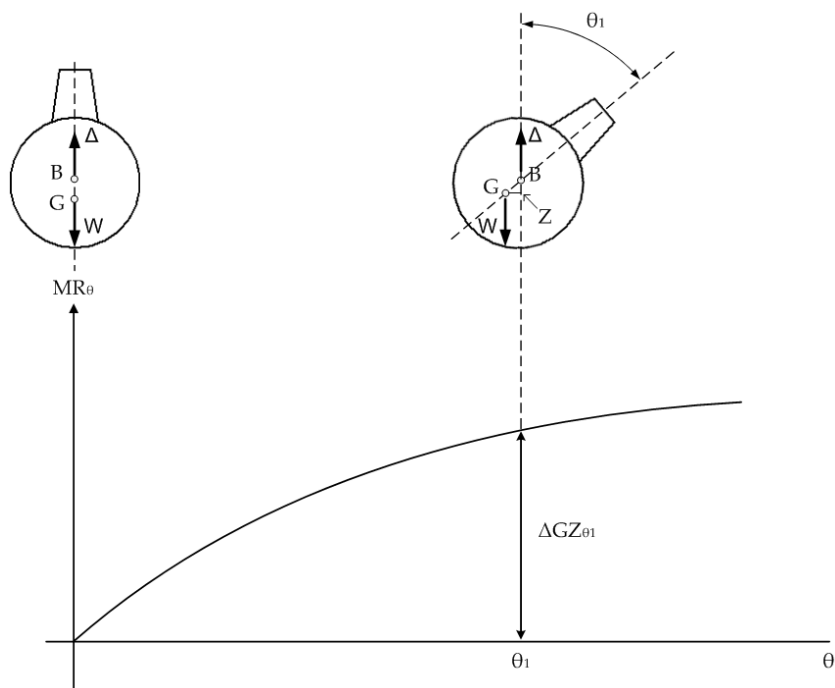
¹⁸⁶ Neste trabalho, é utilizada a EAP da sistemática *SWBS* (ver item 4.3.2).

¹⁸⁷ Ver item 5.3.1.

¹⁸⁸ A denominação "empuxo", embora consagrada, pode no presente contexto gerar certa confusão visto que, em Português, a força dinâmica proveniente da ação do hélice é também denominada "empuxo". Neste texto, será preferencialmente utilizado o termo "Força de Flutuação" para a resultante da pressão hidrostática agindo sobre o submarino.

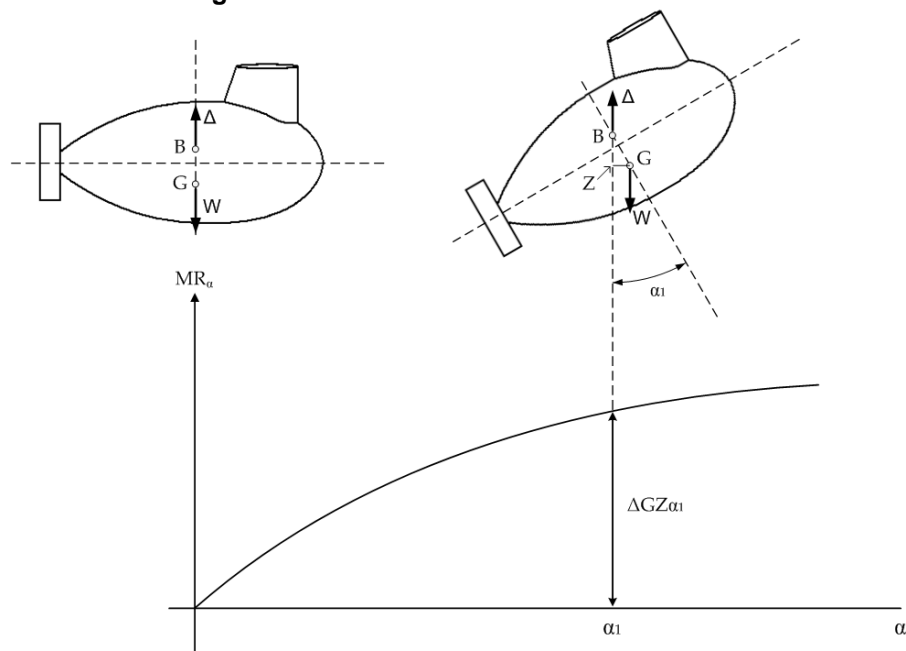
- $\Delta = W \rightarrow$ flutuabilidade neutra;
- $\Delta < W \rightarrow$ flutuabilidade negativa.

Figura 76 – Curvas de Estabilidade Estática



Fonte: adaptado [5]

Figura 77 – Curvas de Estabilidade Estática



Fonte: adaptado [5]

Na condição de equilíbrio, as linhas de ação de W e Δ são colineares. Quando distúrbios externos (forças ou momentos) inclinam o submarino em torno dos eixos x

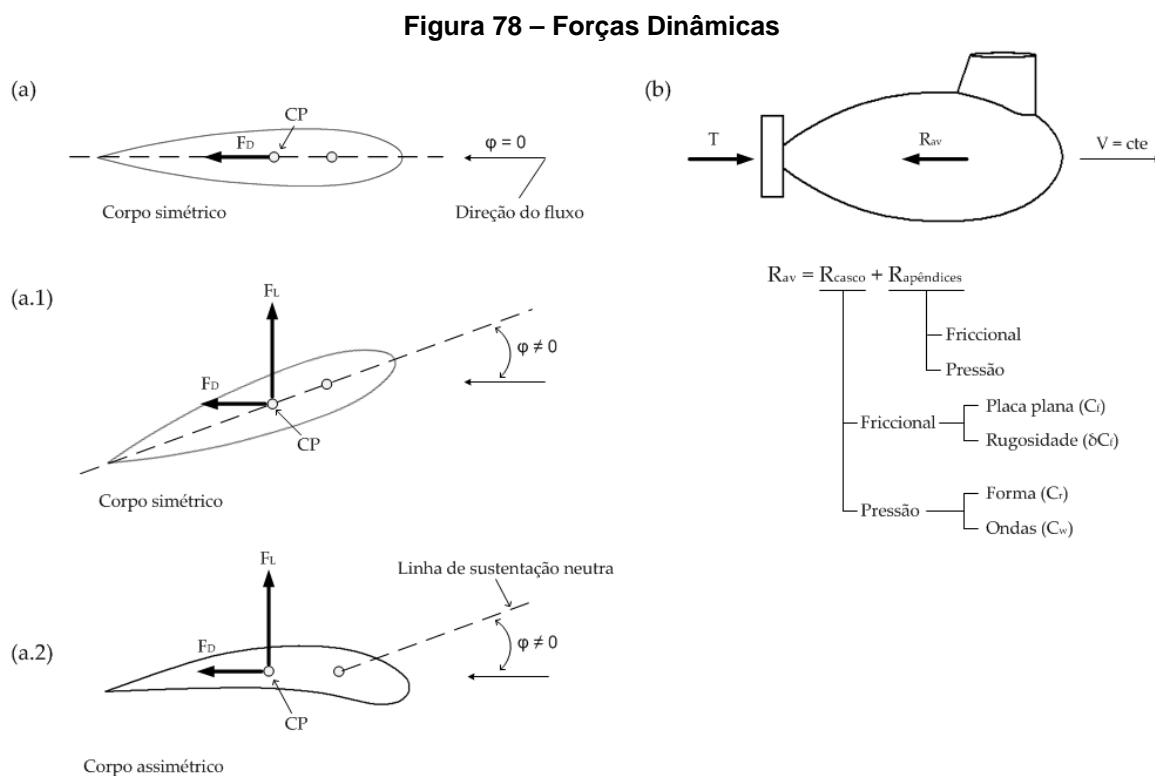
e y, o que torna as linhas de ação do peso e deslocamento não colineares, W e Δ formam momentos de endireitamento (M_R) que resistem a essa inclinação. Essa resistência é chamada de Estabilidade Estática e varia de acordo com o ângulo de inclinação em torno dos eixos x (θ) e y (α). O traçado de M_R versus θ e α é denominado Curva de Estabilidade Estática (Figura 76 e Figura 77).

A distância GZ, indicada na figura, é denominada "Braço de Endireitamento" e seu comprimento varia em função do ângulo de inclinação (θ ou α).

Por fim, forças estáticas de contato, provenientes da fonte 5, também podem estar presentes (no caso do submarino pousado no fundo ou em situações de encalhe, por exemplo). A discussão acima considera o submarino em condição de "livre flutuação", ou seja, apenas o deslocamento e o peso estão atuando. A presença de forças de contato (e.g. no caso de docagem ou encalhe), obviamente, alteraria a discussão acima.

C-3) Forças Dinâmicas

A Figura 78 ilustra exemplos de forças dinâmicas [5].



Fonte: adaptado [5]

Derivadas da fonte 3, as forças de sustentação (F_L) e arrasto (F_D) são, respectivamente, normais e paralelas à direção do fluxo (Figura 78-a). A sustentação estará presente quando o ângulo de ataque (ϕ) não for nulo¹⁸⁹; já o arrasto sempre ocorrerá quando houver movimento relativo do corpo em relação ao fluido circundante.

Todos os elementos do submarino (casco, apêndices, vela, etc.) estarão sujeitos a essas forças dinâmicas. Por intermédio das superfícies de controle (lemes e hidroplanos), as forças de sustentação podem ser usadas para controlar o movimento do submarino. Entretanto, F_L também afetará outros elementos do submarino (casco, apêndices e vela) e as forças hidrodinâmicas resultantes, sobretudo em altas velocidades, podem ser significativas¹⁹⁰.

Por seu turno, as forças de arrasto afetam todos os elementos do submarino. Sua resultante, que se opõe ao movimento de avanço do navio, é denominada Resistência ao Avanço (R_{av}). Essa força é importante para o dimensionamento da propulsão do navio, sendo comuns as iniciativas de projeto no sentido de restringi-la a patamares mínimos. Seus componentes são indicados na Figura 78-b e discutidas em detalhe no item 5.2.2.2.

A força de empuxo (T), decorrente da operação do hélice, é uma força dinâmica derivada da fonte 4. Essa força é utilizada para propeler o submarino. O empuxo surge da variação de momentos linear e angular que o movimento das pás do hélice impõe sobre as partículas de água; sendo que a reação à variação de momento linear leva a uma resultante que tende a impulsionar o submarino para vante (T). Ocorre também uma reação à variação de momento angular, originando um momento que tende a inclinar o navio em torno do eixo de rotação do hélice. Sob determinadas circunstâncias, esse momento pode ser considerável¹⁹¹.

¹⁸⁹ O ângulo de ataque deixará de ser nulo quando o eixo de simetria do corpo estiver inclinado em relação à direção do fluxo (Figura 78-a.1), ou no caso de corpos assimétricos, nos quais a própria assimetria do corpo em relação a seu eixo implicará em ângulo de ataque não nulo (Figura 78-a.2).

¹⁹⁰ Por exemplo: em condição submersa, durante uma guinada no plano horizontal em alta velocidade, o eixo de simetria da vela do submarino pode formar um ângulo de ataque não nulo com a direção do fluxo. O efeito de fólio resultante tende a criar um momento que age inclinando o navio "para dentro" do bordo de guinada (efeito conhecido como "*snap roll*", ou banda de guinada). Dependendo da geometria da vela e da velocidade de guinada, essa inclinação pode ser apreciável.

¹⁹¹ Caso os momentos sejam pronunciados, uma solução de projeto por vezes adotada consiste no uso de dois hélices coaxiais e contra-rotativos, cuja operação gera binários que se anulam. Entretanto, no caso de submarinos de maior porte, a magnitude do momento não é apreciável diante da massa (inércia) do navio.

Forças e momentos inerciais, originados da fonte 5, ocorrem durante a operação do submarino. Nota-se, na prática, que as forças/momentos necessários para impor ao navio determinada aceleração (linear/angular) são maiores que o produto da massa/momento de inércia do submarino pelas acelerações observadas. Para compreender tal fenômeno, é conveniente distinguir três massas/momentos de inércia envolvidos nesse processo:

- I. A massa do submarino e seus sistemas;
- II. A massa de água circunscrita pelos tanques de lastro e áreas de livre alagamento (vela, superestrutura, etc.);
- III. A massa de água circundante ao submarino e que é acelerada por seus movimentos.

As massas e momentos de inércia relativos aos itens I e II podem ser assumidas como constantes para um dado envelope do submarino e para uma dada condição de carga (independentem, pois, do tipo de movimento realizado).

Já as massas e momentos de inércia relativos ao item III variam de acordo com o tipo de movimento. Em geral, diferentes quantidades de água serão linearmente/angularmente aceleradas na direção/em torno dos eixos x, y e z do movimento do submarino.

Essas massas e momentos de inércia (III), que variam de acordo com os respectivos movimentos, podem ser consideradas e/ou modeladas como:

- a) Massas/momentos de inércia adicionais que se agregam à massa/momento de inércia do submarino fazendo com que a força necessária para imprimir determinada aceleração ao navio seja maior do que a originalmente esperada;
- b) Forças hidrodinâmicas, originadas pela aceleração do submarino no meio fluido, que se opõem ao movimento do navio, reduzindo o efeito da força efetivamente exercida sobre o submarino.

Um equacionamento simplificado pode elucidar melhor a situação descrita. Consideremos um submarino de massa M transladando ao longo de um único eixo (a argumentação para movimentos angulares é análoga). Originalmente, caso o fenômeno das massas adicionais não ocorresse, seria esperado que uma dada força resultante (F_1) corresponderia a uma determinada aceleração (a_1) – situação

expressa pelo Princípio Fundamental da Dinâmica: $F_1 = Ma_1$. Devido ao fenômeno, entretanto, observa-se que a força efetivamente exercida (F_2) é maior que o produto da massa (M) pela aceleração observada (a_1). Assim, temos $F_2 > Ma_1$ ou $F_2 > F_1$! Pela interpretação do item “a”, o equacionamento adequado seria $F_2 = (M + m)a_1$, na qual m é a massa adicional. Manipulando a equação anterior, podemos obter a interpretação do item “b”, de fato $(F_2 - ma_1) = Ma_1$ ou $(F_2 - F_H) = Ma_1$, na qual F_H é a força hidrodinâmica citada. Observe que esse equacionamento garantiria a coerência do modelo newtoniano, ao assegurar $a_1 = F_1/M = F_2/(M + m) = (F_2 - F_H)/M$.

Por fim, forças de contato dinâmicas derivadas da ação de vento e ondas, e originadas da fonte 6, estarão presentes quando da operação em superfície. Essas forças são de especial interesse na avaliação da estabilidade dinâmica da embarcação (sobretudo, durante a transição de emersão).

C-4) Condições de equilíbrio

As forças e momentos atuando no submarino podem submetê-lo a estados de equilíbrio ou não-equilíbrio, que podem ser expressos pelas equações da Tabela 66.

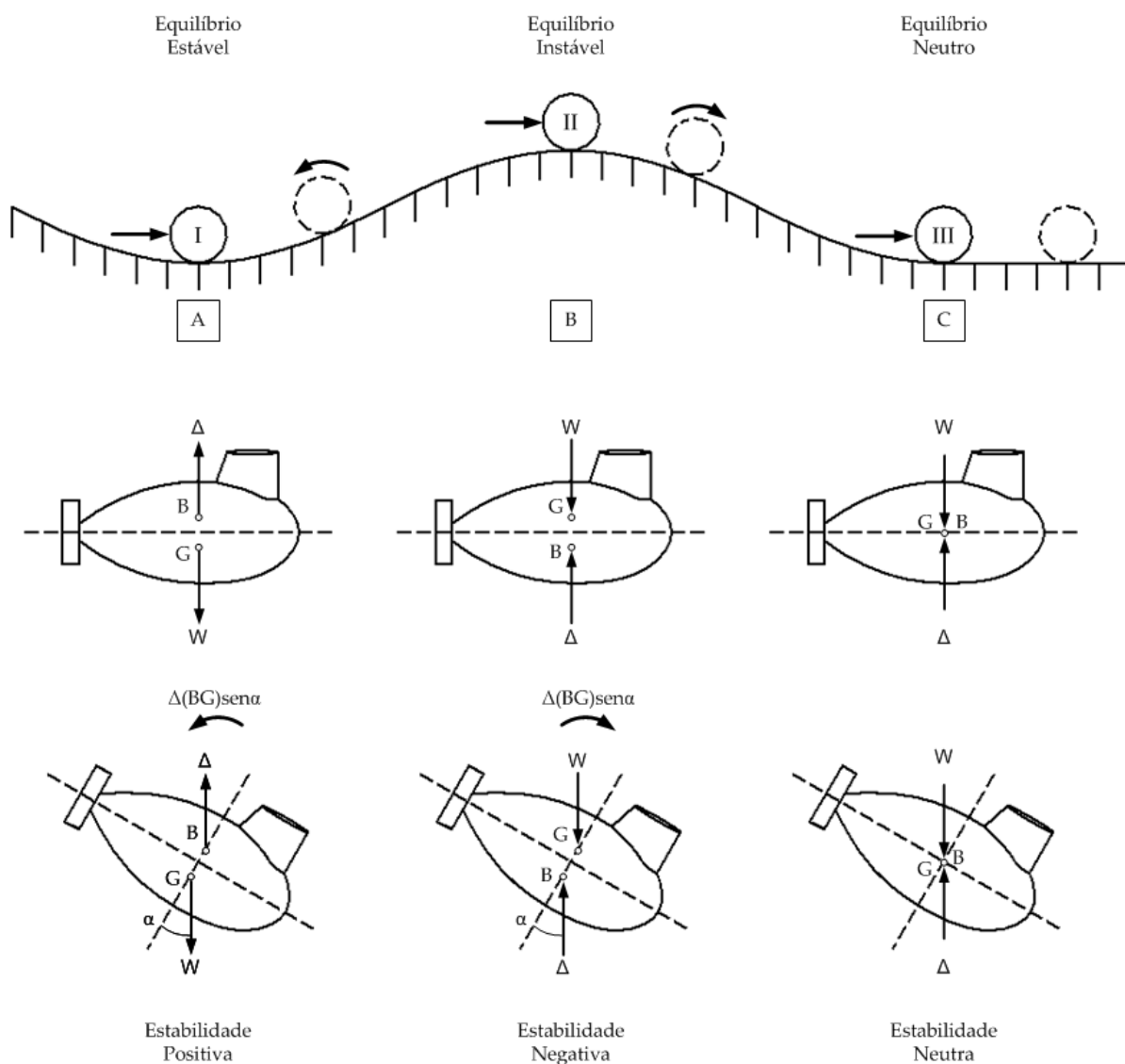
Se a resultante de todas as equações for nula, o submarino se encontra em estado de equilíbrio; ou seja, não possuirá movimento relativo em relação aos eixos x_0 - y_0 - z_0 (equilíbrio estático) ou possuirá movimento relativo, retilíneo e com velocidade constante, em relação a esses eixos (equilíbrio dinâmico) (ver Figura 75).

Tabela 66 – Equações de equilíbrio

Equação	Valor	Definição
X	= 0 ou ≠ 0	Resultante das forças ao longo do eixo x
Y	= 0 ou ≠ 0	Resultante das forças ao longo do eixo y
Z	= 0 ou ≠ 0	Resultante das forças ao longo do eixo z
K	= 0 ou ≠ 0	Resultante dos momentos em torno do eixo x
M	= 0 ou ≠ 0	Resultante dos momentos em torno do eixo y
N	= 0 ou ≠ 0	Resultante dos momentos em torno do eixo z

Para a Hidrostática, o estudo do equilíbrio estático é de especial interesse. Nessa condição, o somatório das forças e momentos atuantes no submarino é nulo. A situação de equilíbrio resultante pode ser estável, instável ou neutra (Figura 79).

Figura 79 – Condições de equilíbrio e estabilidade (condição submersa)



Fonte: adaptado [5]

Por exemplo, na Figura 79, assume-se que as esferas ilustradas nas posições A, B e C se encontram inicialmente em repouso e equilíbrio. Posteriormente, forças externas são aplicadas às esferas de forma a transladá-las ligeiramente de suas posições originais, sendo logo em seguida removidas (restando apenas as forças originais). Agora, para as esferas I e II, haverá momentos resultantes; o que não ocorre para a esfera III. Dessa forma:

- O momento atuante em I faz com que ela retorne ao ponto A. Assim, a condição inicial de equilíbrio em A é dita estável;
- O momento atuante em II faz com que ela se afaste mais ainda do ponto B. Assim, a condição inicial de equilíbrio em B é dita instável;

- Como não há momento atuante em III, ela voltará ao estado de repouso e equilíbrio em uma nova posição. Assim, a condição de equilíbrio em C é dita neutra.

As considerações acima podem ser estendidas ao estudo de equilíbrio do submarino. Na Figura 79, o submarino é representado em condição submersa e com flutuabilidade neutra. O equilíbrio longitudinal é tratado, mas as considerações para o equilíbrio transversal são análogas. Novamente, supõe-se que forças externas perturbam o equilíbrio original, inclinando o submarino de sua posição inicial. Observa-se que esta inclinação altera o estado de colinearidade entre W e Δ nas condições A e B, mas não o faz para a condição C. Nesse caso, temos:

- No caso A, como G (centro de gravidade) se situa abaixo de B (centro de carena), o momento devido a W e Δ tende a restaurar a posição original de equilíbrio. Assim, este equilíbrio é estável;
- No caso B, como G se situa acima de B , o momento devido a W e Δ tende a inclinar ainda mais o submarino. Assim, este equilíbrio é instável;
- No caso C, como G e B são coincidentes, não haverá momento devido a W e Δ e o submarino não tende a retornar à condição inicial, tampouco se inclina mais. Aqui o equilíbrio é neutro.

Torna-se evidente que não basta na prática que o submarino esteja em equilíbrio; esse equilíbrio deve ser estável¹⁹². No projeto, as seguintes condições devem ser atendidas:

1. Flutuabilidade neutra $\rightarrow W = \Delta$;
2. Ausência de trim e banda $\rightarrow W$ e Δ são colineares e sua linha de ação é normal ao plano x-y do submarino;
3. Equilíbrio estável $\rightarrow G$ abaixo de B ¹⁹³.

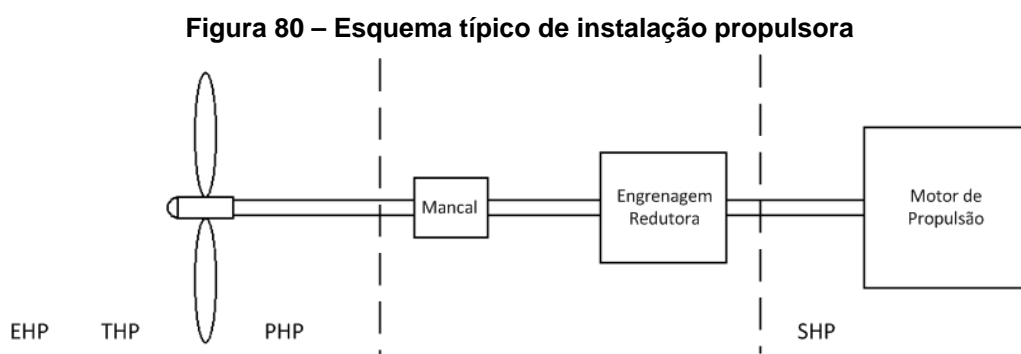
¹⁹² Embora a discussão tecida sobre a Figura 79 se refira ao submarino em condição submersa, as considerações para o equilíbrio em condição de superfície são análogas.

¹⁹³ Há que se ressaltar que, em condição de superfície, há situações nas quais o equilíbrio estável se dá mesmo com G acima de B (ver item 5.2.1.1).

(página deixada intencionalmente em branco)

APÊNDICE D - EFICIÊNCIA PROPULSIVA

Para subsidiar a presente discussão, o esquema típico de uma instalação propulsora é apresentado (Figura 80). As diversas potências, em diferentes pontos da instalação, são apresentadas.



Fonte: adaptado [5]

Inicialmente, é necessário considerar que há uma interação entre o casco e o hélice, de forma que a presença de um afeta o outro. Essa interação envolve as seguintes considerações [57]:

- a) Ao mover-se, o submarino arrasta consigo certa quantidade de água devido aos efeitos de camada limite¹⁹⁴. Assim, haverá uma certa velocidade de esteira da água (V_w) causada pelo efeito de atrito ao longo do casco. Essa velocidade da água tem a mesma direção da velocidade do submarino. Assim, a velocidade da água chegando ao hélice (que é igual à velocidade de avanço do hélice - V_a) é numericamente igual à diferença entre a velocidade do submarino e a velocidade de esteira ($V_a = V - V_w$ ou $V_w = V - V_a$);
- b) O hélice tende a "sugar" a água, à ré do submarino, em sua direção, o que causa variações na pressão do fluido em tal região. Na prática, essa variação no campo de pressão tende a aumentar a resistência do submarino ao movimento.

Costuma-se definir, a partir da discussão do item "a", um fator de esteira (w):

¹⁹⁴ Quando ocorre o movimento de um corpo no interior de um fluido, uma pequena camada de fluido se adere à superfície do corpo, sendo arrastada por ele. Dessa forma, a porção de água diretamente em contato com o submarino tem a mesma velocidade dele. Essa velocidade da água no entorno do submarino diminui gradativamente e, a certa distância, se torna nula. Essa porção de água, cuja espessura vai do ponto de contato com o casco (velocidade igual à do navio) até o ponto de velocidade nula, é denominada camada limite.

$$w = \frac{(V - V_a)}{V} \quad \text{eq. (34)}$$

Cujo rearranjo resulta:

$$V_a = (1 - w)V \quad \text{eq. (35)}$$

O efeito descrito no item "b" faz com que, para mover o submarino, o empuxo entregue pelo hélice tenha que ser maior que a resistência ao avanço (R_{av}) medida sem considerar a presença do hélice. Assim, a presença do hélice impõe uma resistência adicional. Isso pode ser representado matematicamente como um aumento da resistência ou uma diminuição do empuxo¹⁹⁵. Nesta segunda abordagem, é possível definir o fator de redução do empuxo como:

$$t = \frac{(T - R_{av})}{T} \quad \text{eq. (36)}$$

Alternativamente expressa como:

$$T = \frac{R_{av}}{(1 - t)} \quad \text{eq. (37)}$$

A determinação precisa de w e t envolve o teste de modelos. Para as fases iniciais de projeto é comum o uso de aproximações.

A conversão da potência fornecida pela instalação propulsora em empuxo envolve diversos passos. Conforme a eq. (7), a potência efetiva necessária para propelir o submarino (EHP) é igual ao produto da resistência ao avanço pela velocidade do submarino. Neste ponto, é conveniente enunciar a potência fornecida pelo hélice, que é o produto do empuxo pela velocidade de avanço do hélice [eq. (38)].

$$THP = TV_a \quad \text{eq. (38)}$$

A eq. (38) pode ser convenientemente manipulada, em conjunto com as demais equações, de forma que:

¹⁹⁵ Tomando essa segunda perspectiva, pode-se assumir que a força de empuxo deve vencer a resistência ao avanço do submarino e também essa parcela de resistência adicional, devida à presença do hélice.

$$\text{EHP} = \text{THP} \frac{(1-t)}{(1-w)} \quad \text{eq. (39)}$$

O termo $(1-t)/(1-w)$ é conhecido com eficiência do casco (η_H). Seus valores típicos se aproximam da unidade. Para os submarinos modernos (i.e. casco axissimétrico com hélice montado no eixo axial) este termo pode ser maior que 1. Dessa forma, em rigor, não se trata de uma eficiência. Entretanto, o termo "eficiência" é de uso consagrado e está presente na maioria dos textos de engenharia naval.

A potência entregue ao hélice pelo eixo (PHP) pode ser definida como:

$$\text{PHP} = 2\pi nQ \quad \text{eq. (40)}$$

Na qual:

n = velocidade de rotação do eixo;

Q = torque entregue ao hélice.

O que permite definir a eficiência do hélice:

$$\eta_p = \frac{\text{THP}}{\text{PHP}} = \frac{TV_a}{2\pi nQ} \quad \text{eq. (41)}$$

A eficiência do hélice (η_p) é produto de dois fatores, a eficiência em água aberta (η_o) e a eficiência relativa rotativa (η_r). A primeira é medida para o hélice sem interferência da esteira¹⁹⁶. A segunda representa a diferença entre η_o e a eficiência efetivamente medida na presença da esteira. Para submarinos, os valores para η_r se situam entre 0.95 e 1.

A potência no eixo (SHP) é a potência medida na saída do motor de propulsão. A diferença entre SHP e PHP ocorre devido a perdas por atrito nos mancais, conexões e/ou engrenagens reductoras (se presentes). Assim, é possível definir a eficiência da linha de transmissão (η_m):

$$\eta_m = \frac{\text{PHP}}{\text{SHP}} = \frac{Q}{Q_s} \quad \text{eq. (42)}$$

Na qual, Q_s é o torque na saída do motor.

¹⁹⁶ A eficiência em água aberta (η_o) depende do tipo de hélice, diâmetro, rotações por minuto, número de pás e outros parâmetros.

Com base nas equações acima, é possível definir o coeficiente propulsivo (PC):

$$PC = \eta_H \eta_r \eta_o \eta_m \quad \text{eq. (43)}$$

Quanto maior este coeficiente, maior a eficiência da instalação propulsora e, em tese, menor o tamanho do sistema de armazenamento de energia necessário (tanques de combustível e praças de baterias). Para submarinos, valores típicos de PC se situam na faixa de 0.55 a 0.85.

O que permite, por fim, enunciar a relação entre EHP e SHP:

$$SHP = \frac{EHP}{PC} \quad \text{eq. (44)}$$

APÊNDICE E - MODELO DE ANÁLISE ESTRUTURAL

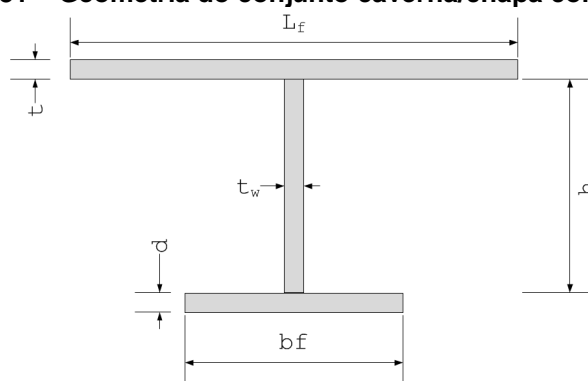
E-1) Apresentação do equacionamento

O modelo adotado foi elaborado com base no equacionamento disponível em [5]. As variáveis de entrada do modelo são expostas na Tabela 67.

Tabela 67 – Modelo de análise estrutural (variáveis de entrada e parâmetros)

Variáveis de entrada - submarino		
Var.	Definição	Valor
D	diâmetro do submarino [m]	Entrada
L	comprimento do submarino [m]	Entrada
L_{cil}	comprimento do trecho cilíndrico do CR [m]	Entrada
MOD	profundidade de operação [m]	Entrada
Variáveis de entrada - escantilhamento		
Var.	Definição	Valor
L_f	espaçamento de cavernas [m]	Entrada
t	espessura do casco [m]	Entrada
t_w	espessura da alma [m]	Entrada
h_w	altura da alma [m]	Entrada
b_f	largura do flange [m]	Entrada
d	espessura do flange [m]	Entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
p_y	pressão de escoamento entre cavernas [Pa]	Saída
p_b	pressão de flambagem entre cavernas [Pa]	Saída
p_{cr}	pressão de colapso global [Pa]	Saída
Parâmetros do modelo		
Par.	Definição	Valor
k_{61}	fator de segurança (1º modo de falha)	1.5
E	Módulo de Young do aço [GPa]	206
σ_y	tensão de escoamento do aço [MPa]	559
ρ_s	densidade do aço [kg/m ³]	7850
ν	coeficiente de Poisson	0.3
g	aceleração da gravidade [m/s ²]	9.81
ρ_{sw}	densidade da água do mar [kg/m ³]	1025

Figura 81 – Geometria do conjunto caverna/chapa colaborante



Fonte: adaptado [49]

Definindo o seguinte equacionamento auxiliar

Tabela 68 – Equacionamento auxiliar

Equacionamento	
$A_f = t_w h_w + b_f d$	eq. (45a)
$B = \frac{t_w t}{A_f + t_w t}$	eq. (45b)
$\theta = 10 \left[12(1 - \nu^2) \right]^{\frac{1}{4}} \left(\frac{L_f}{2R} \right) \left(\frac{50t}{R} \right)^{-\left(\frac{1}{2}\right)}$	eq. (45c)
$N = \frac{\cosh(\theta) - \cos(\theta)}{\sinh(\theta) + \sin(\theta)}$	eq. (45d)
$H = \frac{3\sinh\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \cosh\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\sinh(\theta) + \sin(\theta)}$	eq. (45e)

A pressão na qual ocorre o escoamento entre cavernas é dada por:

$$p_y = \frac{\sigma_y \frac{t}{R}}{1 + H \left(\frac{0,85 - B}{1 + \beta} \right)} \quad \text{eq. (46)}$$

A pressão na qual ocorre a flambagem entre cavernas é dada por:

$$p_b = \left[\frac{2,42E}{(1-\nu^2)^{\frac{3}{4}}} \right] \left\{ \frac{\left(\frac{t}{2R} \right)^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{L_f}{2R} - 0,45 \left(\frac{t}{2R} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \right\} \quad \text{eq. (47)}$$

Definindo novo equacionamento auxiliar, seja:

$$m = \frac{\pi R}{L_b} \quad \text{eq. (48a)}$$

$$n \leftarrow 1 : n_{\max} \quad \text{eq. (48b)}$$

Na eq. (48b), $n \geq 1$ e inteiro é o modo no qual ocorre o colapso global. Realizam-se sucessivos cálculos, computando a pressão de colapso para cada modo (n varia de 1 ao número máximo de iterações arbitrado n_{\max}), por meio da eq. (49)¹⁹⁷:

$$p_{cr} = \frac{Et}{R} \frac{m^4}{\left(n^2 - 1 + \frac{m^2}{2} \right) (n^2 + m^2)^2} + \frac{(n^2 - 1)EI}{R^3 L_f} \quad \text{eq. (49)}$$

Por fim, toma-se o modo que minimiza o valor de pressão. O valor mínimo é então assumido como o valor em que ocorrerá o colapso global (que ocorre em geral, para $n = 2, 3$ ou 4).

$$p_{cr} = \min(p_{cr}, n) \quad \text{eq. (50)}$$

Neste trabalho, a seguinte hierarquia de falhas para o casco resistente foi adotada:

1. Escoamento entre cavernas (primeiro modo de falha);
2. Flambagem entre cavernas (segundo modo de falha);
3. Colapso global (terceiro modo de falha).

¹⁹⁷ Nesta equação, I é o momento de inércia do perfil, formado pela caverna e pela chapa colaborante, em relação a sua linha neutra.

Inicialmente é definida uma pressão de colapso (p_{col}), obtida a partir da pressão à máxima profundidade de operação (*MOD*) acrescida de certo fator de segurança¹⁹⁸ (k_{61}). Nesse caso, temos:

$$p_{col} = k_{61} (\rho_{sw} g MOD) \quad \text{eq. (51)}$$

A partir disso, os seguintes critérios devem ser atendidos [49]:

- a) 1º modo de falha: $p_y > p_{col}$ (a pressão associada ao escoamento entre cavernas deve ser maior do que a pressão na qual se espera o colapso);
- b) 2º modo de falha: $1,5p_{col} \leq p_b \leq 2,5p_{col}$ (ou seja, a pressão de flambagem entre cavernas deve se situar em uma faixa de 50% a 150% maior que a pressão de colapso);
- c) 3º modo de falha: $p_y \leq p_b \leq p_{cr}$ (a pressão de escoamento deve ser menor ou igual à pressão de flambagem entre cavernas, que deve ser menor ou igual à pressão de colapso global).

¹⁹⁸ O fator de segurança é de geralmente 1.5 ou maior. O fator existe para compensar possível(eis):

- a) imprecisão nos cálculos;
- b) desvios em relação às geometrias de projeto;
- c) concentrações de tensão (ocasionadas por soldagem, penetrações no casco, etc.);
- d) falhas por fadiga;
- e) imperfeições na construção;
- f) redução das dimensões do escantilhamento devido à corrosão;
- g) incursões inadvertidas além da profundidade de operação.

Ao longo da vida útil do submarino, após muitos anos de operação, haverá desgaste natural das estruturas. Em alguns casos, os custos para restaurar o fator de segurança podem se revelar proibitivos. Sob tais circunstâncias, pode ser aconselhável considerar uma redução da *MOD* ou mesmo uma abreviação da vida útil do submarino.

Para as calotas esféricas, o equacionamento proposto em [58] será utilizado. Definindo o equacionamento auxiliar:

Tabela 69 – Equacionamento auxiliar

Equacionamento	Legenda/Comentários
$p_{cl} = \frac{2}{[3(1-\nu^2)]^{\frac{1}{2}}} E \left(\frac{t}{R_0} \right)^2$	eq. (52a) p_{cl} = pressão de colapso da esfera
$\lambda = [12(1-\nu^2)]^{\frac{1}{4}} \left(\frac{R_0}{t} \right)^{\frac{1}{2}} 2 \text{sen} \left(\frac{\varphi}{2} \right)$	eq. (52b) R_0 = raio da linha neutra da calota ¹⁹⁹ φ = metade do ângulo do setor circular da calota ²⁰⁰ [rad]

Para o caso do aço e de calotas hemisféricas as equações auxiliares acima se reduzem a:

$$p_{cl} = 1,2105E \left(\frac{t}{R_0} \right)^2 \quad \text{eq. (53)}$$

$$\lambda = 2,5708 \left(\frac{R_0}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{eq. (54)}$$

Isso permite que a pressão de colapso das calotas hemisféricas (p_{cr}) possa ser obtida por meio da equação seguinte:

$$\frac{p_{cr}}{p_{cl}} = 0,14 + \frac{3,2}{\lambda^2} \quad \text{eq. (55)}$$

Caso a p_{cr} calculada seja inferior à pressão de colapso ($p_{cr} < p_{col}$) a espessura da calota (t) é considerada adequada. Do contrário, essa espessura deverá ser aumentada até que tal critério seja satisfeito.

¹⁹⁹ No caso da calota hemisférica $R_0 = R - t/2$.

²⁰⁰ Neste trabalho, como a calota de fechamento é considerada hemisférica, $\varphi = \pi/2$.

E-2) Estimativa de peso do casco

Uma estimativa do peso estrutural pode ser obtida com base em cálculo racional.

Seja um cilindro não reforçado, de raio R e espessura t ($R \gg t$), submetido a uma pressão interna constante (p). A tensão circunferencial nas paredes do cilindro é dada por:

$$\sigma_h = \frac{pR}{t} \quad \text{eq. (56)}$$

Supondo que o cilindro será projetado para que o escoamento ocorra em um nível de pressão igual à pressão de colapso e que a equação do cilindro sob pressão interna é satisfatoriamente aplicável ao caso de carregamento por pressão externa, é razoável admitir que a espessura do cilindro reforçado, para um mesmo nível de pressão, será menor do que a do cilindro não reforçado. Assim, pode-se enunciar:

$$t = k_{62} \frac{pR}{\sigma_y} \quad \text{eq. (57)}$$

Na qual o fator $k_{62} < 1$.

Assumindo agora (ver Figura 77):

- $k_{62} = 0,9$;
- $L_f = 0,2R$;
- $t_w = t$;
- $h_w = 7t$;
- $b_f = L_f/3$;
- $d = 1,5t$.

Nesse caso, pode-se exprimir as relações geométricas de interesse como funções de R e t . A Tabela 70 apresenta o equacionamento resultante.

Tabela 70 – Equacionamento auxiliar

Equacionamento		Legenda/Comentários
$A_f = 7t^2 + 0,1Rt$	eq. (58a)	A_f = área transversal da caverna
$\bar{c} = \frac{31,5t^2 + 0,875Rt}{7t + 0,1R}$	eq. (58b)	c_barra = centróide da caverna
$\bar{y} = R - \bar{c}$	eq. (58c)	y_barra = distância linha de centro/centróide da caverna
$V_{cav} = 2\pi\bar{y}A_f$	eq. (58d)	V_{cav} = volume da caverna
$n_{cav} = \frac{L_{cil}}{L_f} + 1$	eq. (58e)	n_{cav} = número de cavernas (inteiro imediatamente superior ao resultado da equação)
$V_1 = \pi L_{cil} [2Rt - t^2]$	eq. (58f)	V_1 = volume do cilindro
$V_2 = \frac{4}{3}\pi[R^3 - (R - t)^3]$	eq. (58g)	V_2 = volume das calotas
$V_3 = n_{cav} V_{cav}$	eq. (58h)	V_3 = volume das cavernas
$W_{casco} = \rho_s \sum_{i=1}^3 V_i$	eq. (58i)	W_{casco} = peso do casco

Ressalta-se que o equacionamento apresentado é conservador e tem o mero objetivo de estimar o peso estrutural nas etapas iniciais do projeto de concepção. O escantilhamento assim obtido deve ser testado e estudado com maior detalhe conforme o projeto estrutural do navio prosseguir. Podem ser necessárias adaptações²⁰¹.

De qualquer modo, após uma bateria de testes realizados durante a elaboração desta dissertação, observou-se que as relações apresentadas tendem a produzir escantilhonamentos viáveis para profundidades entre 300 e 400 m, com adoção de aço estrutural HY-80 e relação L/D = 10.

²⁰¹ Em regra, o peso estimado do casco resistente poderá ser reduzido por meio de um processo de otimização estrutural (ver item 9.3). Análises preliminares indicam que o peso estimado por este método será cerca de 10 a 20% maior que o peso obtido após otimização estrutural. Neste contexto, uma opção seria, após extensiva bateria de testes e rodadas de otimização estrutural, reformular o valor de k_{62} e as equações propostas, de forma aproximar o peso estimado do valor de peso “otimizado”. Aqui, optou-se por não realizar tais ajustes em primeiro momento. Dessa forma, o valor da estimativa de peso estrutural permanecerá conservador e eventuais reduções de peso, decorrentes do processo de otimização, poderão ser avaliadas em contexto mais abrangente (i.e. permitindo que soluções de compromisso, como aumentos de *MOD*, possam ser analisadas e eventualmente estabelecidas).

(página deixada intencionalmente em branco)

APÊNDICE F – ALTERNATIVAS DE PROPULSÃO E PAYLOAD

F-1) Sistemas de Propulsão e *Payload*

Para os propósitos desta dissertação, é necessário definir previamente as opções de itens disponíveis para as instalações propulsoras (MEP, baterias e DG's) e para o *payload* do submarino. Em aplicações práticas, essas informações devem estar disponíveis logo no início do projeto, pois as diversas combinações possíveis delas produzirão navios com diferentes desempenhos e características.

Não obstante a dificuldade de obter informações fidedignas e em detalhe suficiente para subsidiar os estudos aqui empreendidos, algumas fontes de literatura aberta, bem como informações publicitárias de fabricantes, permitem o estabelecimento de um conjunto de sistemas alternativos suficientes para os presentes propósitos. As adaptações efetuadas e hipóteses assumidas são descritas nos itens seguintes.

F-2) Propulsão

As alternativas para a escolha do Motor Elétrico Principal (MEP) são listadas na Tabela 71. Elas se baseiam no modelo proposto na referência [59], para um motor elétrico de pólos permanentes. As dimensões e características desse modelo foram adaptadas para a obtenção da alternativa MEP1 descrita na tabela. As características das demais alternativas foram definidas arbitrariamente, exceto os valores de potência, que procuram refletir patamares próximos aos de submarinos reais, conforme a referência [1].

Tabela 71 – 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

O MEP estará associado a dois gabinetes inversores, localizados preferencialmente em compartimento segregado, de dimensões

(comprimento/largura/altura) iguais a 2,3 x 0,9 x 1,7 metros, peso unitário de 6 toneladas e consumo de 3 kW cada.

As alternativas para a escolha dos Diesel Geradores (DG's) são listadas na Tabela 72. Elas foram adaptadas a partir de modelos dos fabricantes MTU e CAT e a partir de informações da referência [60], da referência [34] e de catálogos disponíveis na internet.

Tabela 72 – Diesel-Geradores

Características	DG1	DG2	DG3
Comprimento [m]	4,9	4,6	5,2
Largura [m]	1,6	1,5	1,7
Altura [m]	2,9	2,6	2,7
Peso [t]	13,0	14,0	16,0
Consumo [kg/kW.h]	0,280	0,268	0,211
Potência [kW]	1200	1300	1500

Para as alternativas de baterias cabe explicação preliminar.

As tecnologias presentemente disponíveis para aplicação em submarinos incluem baterias de zinco-prata, íon-lítio, níquel-cádmio e chumbo-ácido [3] [34]. Estas últimas, atualmente, são as de aplicação mais comum. A quantidade de energia (kW.h) disponível nas células durante a descarga será maior quanto maior for o tempo de descarga. Isso pode ser expresso pela seguinte formulação empírica [15] [18]:

$$E(t) = k_{bat} t^n \quad \text{eq. (59)}$$

Na qual k_{bat} é uma constante que depende do tipo de bateria, t é o tempo de descarga e $n \ll 1$.

O regime de carga das baterias é em geral realizado em duas etapas [15]:

1. As baterias são carregadas sob corrente constante e voltagem crescente até que determinado patamar de voltagem (2,4 V) seja atingido;
2. Daí, a corrente é reduzida gradualmente até a um patamar mínimo, enquanto a voltagem é mantida constante. Esse processo continua até que o nível de carga desejado seja atingido.

Aqui, de forma a simplificar o equacionamento do modelo de síntese, é preferível exprimir a energia disponível na forma²⁰²:

$$\begin{aligned} E(w \leq w_{\min}) &= n_{\text{cell}} E_0 \\ E(w > w_{\min}) &= n_{\text{cell}} [k_1 - k_2 \ln(w)] \end{aligned} \quad \text{eq. (60)}$$

Na qual:

E = energia armazenada nas baterias [kW.h];

E_0 = energia armazenada na célula (baixa taxa de descarga) [kW.h];

w_{\min} = nível de baixa taxa de descarga [kW];

n_{cell} = número de células de baterias;

k_1 e k_2 = constantes típicas da célula de bateria;

w = taxa de descarga por célula [kW].

Daí, as seguintes opções de baterias foram arbitrariamente definidas, com base nas informações constantes em [34], [61] e [15]. As dimensões e peso indicados referem-se a uma célula (Tabela 72).

Tabela 73 – Baterias

Características	BAT1	BAT2	BAT3
Comprimento [m]	0,50	0,50	0,55
Largura [m]	0,36	0,36	0,40
Altura [m]	1,35	0,80	1,40
Peso [t]	0,68	0,40	0,71
w_{\min} [kW]	0,5	0,3	0,5
E_0 [kW.h]	31,7	21,0	50,3
k_1	29	18	46
k_2	3,9	2,5	6,2

A alternativa BAT3 representa uma célula de alta densidade de energia. As demais opções possuem características semelhantes às de baterias chumbo-ácido comumente empregadas. Assume-se, por hipótese, que os modelos de baterias

²⁰² Do contrário, a expressão do tempo na condição submersa (e consequentemente da taxa de indiscrição), por depender da expressão da energia armazenada, passaria a ser função de parâmetros como voltagem média e níveis de corrente de carga. Dessa forma, optou-se por simplificar o equacionamento, evitando o modelo mais sofisticado.

listados são adequados aos níveis de corrente de carga resultante das combinações dos equipamentos propostos²⁰³.

F-3) Abordagem adotada para os itens de *payload*

No caso dos itens de *payload*, a dificuldade de obtenção de informações básicas (e.g. dimensões, peso e consumo elétrico) sobre os diversos equipamentos, em fontes abertas, é considerável. Diante disso, optou-se neste trabalho por uma abordagem simplificada para a determinação desses itens.

Como base em análise das informações disponíveis em diversas referências (e.g. [34], [16] e apresentações da conferência SUBCON 2011), foram estabelecidos conjuntos de opções para itens hipotéticos de *payload*. Tais itens procuram refletir características de equipamentos efetivamente disponíveis no mercado, com graus de precisão e simplificação adequados ao presente trabalho²⁰⁴.

Para cada opção, uma estimativa da quantidade de gabinetes e consoles associados é fornecida. Adicionalmente, as opções foram arbitrariamente hierarquizadas por meio de um índice que estabelece, quantitativamente, diferenças qualitativas de desempenho entre as opções.

F-4) Configurações da vela

Parte das funções desempenhadas pelos itens de *payload* (e.g. reconhecimento, identificação de alvos, comunicações, navegação, medidas de apoio à guerra eletrônica, etc.) envolverá mastros e sensores localizados na vela²⁰⁵. Dessa forma, é conveniente estabelecer configurações geométricas básicas para a vela, cada uma associada a determinadas funções.

No presente caso, quatro configurações de base foram arbitradas (Figura 78).

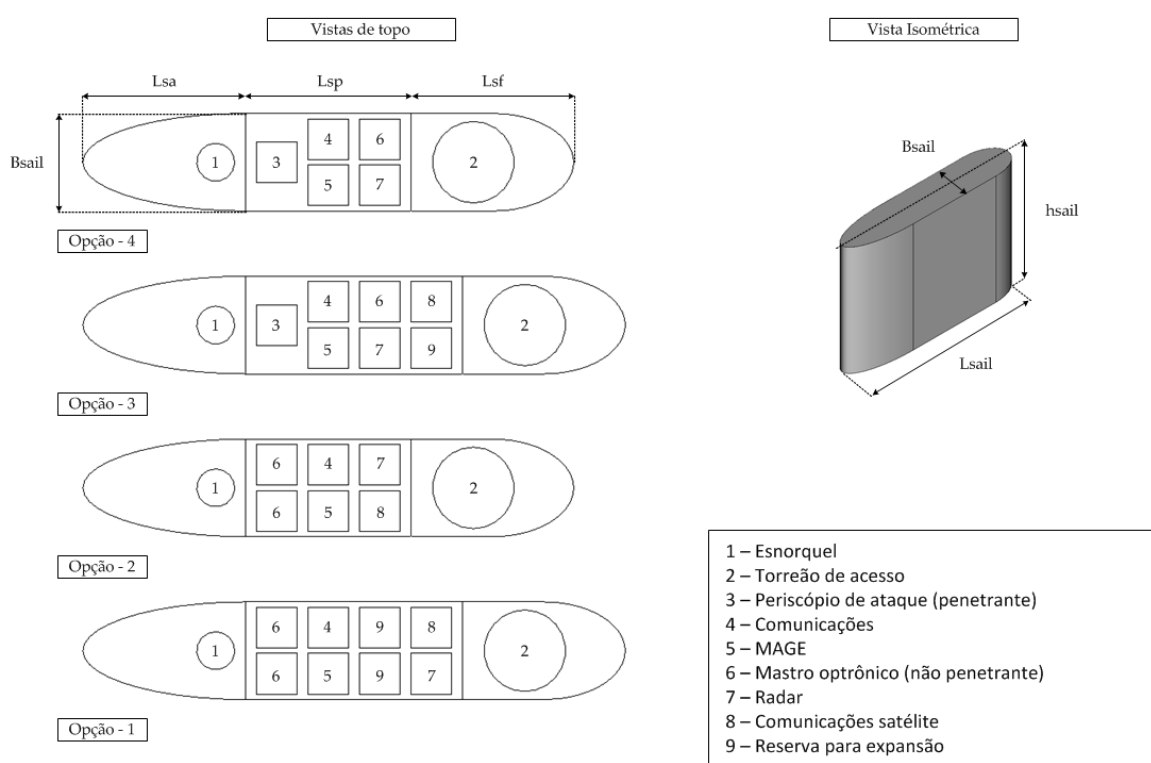
²⁰³ No caso de projetos reais, esse é um valor que deve ser verificado. Níveis de corrente máxima, para baterias chumbo-ácido, situam-se na faixa de 2500 a 3000 A.

²⁰⁴ Ou seja, para permitir a avaliação e comparação de diferentes alternativas de *payload* em termos de sua efetividade e das demandas e restrições que elas representam à integração do submarino. A metodologia aqui empregada é imediatamente aplicável no caso de equipamentos reais, desde que se disponha de informações sobre eles.

²⁰⁵ Em rigor, a presença da vela é indesejável em termos de resistência ao avanço e desempenho hidrodinâmico [4]. Entretanto, sua presença é necessária justamente para abrigar esses mastros e apêndices externos (torreão e esnorquel), provendo proteção e contorno hidrodinâmico favorável ao envolver tais itens.

Todas as configurações contam com mastro de esnorquel, torreão de acesso, mastros de comunicações, mastro de medidas de apoio à guerra eletrônica (MAGE), pelo menos um mastro optrônico e mastro de radar. As seções curvas de ré e vante possuem geometria elíptica. Os *slots* para arranjo dos mastros têm 0,75 x 0,75 m. Em todas as configurações, $L_{sa} = L_{sf} = 3,0$ m, $h_{sail} = 6$ m (altura da vela) e $B_{sail} = 1,8$ m. Nas configurações 1 e 3, $L_{sp} = 4$ m, nas configurações 2 e 4, $L_{sp} = 3,05$ m. Os diâmetros dos mastros de esnorquel e do torreão de acesso são, respectivamente, 0,7 e 1,5 m.

Figura 82 – Configurações da vela



Fonte: autor

F-5) Itens de *payload*

Armamento

Modelos hipotéticos de torpedos, minas e mísseis são utilizados neste estudo. Eles se baseiam, respectivamente, nos torpedos MK-48 e minas MK-57 americanos e nos mísseis SM-39 franceses. Assume-se, por hipótese, que o sistema de manejo de armas e os tubos de lançamento são adequados à operação dos armamentos considerados. Além disso, assume-se que as cápsulas de lançamento das

minas/mísseis possuem as mesmas dimensões dos torpedos²⁰⁶. Os dados dos armamentos hipotéticos são listados na Tabela 74.

Tabela 74 – Armamento

Características	Torpedos	Mísseis	Minas
Comprimento [m]	5,800	5,800	5,800
Diâmetro [m]	0,533	0,533	0,533
Peso [t]	1,560	0,700	1,510

Radares

Considera-se que o submarino será dotado de um radar, utilizado para navegação em superfície. Os modelos hipotéticos são listados na Tabela 75.

Tabela 75 – Radares

Características	RD1	RD2	RD3
Gabinetes	2	1	1
Índice de mérito	0,430	0,335	0,235

Sonares

Considera-se que o submarino será dotado de um sonar cilíndrico passivo (para detecção em médias frequências), localizado na região de livre alagamento de vante. Os modelos hipotéticos são listados na Tabela 76.

Tabela 76 – Sonares passivos (*cylindrical array*)

Características	CA1	CA2	CA3
Altura [m]	1,2	1,1	0,9
Diâmetro [m]	2,8	2,7	2,9
Peso [t]	2,8	2,4	2,1
Gabinetes	8	6	5
Consoles	1	2	2
Índice de mérito	0,371	0,327	0,302

Além disso, para determinação de marcação, o submarino contará com sonares passivos específicos montados na superestrutura. De pequenas dimensões, eles são dispostos ao longo do comprimento do submarino e seu arranjo, em geral,

²⁰⁶ Admite-se que cada cápsula pode carregar um míssil ou duas minas. Os pesos informados já consideram esses totais.

não é considerado nas etapas iniciais do projeto. Os modelos hipotéticos são listados na Tabela 77.

Tabela 77 – Sonares passivos (*distributed array*)

Características	DA1	DA2
Gabinetes	3	1
Consoles	1	1
Índice de mérito	0,521	0,479

Para a detecção e classificação de contatos (baixas e médias frequências), costuma-se utilizar sonares de flanco ou sonares rebocados. Sonares de flanco são montados ao longo do casco externo. Sonares rebocados representam uma demanda adicional de volume nas áreas de livre alagamento, podendo ser montados na parte interna dos hidroplanos ou na superestrutura. Nas etapas iniciais de projeto, eles não são considerados no arranjo externo. Os modelos hipotéticos são listados na Tabela 78.

Tabela 78 – Sonares de flanco/rebocados (*flank/towed array*)

Características	FTA1	FTA2	FTA3
Tipo	Rebocado	Flanco	Flanco
Gabinetes	4	3	2
Consoles	1	1	1
Índice de mérito	0,370	0,349	0,281

Por fim, admite-se que um modelo de sonar para detecção de minas e obstáculos no setor de vante do submarino seja empregado. Os modelos hipotéticos considerados são listados na Tabela 79.

Tabela 79 – Sonar de detecção de minas

Características	MOA1	MOA 2
Gabinetes	2	1
Consoles	-	-
Índice de mérito	0,600	0,400

Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica - MAGE

Tais sistemas provêm suporte ao submarino quando irradiado por emissões eletromagnéticas. Isso envolve a interceptação, determinação de marcação,

identificação, registro e análise das emissões (eventualmente provenientes de ameaças ou objetivos de interesse).

Considera-se que o submarino será dotado de um sistema MAGE. Os modelos hipotéticos são listados na Tabela 80.

Tabela 80 – Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica

Características	EW1	EW2	EW3
Gabinetes	1	1	1
Consoles	1	-	-
Índice de mérito	0,408	0,318	0,274

Comunicações²⁰⁷

Os sistemas de comunicações para submarinos cobrem, virtualmente, quase todas as freqüências de aplicação militar. Há certa especialização nas faixas de freqüência de cada sistema. Por exemplo, sistemas de comunicações via satélite operam em altíssima freqüência e provêm boa taxa de transferência de dados, mas têm o inconveniente de demandar operação em cota periscópica (o que aumenta a vulnerabilidade do submarino). Por seu turno, sistemas de baixíssima freqüência (ELF e VLF) permitem recepção a maiores profundidades (mantendo-se a discrição), mas a baixas taxas de transferência de dados.

Os modelos hipotéticos dos sistemas de comunicação, considerados neste trabalho, são listados nas Tabelas 81 e 82 (algumas opções dispõem de antena rebocada e demandam volume interno adicional). Ressalta-se que apenas as configurações de vela de 1 a 3 contam com mastros de comunicação satélite.

Tabela 81 – Sistemas de comunicação

Características	COM1	COM2	COM3
Antena rebocada	Sim	Sim	Não
Volume interno [m ³]	1,5	1,0	-
Gabinetes	3	2	1
Consoles	1	1	1
Índice de mérito	0,397	0,325	0,278

²⁰⁷ Um bom resumo sobre o tópico, que fundamenta a discussão acima, está disponível em <http://fas.org/man/dod-101/navy/docs/scmp/part06.htm>. Acesso em Outubro/2015.

Tabela 82 – Sistemas de comunicação satélite

Características	SAT1	SAT2
Gabinetes	2	1
Consoles	-	-
Índice de mérito	0,408	0,318

Mastros optrônicos

Mastros optrônicos possuem sensores com capacidade aprimorada para visualização e reconhecimento do ambiente operacional externo. Em geral possuem capacidade para gravação de imagens em alta definição, visão noturna, imagens em infravermelho (imagem térmica) e telemetria a laser.

Os modelos hipotéticos dos mastros optrônicos, considerados neste trabalho, são listados na Tabela 83. Para as configurações de vela que possuem mastros optrônicos redundantes, admite-se por hipótese que o número de gabinetes e consoles é o mesmo que para um único mastro do respectivo modelo.

Tabela 83 – Mastros optrônicos

Características	OPT1	OPT2
Gabinetes	2	1
Consoles	1	1
Índice de mérito	0,588	0,412

Sistemas de gerenciamento integrado da plataforma

Considera-se que o submarino será dotado de um sistema de gerenciamento integrado da plataforma. Os modelos hipotéticos são listados na Tabela 84.

Tabela 84 – Sistemas de gerenciamento integrado da plataforma

Características	PM1	PM2	PM3
Gabinetes	1	1	1
Consoles	1	-	-
Índice de mérito	0,408	0,318	0,274

F-6) Considerações adicionais

As seguintes informações, definidas arbitrariamente, sobre os gabinetes/consoles são de interesse:

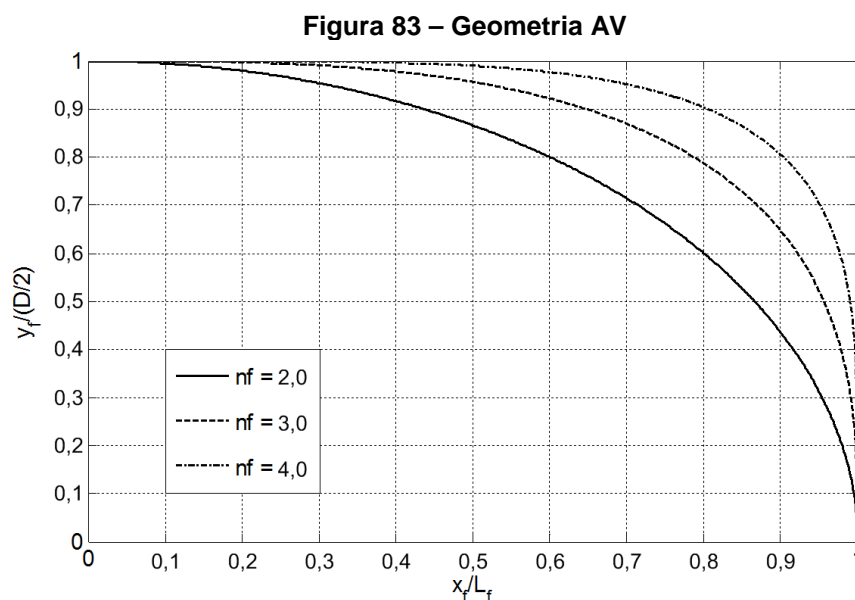
- Dimensões (comprimento x largura x altura) [m]: (0,6 x 0,6 x 1,8);
- Peso aproximado [kg]: 180;

- Consumo elétrico console [kW.h]: 1;
- Consumo elétrico gabinete [kW.h]: 2;
- Área de convés média nos compartimentos de gabinetes [m²/gab.]: 1,8.

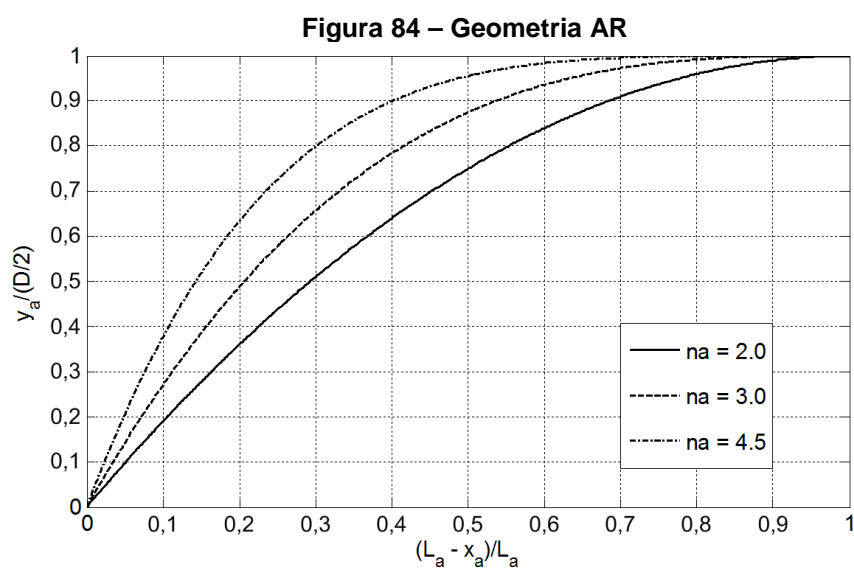
O projeto também deverá considerar duas estações de controle do submarino (manobra e painel de águas), que serão localizadas no compartimento do comando. Uma dessas estações tem peso aproximado de 250 kg e dimensões em metros (comprimento x largura x altura) de (1,1 x 2,7 x 1,8). A segunda estação tem 180 kg e dimensões (1,0 x 0,8 x 1,8). Os consumos são respectivamente de 3 e 1 kW.h.

APÊNDICE G - GEOMETRIAS (AR E AV) E VALORES TABULARES DE K1 E K2

As figuras seguintes fornecem a geometria adimensionalizada das regiões de vante e ré para diferentes valores dos fatores de forma.



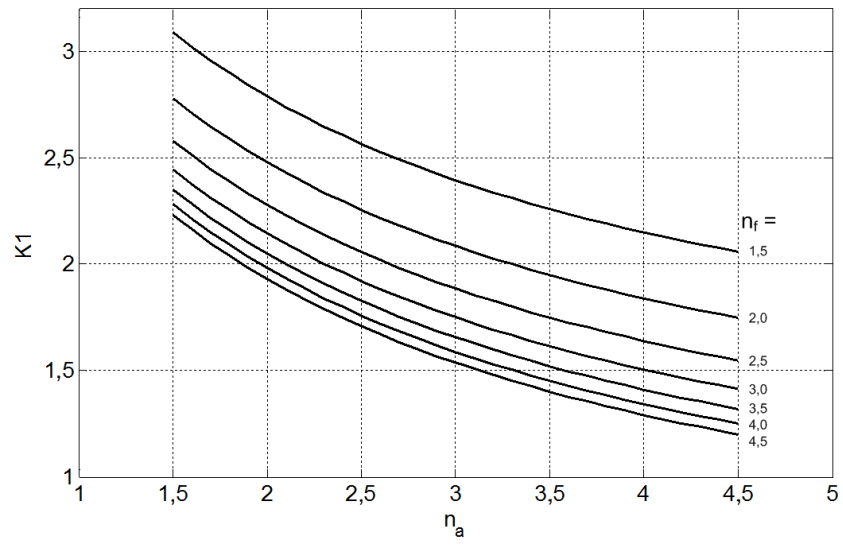
Fonte: adaptado [49]



Fonte: adaptado [49]

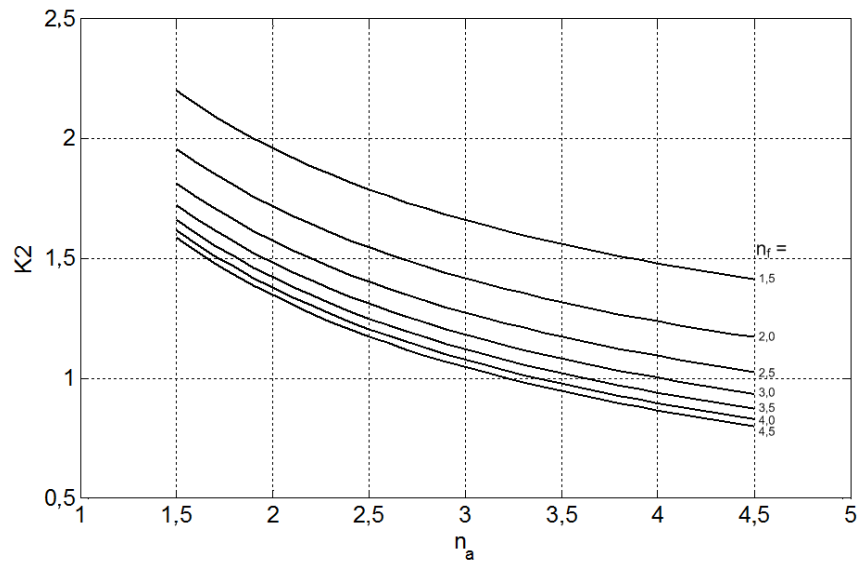
As figuras seguintes fornecem os valores tabulares de K1 e K2 para diferentes valores dos fatores de forma.

Figura 85 – Fator de volume K1



Fonte: adaptado [49]

Figura 86 – Fator de área molhada K2



Fonte: adaptado [49]

APÊNDICE H - PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO - AHP

H-1) O Processo Analítico Hierárquico

O Processo Analítico Hierárquico foi desenvolvido por Thomas Saaty, na década de 1970. Na definição do próprio autor [62]:

“The Analytic Hierarchy Process (AHP) is a theory of measurement thought pairwise comparisons and relies on judgments of experts to derive priority scales (...). The comparisons are made using a scale of absolute judgments that represents, how much more, one element dominates another with respect to a given attribute. The judgments may be inconsistent, and how to measure inconsistency and improve judgments (...) is a concern of the AHP.”²⁰⁸

A técnica tem sido usada em diversos campos do conhecimento e fornece uma abordagem estruturada para suporte à tomada de decisão, sobretudo diante de questões interdisciplinares e/ou de elevada complexidade. A referência [63] lista uma série de aplicações práticas do AHP.

Uma das maiores vantagens do método, traduzida pela ampla gama de situações práticas nas quais tem sido aplicado, é sua flexibilidade. A técnica permite que critérios cuja mensuração é quantitativa (e.g. no caso de um automóvel: velocidade, potência, consumo, etc.) sejam comparados com critérios para os quais a mensuração é subjetivamente determinada ou qualitativa (e.g. ainda no caso do automóvel: beleza, conforto interior, etc.)²⁰⁹.

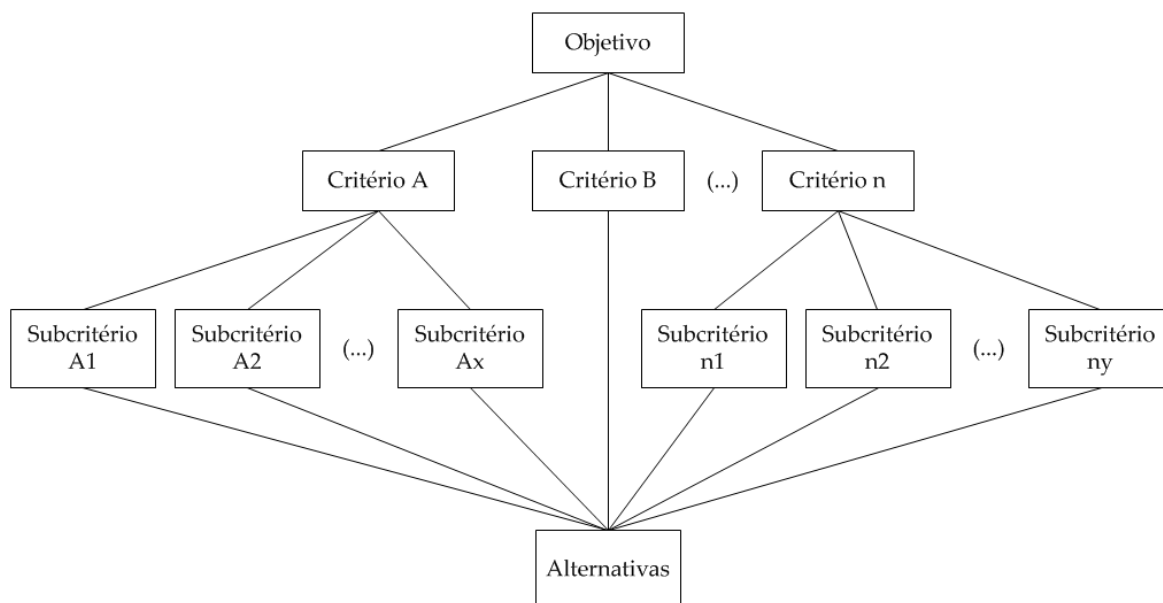
De forma a estabelecer as comparações em pares, dos diversos elementos de interesse, é necessário primeiramente estabelecer uma hierarquia (i.e. uma abstração do sistema/problema estudado, que procura capturar seus elementos

²⁰⁸ O Processo Hierárquico Analítico (AHP) é uma teoria de mensuração por meio de comparação em pares [das performance/atributos] que se baseia no julgamento de especialistas para derivar escalas de prioridade. As comparações são feitas com o uso de uma escala de julgamentos absolutos que representa, em termos de intensidade, o quanto um elemento domina outro em relação a um dado atributo [performance]. Tais julgamentos podem ser inconsistentes, de forma que o problema de como medir a inconsistência e aprimorar os julgamentos é de interesse para o AHP. (Tradução livre).

²⁰⁹ Saaty classifica como *tangíveis* os atributos que podem ser numericamente mensurados e como *intangíveis* aqueles cuja mensuração depende de fatores subjetivos, inerentes ao avaliador (i.e. suas crenças/percepções sobre si mesmo e sobre a realidade circundante).

mais importantes e dispô-los de forma estruturada). A hierarquia deverá explicitar o objetivo, os critérios principais, os subcritérios e as alternativas²¹⁰ (Figura 87)

Figura 87 – Hierarquia AHP (forma genérica)



Fonte: adaptado [64]

Após o estabelecimento da hierarquia, as comparações por pares podem ser efetuadas. Nessas comparações, uma escala numérica é utilizada para indicar a prioridade de um elemento em relação ao outro, segundo o critério (performance) sob análise. Um exemplo desse tipo de escala é fornecido na Tabela 85:

²¹⁰ Manteve-se, neste apêndice, a nomenclatura proposta em [63]. Sua correspondência, com os termos anteriormente usados nesta dissertação (que estão mais próximos do proposto em [6]) é a seguinte:

Objetivo = objetivo;

Critérios = performances críticas;

Subcritérios = performances derivadas;

Alternativas = atributos/variáveis.

Tabela 85 – Escala de prioridades (adaptada de [62])

Intensidade	Definição	Detalhes
1	Importância igual.	As atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada de um critério em relação ao outro.	Experiência/julgamento favorecem moderadamente um critério em relação ao outro.
5	Importância forte de um critério em relação ao outro.	Experiência/julgamento favorecem fortemente um critério em relação ao outro.
7	Importância muito forte de um critério em relação ao outro.	Um critério é fortemente favorecido e sua dominância é demonstrada na prática.
9	Importância extrema de um critério em relação ao outro.	A evidência favorecendo um critério em relação é da mais alta ordem possível de se verificar.
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre dois níveis adjacentes.	
Reciprocidade	Na comparação entre o critério i e o critério j, um dos valores acima será atribuído e a comparação entre j e i necessariamente possuirá valor recíproco.	

O número total de comparações efetuadas, no caso de n elementos (critérios), é igual a $n(n - 1)/2$. A partir das comparações, serão estabelecidas matrizes de julgamento na forma genérica:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Com as seguintes propriedades:

- $a_{ij} > 0$;
- Se $i = j$, $a_{ij} = 1$;
- $a_{ij} = 1/a_{ji}$.

A propriedade “a” é fruto da própria estrutura numérica da escala de prioridades. A propriedade “b” advém do fato de a prioridade de um elemento, em relação a si mesmo, ser naturalmente unitária. A prioridade “c” é conhecida como

reciprocidade; uma vez definida a prioridade entre os elementos X e Y, a prioridade entre Y e X decorre de imediato e tem valor recíproco ao da primeira.

Definida a matriz de julgamento A, é necessário o cálculo de seus autovalores (λ) e autovetores (v), conforme a definição:

$$Av = \lambda v \quad \text{eq. (61)}$$

Tais entes matemáticos possuem diversas interpretações físicas e/ou aplicações práticas em engenharia. Aqui, eles permitem estabelecer os pesos (ou importância relativa) entre os critérios analisados (a partir de v) e o índice de consistência da matriz de julgamento (a partir de λ).

Assim, dado o autovetor W de A , associado a seu autovalor principal (ou máximo) λ_{\max} , o problema em tela envolve a resolução da seguinte equação matricial:

$$AW = \lambda_{\max} W \quad \text{eq. (62)}$$

Deriva-se, então, o vetor de pesos w (i.e. o autovetor W normalizado) cujos elementos são dados por:

$$w_i = W_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad \text{eq. (63)}$$

Os pesos assim obtidos são usados como um indicador da prioridade relativa entre os critérios julgados.

Há, entretanto, uma hipótese subjacente ao estabelecimento dos pesos que deve ser verificada: a de que a matriz de julgamento é consistente.

H-2) Consistência da matriz de julgamento

Após o estabelecimento dos pesos, resta a tarefa de verificar a consistência da matriz de julgamento. Antes, porém, o conceito de consistência deve ser delimitado para os presentes propósitos.

Em termos simplificados, a idéia de consistência do julgamento esta associada a um princípio de Lógica Elementar conhecido como *Propriedade*

*Transitiva*²¹¹. Imaginemos a tarefa de priorização entre três critérios (A, B e C) em relação a determinado objetivo. Uma possível escala de prioridades entre tais critérios, estabelecida por um julgador hipotético, pode ser:

$$A < B$$

$$A > C$$

$$B < C$$

Tal julgamento padece de vício de lógica uma vez que, pela propriedade transitiva, se $A < B$ e $B < C$, deveríamos ter $A < C$.

No caso de matrizes, pode-se demonstrar que em uma matriz de julgamento perfeitamente consistente $a_{ij}a_{jk} = a_{ik} \forall i, j$ e k . Saaty aponta, porém, que julgadores humanos possuem limitação natural em manusear um número extenso de informações simultâneas. Essa limitação faz com que matrizes de julgamento com muitos critérios apresentem, em maior ou menor grau, certo desvio de consistência. Nesse sentido, há vantagem no fato da matriz ser recíproca. Isso faz com que pequenos desvios de consistência acabem sendo globalmente compensados²¹².

Entretanto, é necessário estabelecer alguma métrica que permita avaliação quantitativa do grau de inconsistência eventualmente presente. Assim, Saaty propõe o estabelecimento de um índice de consistência (CI) dado por:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{eq. (64)}$$

Saaty aplicou a eq.(64) a um grande número de matrizes aleatórias com as mesmas propriedades de A (i.e. $a_{ij} > 0$, $a_{ij} = 1$ se $i = j$ e $a_{ij} = 1/a_{ji}$) e calculou a média dos valores obtidos. Essa média é denominada índice aleatório de consistência (RI) e pode ser expressa como:

$$RI = \frac{\bar{\lambda}_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{eq. (65)}$$

Na qual a média dos autovalores principais é utilizada.

Agora, o índice CI pode ser estabelecido para a matriz de julgamento e sua comparação com RI permite derivar a taxa de consistência (CR):

²¹¹ Basicamente, se $A < B$ e $B < C$, temos $A < B < C$ e necessariamente $A < C$ (da mesma forma, $A > B > C \rightarrow A > C$).

²¹² Isso pode ser intuitivamente verificado. Convida-se o leitor interessado a refletir um pouco sobre a questão!

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{eq. (66)}$$

A matriz de julgamento é considerada adequada se $CR \leq 0.10$.

Entretanto, a complexidade dos cálculos envolvidos na resolução da eq. (61) torna a determinação de RI computacionalmente onerosa. Assim, é comum que valores tabulares de RI em função de n sejam usados.

Alternativamente, conforme apresentado em [64], o valor médio de λ_{\max} calculado para um grande número de matrizes aleatórias (500 mil), com $3 \leq n \leq 13$, pode ser estimado por²¹³:

$$\bar{\lambda}_{\max} = 2,7699n - 4,3513 \quad \text{eq. (67)}$$

Além disso, sendo $CR \leq 0.10$, é possível manipular as equações 64, 65, 66 e 67 e obter uma expressão que permite avaliar a consistência da matriz de julgamento (A) a partir de seu autovalor principal (λ_{\max}):

$$\lambda_{\max} \leq 1,17699n - 0,43513 \quad \text{eq. (68)}$$

²¹³ Frise-se que para $n = 2$ o autovalor principal da matriz é igual a n , o que a torna necessariamente consistente.

APÊNDICE I – QUESTIONÁRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA OMOE

Para a determinação dos pesos utilizados na formulação da Medida Geral de Efetividade (OMOE) do submarino, o questionário a seguir foi apresentado aos especialistas consultados.

Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	Combatividade	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mobilidade
2	Combatividade	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Discrição
3	Combatividade	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Presença
4	Mobilidade	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Discrição
5	Mobilidade	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Presença
6	Discrição	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Presença

Definições:

Objetivo: Maximizar a Efetividade Militar do submarino.

Combatividade: Capacidade de empreender ações de combate no Teatro de Operações (TO).

Mobilidade: Capacidade de se mover no TO (Assumir posição/Engajar/Evadir).

Discrição: Capacidade de evitar detecção durante a operação (trânsito/patrolha).

Presença: Capacidade de se manter autonomamente no TO e em condições de contactar as forças amigas/base.

A - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: Combatividade → Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	ASuW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ASW
2	ASuW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SPW
3	ASuW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MIW
4	ASuW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	INT
5	ASuW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C3
6	ASW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SPW
7	ASW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MIW
8	ASW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	INT
9	ASW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C3
10	SPW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MIW
11	SPW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	INT
12	SPW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C3

13	MIW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	INT
14	MIW	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C3
15	INT	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C3

Definições:

Combatividade: Capacidade de empreender ações de combate no Teatro de Operações (TO).

ASuW: Guerra antissuperfície (detectar/atacar meios de superfície).

ASW: Guerra antissubmarina (detectar/atacar submarinos).

SPW: Conduzir operações especiais (infiltração/retirada de forças especiais).

MIW: Realizar ações de minagem e evitar colisão com minas inimigas.

INT: Conduzir operações de inteligência (levantamento de informações).

C3: Ações de comando, controle, comunicações.

A1 - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: ASuW → Combatividade →Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	nwlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	nrlt
2	nwlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	sonar
3	nwlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
4	nwlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE
5	nrlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	sonar
6	nrlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
7	nrlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE
8	sonar	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
9	sonar	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE
10	periscópios	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE

Definições:

ASuW: Guerra antissuperfície (detectar/atacar meios de superfície).

nwlt: número de tubos lançadores de armas.

nrlt: número de armas armazenadas a bordo (exceto nos tubos – torpedos/mísseis/minas).

sonar: sistemas sonar (detecção/marcação/classificação).

periscópios: tipos de periscópios (ataque/optrônico).

MAGE: Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica.

A2 - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: ASW → Combatividade →Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	nwlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	nrlt
2	nwlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	sonar
3	nrlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	sonar

Definições:

ASW: Guerra antissubmarina (detectar/atacar submarinos).

nwlt: número de tubos lançadores de armas.

nrlt: número de armas armazenadas a bordo (exceto nos tubos – torpedos/mísseis/minas).

sonar: sistemas sonar (detecção/marcação/classificação).

A3 - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: SPW → Combatividade →Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	Nesp	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	COM
2	Nesp	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SAT
3	Nesp	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
4	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SAT
5	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
6	SAT	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios

Definições:

SPW: Conduzir operações especiais (infiltração/retirada de forças especiais).

Nesp: número de membros de forças especiais (comandos).

COM: sistemas de comunicações.

periscópios: tipos de periscópios (ataque/optrônico).

A4 - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: MIW → Combatividade →Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	nwlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	nrlt
2	nwlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MOA
3	nrlt	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MOA

Definições:

Minagem: Realizar ações de minagem e evitar colisão com minas inimigas.

nwl: número de tubos lançadores de armas.

nrl: número de armas armazenadas a bordo (exceto nos tubos – torpedos/mísseis/minas).

MOA: sistemas sonar de detecção de minas.

A5 - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: INT → Combatividade →Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SAT
2	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
3	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE
4	SAT	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
5	SAT	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE
6	periscópios	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE

Definições:

INT: Conduzir operações de inteligência (levantamento de informações).

COM: sistemas de comunicações.

SAT: sistemas comunicações satélite.

periscópios: tipos de periscópios (ataque/optrônico).

MAGE: Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica.

A6 - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: C3 → Combatividade → Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	PM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	COM
2	PM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SAT
3	PM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
4	PM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE
5	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SAT
6	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
7	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE
8	SAT	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	periscópios
9	SAT	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE
10	periscópios	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MAGE

Definições:

C3: Ações de comando, controle, comunicações.

PM: sistema de gerenciamento integrado da plataforma.

COM: sistemas de comunicações.

SAT: sistemas comunicações satélite.

periscópios: tipos de periscópios (ataque/optrônico).

MAGE: Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica.

A13/A23 - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: sonar → ASuW/ASW →

Combatividade → Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	CA	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	DA
2	CA	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	FTA
3	DA	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	FTA

Definições:

ASuW: Guerra antissuperfície (detectar/atacar meios de superfície).

ASW: Guerra antissubmarina (detectar/atacar submarinos).

CA: sonar passivo (determinação de distância).

DA: sonar passivo (determinação de marcação).

FTA: sonar passivo (rebocado ou flanco - classificação de contatos).

A15/A - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: periscópios →

ASuW/INT/C3 → Combatividade → Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	2 OPT	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1 OPT e 1 Ataque
---	-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	------------------

Definições:

ASuW: Guerra antissuperfície (detectar/atacar meios de superfície).

INT: Conduzir operações de inteligência (levantamento de informações).

C3: Ações de comando, controle, comunicações.

Obs: as opções consistem na presença de 2 mastros optrônicos ou 1 mastro optrônico e 1 periscópio de ataque.

B - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: Mobilidade → Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	RA _{mix}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	RA _{sub}
2	RA _{mix}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A _{sprint}
3	RA _{mix}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	v _{max}
4	RA _{mix}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MOD
5	RA _{mix}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	manobrabilidade
6	RA _{mix}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	RD
7	RA _{sub}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A _{sprint}
8	RA _{sub}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	v _{max}
9	RA _{sub}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MOD
10	RA _{sub}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	manobrabilidade
11	RA _{sub}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	RD
12	A _{sprint}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	v _{max}
13	A _{sprint}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MOD
14	A _{sprint}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	manobrabilidade
15	A _{sprint}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	RD
16	v _{max}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MOD
17	v _{max}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	manobrabilidade
18	v _{max}	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	RD
19	MOD	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	manobrabilidade
20	MOD	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	RD
21	manobrabilidade	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	RD

Definições:

Mobilidade: Capacidade de se mover no TO (Assumir posição/Engajar/Evadir).

RA_{mix}: raio de ação em velocidade mista (patrulha/trânsito) [MN].

RA_{sub}: alcance submerso [MN].

A_{sprint}: alcance submerso mínimo [MN].

v_{max}: velocidade máxima do submarino [kt]

MOD: profundidade de operação [m].

manobrabilidade: capacidade de realizar, de forma célere, manobras nos planos vertical/horizontal de movimento (mantendo, entretanto, estabilidade direcional adequada).

RD: sistema radar.

C - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: Discrição → Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	IR	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MOD
---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----

Definições:

Discrição: Capacidade de evitar detecção durante a operação (trânsito/patrolha).

IR: taxa de indiscrição do submarino.

MOD: profundidade de operação [m].

D - Compare a IMPORTÂNCIA relativa do atributo com relação a: Presença → Objetivo.

1 – Igual; 3 – Moderada; 5 – Forte; 7 – Muito forte; 9 - Extrema

1	Autonomia	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	COM
2	Autonomia	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SAT
3	COM	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	SAT

Definições:

Presença: Capacidade de se manter autonomamente no TO e em condições de contactar as forças amigas/base.

Autonomia: número de dias que o submarino pode operar autonomamente (i.e. sem se reabastecer de víveres).

COM: sistemas de comunicações.

SAT: sistemas comunicações satélite.

(página deixada intencionalmente em branco)

APÊNDICE J – CÁLCULO DA OMOE

J-1) Medidas de Performance (MP)

Neste estudo, a determinação das MP's é feita conforme explicado a seguir.

MP's associadas a variáveis de *payload* são derivadas a partir dos valores de figura de mérito (f) fornecidos no Apêndice F. Nesse caso, à alternativa com menor figura de mérito se atribui valor nulo. À de maior figura de mérito, atribui-se valor unitário. Valores intermediários de figura de mérito geram valores intermediários de MP, obtidos por interpolação linear. Assim:

$$MP_x = \frac{f_x - f_0}{f_1 - f_0} \quad \text{eq. (69)}$$

No caso dos atributos e das demais variáveis de interesse, foram definidos valores mínimos e máximos de desempenho (baseados nos REM ou arbitrados), conforme a tabela abaixo:

Tabela 86 – Variação dos atributos para cálculo da MP

Atributo/Variável	v0	v1
RAmix	2500	6000
Asub	50	300
A _{sprint}	10	60
v _{max}	15	25
MOD	200	400
Ts	50	70
Nesp	6	12
nwl _t	4	8
nrl _t	8	18

Novamente, as MP's associadas são obtidas por interpolação linear. Assim:

$$MP_x = \frac{v_x - v_0}{v_1 - v_0} \quad \text{eq. (70)}$$

Caso o valor do atributo seja maior que v_1 , um valor unitário é adotado; se for menor que v_0 , adota-se valor nulo.

No caso da taxa de indiscrição, a seguinte equação é utilizada (observe que para soluções viáveis MP não se tornará negativa):

$$MP = \frac{IR_{\max} - IR}{IR_{\max}} \quad \text{eq. (71)}$$

No caso da manobrabilidade, os índices são analisados separadamente e atribuí-se valor unitário quando o valor dos índices se situar dentro dos intervalos recomendados (ver item 7.3.10). Daí, combina-se o resultado de acordo com a seguinte função:

$$MP = 0,75v_{GV} + 0,25v_{GH} \quad \text{eq. (72)}$$

Por fim, no caso dos periscópios, atribui-se peso (w) igual a 0.839 se a variável “sail” tiver valor menor que 3. Do contrário, o peso será igual a 0.161. A MP será dada por:

$$MP_{PER} = wMP_{OPT} \quad \text{eq. (73)}$$

Na qual MP_{OPT} é o valor da figura de mérito relativa ao tipo de mastro oprônico, calculada conforme a eq. (69)

J-2) Valores de Performance (VP)

As VPs são calculadas a partir das MPs associadas as suas performance/variáveis subordinadas. De forma geral:

$$VP_i = \sum_i w_i MP_i \quad \text{eq. (74)}$$

Na equação acima, os pesos são derivados a partir das opiniões de especialistas²¹⁴, avaliadas por *AHP*, e os valores de MP de acordo com as equações apresentadas no item anterior. Os pesos obtidos neste trabalho são listados na Tabela 87.

²¹⁴ Para agregar as matrizes de julgamento, depois de submetidas ao teste de consistência, utilizou-se agrupamento por média geométrica dos elementos a_{ij} das diversas matrizes.

Tabela 87 – Valor de performance

SONAR	Pesos
f(CA,DA,FTA)	w500 = [0,567 0,156 0,277]
ASuW	Pesos
f(nwlt,nrlt,SONAR,periscópios,MAGE)	w11 = [0,126 0,262 0,371 0,088 0,153]
ASW	Pesos
f(nwlt,nrlt,SONAR)	w12 = [0,115 0,051 0,834]
SPW	Pesos
f(N _{esp} ,COM,SAT,periscópios)	w13 = [0,259 0,316 0,161 0,264]
MIW	Pesos
f(nwlt,nrlt,MOA)	w14 = [0,121 0,730 0,149]
INT	Pesos
f(COM,SAT,periscópios,MAGE)	w15 = [0,094 0,143 0,327 0,436]
C3	Pesos
f(PM,COM,SAT,periscópios,MAGE)	w16 = [0,161 0,230 0,222 0,145 0,242]
Combatividade (VP₁)	Pesos
f(ASuW,ASW,SPW,MIW,INT,C3)	w1 = [0,364 0,146 0,166 0,110 0,143 0,071]
Mobilidade (VP₂)	Pesos
f(RAmix,A _{sub} ,A _{sprint} ,V _{max} ,MOD,manobrabilidade, RD)	w2 = [0,138 0,159 0,151 0,131 0,191 0,166 0,064]
Discrição (VP₃)	Pesos
f(IR,MOD)	w3 = [0,975 0,025]
Presença (VP₄)	Pesos
f(Ts,COM,SAT)	w4 = [0,797 0,108 0,095]

J-3) Medida Geral de Efetividade

Sendo o vetor de pesos obtidos $w = [0,154 \ 0,151 \ 0,569 \ 0,126]$ e o vetor de performances $VP = [VP_1 \ VP_2 \ VP_3 \ VP_4]$, a *OMOE* pode ser finalmente calculada pela equação:

$$OMOE = \sum_i w_i VP_i \quad \text{eq. (75)}$$

(página deixada intencionalmente em branco)

APÊNDICE K – SOLUÇÕES ALTERNATIVAS

As seguintes soluções de projeto foram analisadas no capítulo 9.

Tabela 88 – Soluções analisadas

Variável							
	<u>3637</u>	<u>4945</u>	<u>715</u>	<u>I1</u>	<u>I2</u>	<u>I3</u>	<u>I4</u>
BAT	2	3	1	2	2	2	2
CA	3	2	1	1	1	1	1
COM	3	3	1	1	1	1	1
C _{man}	0,9	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
D	6,8	7,2	7,4	6,2	6,2	6,4	6,6
DA	1	2	2	1	1	2	1
DG	1	3	1	3	3	2	3
EW	2	3	3	1	1	1	1
FTA	2	1	2	1	1	2	1
L	83,7	86,7	91,3	66,0	65,4	74,8	75,0
MEP	2	4	4	1	1	1	1
MOA	1	1	2	2	2	2	1
MOD	350	250	340	210	280	200	310
N _{esp}	6	6	6	9	12	9	12
OPT	2	2	1	1	1	1	1
PM	1	3	2	3	2	2	2
RD	1	2	3	1	1	1	1
SAT	1	1	1	1	1	1	1
T _{pat}	40	4	30	40	50	50	50
n _a	3,5	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
n _{cell}	360	440	360	360	360	360	360
n _{DG}	4	4	4	2	2	4	4
n _f	3,2	3,8	2,0	2,4	4,0	4,0	4,0
n _{r1t}	18	12	18	12	8	8	18
n _{w1t}	8	6	8	4	4	4	4
sail	3	3	3	2	2	2	2

(página deixada intencionalmente em branco)

APÊNDICE L – DETALHAMENTO PRELIMINAR DA CONFIGURAÇÃO BASE

L-1) Escantilhamento

Os estudos iniciais de arranjo indicaram que um diâmetro interno arranjável de no mínimo 6,00 m favoreceria o arranjo.

Para obtê-lo, foi necessária uma reformulação do escantilhamento T3 (ver Tabela 58). Em novo processo de otimização, fixada a profundidade de 350 m, a soma de t , h_w e d foi limitada a 0,30 m (que resulta em um diâmetro arranjável mínimo de 6,0 m no trecho cilíndrico do CR) e buscou-se a minimização do peso do casco. Nesta otimização, o comprimento do trecho cilíndrico (que no modelo estrutural adotado representa a largura entre suportes) é de 54,42 m e foi derivado a partir do arranjo do navio.

O escantilhamento obtido é apresentado na Tabela 89.

Tabela 89 – Escantilhamento do S4

Var.	Definição	T3	S4
b_f	largura do flange [m]	0,102	0,171
d	espessura do flange [m]	0,045	0,045
h_w	altura da alma [m]	0,249	0,210
L_f	espaçamento de cavernas [m]	0,500	0,820
t	espessura do casco [m]	0,025	0,030
t_w	espessura da alma [m]	0,010	0,010
MOD	profundidade de operação [m]	350	350
W_{casco}	peso do casco [t]	378	<u>396</u>

Para atender ao critério de dimensionamento estrutural (ver equações 53 a 55), a espessura das calotas utilizada foi de 0,04 m. O peso apresentado na tabela foi obtido pelo modelo de cálculo estrutural (equações 57e a 57i). O peso obtido por meio do software de CAD foi de 394 t e será usado no restante da análise.

L-2) Dimensões de lemes e hidroplanos

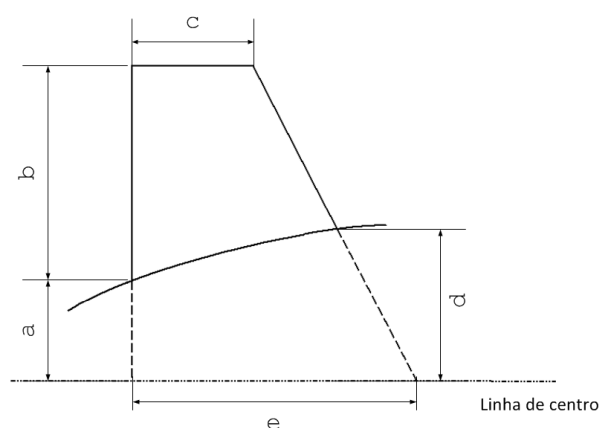
A estabilidade direcional da I4 foi estimada pelo equacionamento de Minnick [53]. Dessa forma, é interessante que o dimensionamento preliminar dos lemes e hidroplanos siga geometrias semelhantes aos submarinos que a autora utilizou para

formular suas equações. A Tabela 90 fornece dimensões médias (ver Figura 88), em função do diâmetro, derivadas com base em tais navios. Ressalta-se que esses são valores guia. Na prática, eles devem ser confirmados pelos estudos de arranjo e hidrodinâmica.

Tabela 90 – Superfícies de controle

Superfície de controle	dimensão/D				
	a	b	c	d	e
Hidroplanos de vante	0,10	0,38	0,22	0,14	0,53
Leme superior	0,07	0,45	0,31	0,35	0,48
Leme inferior	0,07	0,45 ²¹⁵	0,31	0,35	0,48
Hidroplanos de ré	0,07	0,38	0,38	0,21	0,53

Figura 88 – Geometria base das superfícies de controle



Fonte: autor

Os valores efetivamente adotados no arranjo são listados na Tabela 91.

Tabela 91 – Valores adotados no S4

Superfície de controle	dimensão [m]				
	a	b	c	d	e
Hidroplanos de vante	0,60	2,50	1,50	0,80	3,50
Leme superior	0,50	2,95	2,10	1,90	3,20
Leme inferior	0,50	2,80	2,10	1,90	3,20
Hidroplanos de ré	0,50	2,50	2,50	1,90	3,50

²¹⁵ A extensão do leme inferior é dado pela fórmula da tabela ou se entende até a linha de base, o que for menor.

L-3) Arranjo

Itens a arranjar

Na configuração escolhida, os equipamentos/itens que precisam ser arranjados no interior do submarino são listados na Tabela 92.

Tabela 92 – Itens de arranjo interno

	Item	L	B	H	Qtd
Propulsão	baterias	0,50	0,36	0,80	360
	DG	5,20	1,70	2,70	4
	MEP	1,30	3,10	3,10	1
	inversores	2,30	0,90	1,70	2
<i>Payload</i>	gabinetes	0,60	0,60	1,80	28
	consoles	0,60	0,60	1,80	6
	estação de manobra	1,00	0,80	1,80	1
	painel de águas	1,10	2,70	1,80	1
Armas	torp./minas/mísseis	5,80	0,53	0,53	18
Operações Especiais	Torreão lançamento	1,10	1,10	2,40	1

O número de gabinetes e consoles é detalhado na Tabela 93.

Tabela 93 – Gabinetes e consoles

Item	tipo	gabinetes	consoles
CA	1	8	1
COM	1	3	1
DA	1	3	1
EW	1	1	1
FTA	1	4	1
MOA	1	2	-
OPT	1	2	1
PM	2	1	-
RD	1	2	-
SAT	1	2	-

Os itens a ser arranjados no exterior do submarino são listados na Tabela 94.

Tabela 94 - Itens de arranjo externo

Item	L	B	H	Qtd
mastros (reservas de espaço)	0,75	0,75	(1)	6
tubos de torpedos	7,16 (2)	0,75	0,75	6(3)
sonar	2,80	2,80	1,20	1
mastro de esnorquel	0,75	0,75	(1)	1
torreão de acesso	1,50	1,50	2,70	1

A altura dos mastros⁽¹⁾ é ditada pela altura da vela. O comprimento dos tubos de torpedos⁽²⁾ já inclui o comprimento das portas e atuadores pneumáticos. O número de tubos de torpedos⁽³⁾ do S4 (6 tubos) foi aumentado em relação ao da configuração base (4 tubos), buscando eventual aumento da efetividade.

Demandas de volume interno (tanques e alocações)

Para a I4, as demandas obtidas pelo modelo de síntese para os volumes de tanques, dos paióis de armazenamento de gêneros e das praças de máquinas auxiliares são indicados na Tabela 95.

Tabela 95 – Demandas e alocações de volume

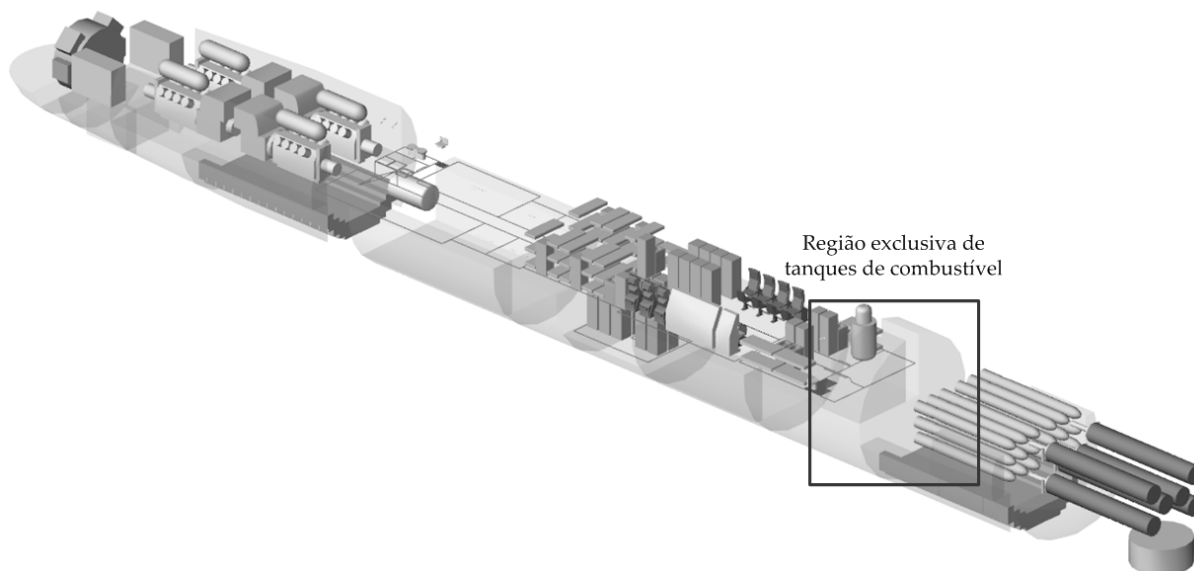
Grupo	Item	Volume bruto [m ³]
Tanques	óleo combustível	393
	compensação e trimagem	98
	aguada	42
	sanitário	2
	operação do armamento	29
Volumes	sistemas auxiliares	211
	paióis de gêneros	63

Arranjo Interno

Em uma primeira versão do arranjo (Figura 89), verificou-se que é possível atender a todas as demandas por volume interno listadas na Tabela 95. Isso exigiria o posicionamento de alguns tanques altos na região de ré do submarino (ao longo do compartimento dos diesel geradores). Além disso, um trecho do CR na região de vante (2,18 m) ficou quase que exclusivamente dedicado ao posicionamento de tanques de combustível. Isso decorre da grande quantidade de combustível alocada inicialmente para o navio 332 t, que resulta, entre outras coisas:

- a) No alto valor de RA_{mix} da I4 : 7227 MN;
- b) Alta demanda por volume interno;
- c) Impacto sobre o dimensionamento do sistema de compensação e trimagem do navio (com provável necessidade de um grande volume de compensação para contrabalancear o aumento de peso à medida que o combustível for sendo consumido).

Figura 89 – Arranjo interno preliminar



Fonte: autor

Em casos práticos, essa situação poderia exigir contato com o cliente para expor as eventuais vantagens de sacrificar parte da autonomia (devido à redução de combustível embarcado). Do ponto de vista de arquitetura naval, a redução de combustível seria desejável pois resultaria em menor volume do CR, menor deslocamento e provavelmente menor custo. Nesta dissertação, optou-se pela

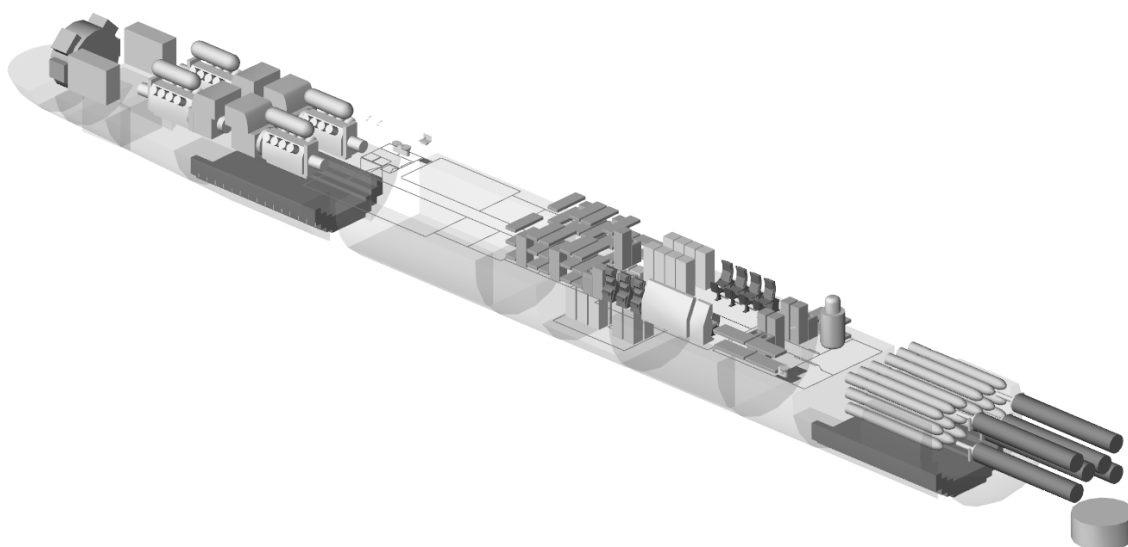
supressão deste trecho e redução da quantidade de combustível²¹⁶ já que não se espera impacto significativo na *OMOE* (ver discussão do item 9.2.2, sobre os valores limites de RA_{mix}) e haverá possível diminuição de custo.

Após a redução do CR, as demandas por volumes internos sofreram alterações (pois houve alteração na quantidade de combustível transportada, no número de tubos de torpedos e, além disso, alguns volumes são função de V_{cr} , que diminuiu). As novas demandas são listadas na Tabela 96, com as alterações sublinhadas. Um segundo arranjo interno consta da (Figura 90). Nele, embora as demandas por volume de tanques de compensação e trimagem tenham diminuído, optou-se por manter o valor antigo de 98 m³.

Tabela 96 – Novas demandas e alocações de volume (redução do CR)

Grupo	Item	Volume bruto [m ³]
Tanques	óleo combustível	<u>300</u>
	compensação e trimagem	<u>96</u>
	aguada	42
	sanitário	2
	operação do armamento	29
Volumes	sistemas auxiliares	<u>205</u>
	paíóis de gêneros	63

Figura 90 – Novo arranjo interno



Fonte: autor

²¹⁶ Inicialmente para 253 t e posteriormente reduzido para 220 t após o estudo do polígono de equilíbrio.

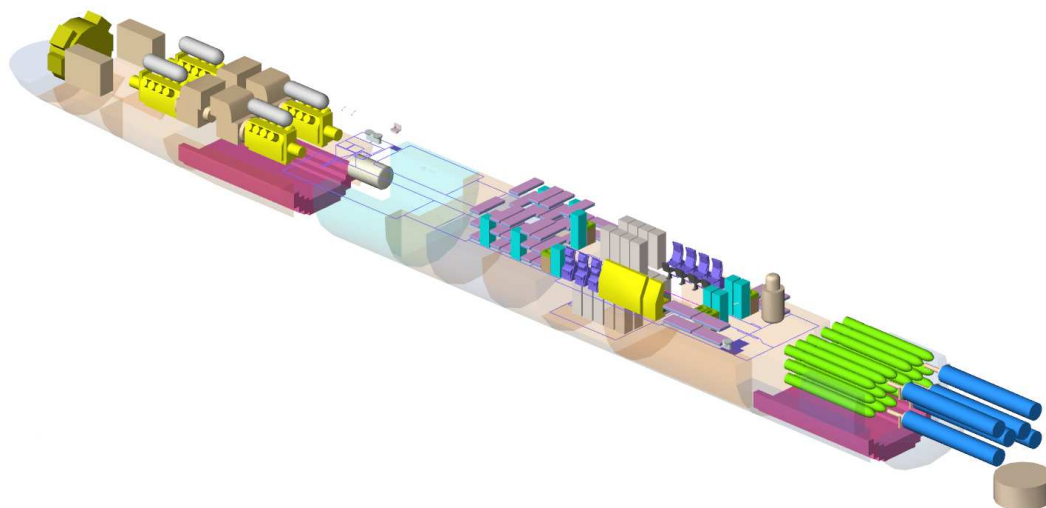
O arranjo proposto na Figura 90 é exequível do ponto de vista de equilíbrio longitudinal das componentes de peso A-1 e lastro fixo, bem como estabilidade. Entretanto, a disposição dos tanques e paióis de gêneros levou a uma posição desfavorável do centro de gravidade longitudinal das cargas variáveis (W_{LV})²¹⁷ na condição normal de superfície (W_N). Embora isso possa ser corrigido pelo sistema de compensação e trimagem, a solução poderia exigir alterações consideráveis na distribuição dos tanques durante o estudo do polígono de equilíbrio do navio.

Assim, a posição dos tanques e dos compartimentos inferiores foi reformulada de antemão. Ressalta-se que o centro de gravidade longitudinal do tanque de compensação foi mantido na mesma posição de LCB.

Além disso, decorrente dos estudos do polígono de equilíbrio optou-se por aumentar o volume do tanque de compensação (o que acarretou uma redução adicional na quantidade de combustível embarcada).

O arranjo interno final resultante é apresentado na Figura 91. Os volumes brutos dos tanques são apresentados no item L-4 (plano de capacidades). O arranjo 2D do navio é apresentado no Apêndice N.

Figura 91 – Arranjo interno final



Fonte: autor

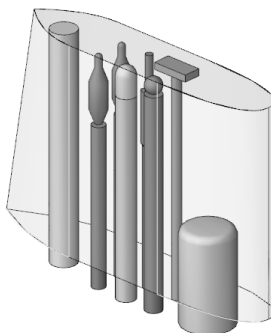
Vela e superestrutura

Para a vela, a opção 2 (ver Figura 78) foi utilizada. Essa geometria base foi refinada no arranjo com vistas à diminuição da área molhada da vela. As alocações de espaço para o arranjo dos mastros são mantidas no modelo. Foram incluídas

²¹⁷ No caso desse arranjo $LCG(W_{ldt})$ se situa cerca de um metro além de LCB.

representações hipotéticas dos mastros, baseadas em arranjos e informações de fabricantes disponíveis em fontes abertas. O arranjo é apresentado na Figura 92.

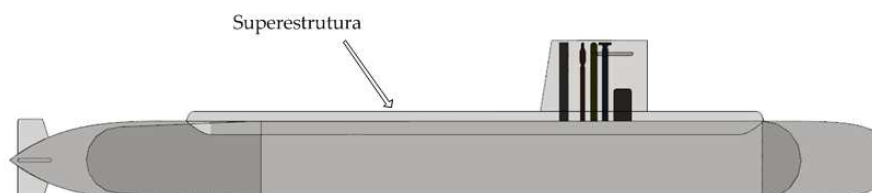
Figura 92 – Arranjo da vela



Fonte: autor

Foi incluída uma superestrutura (área de livre alagamento) cujo topo se situa a 0,8 metros da borda superior do casco externo (Figura 93). Ela se destina a abrigar tubulações e itens arranjados na parte externa do submarino.

Figura 93 – Superestrutura



Fonte: autor

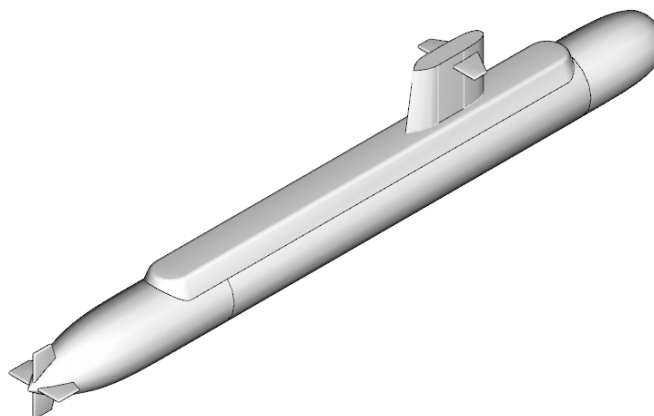
Geometria externa e área molhada

Como o comprimento do CR foi reduzido, após o arranjo dos tanques de lastro e áreas externas, foi possível diminuir o comprimento do navio para 74 metros. Embora mantidos os coeficientes n_a e n_f , os comprimentos dos trechos de ré e vante foram ajustados (respectivamente, 21,3 e 10,3 metros) de forma a prover volume adequado para arranjo dos tanques de lastro e áreas externas.

O arranjo externo final obtido é apresentado na Figura 94. As áreas molhadas, obtidas a partir da maquete eletrônica, são apresentadas na Tabela 97. A região do casco coberta pela superestrutura não é considerada na área molhada do

casco (pois se situa na “sombra” da área molhada da própria superestrutura), o mesmo ocorre com as regiões cobertas pelos lemes e hidroplanos.

Figura 94 – Geometria externa



Fonte: autor

Tabela 97 – Áreas molhadas

Item	Área molhada [m ²]
Casco externo (WS)	1194,4
Vela	120,5
Superestrutura	364,9
Lemes e hidroplanos	35,2

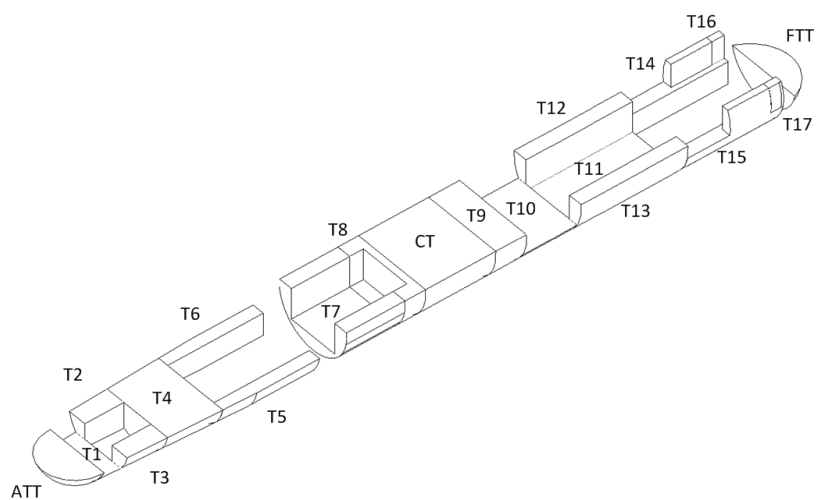
L-4) Plano preliminar de capacidades

Os volumes brutos finais dos tanques e coordenadas de seus centros geométricos constam na Tabela 98. Os tanques são apresentados na Figura 95.

Tabela 98 – Pesos e centros WA

Tanque	x/PPAR [m]	z/LB [m]	V _{bruto} [m ³]	Tipo
ATT	8,5	1,7	12,8	trimagem
T ₁	10,4	1,0	5,1	óleo diesel
T ₂	12,8	1,9	6,8	óleo diesel
T ₃	12,8	1,9	6,8	óleo diesel
T ₄	16,5	1,7	50,1	óleo diesel
T ₅	22,6	2,1	8,6	óleo diesel
T ₆	22,6	2,1	8,6	óleo diesel
T ₇	30,8	1,7	40,9	aguada
T ₈	34,2	1,9	20,6	óleo diesel
CT	37,7	2,1	110,6	compensação
T ₉	41,8	2,1	48,7	óleo diesel
T ₁₀	45,2	1,0	30,1	óleo diesel
T ₁₁	51,7	0,7	33,2	óleo diesel
T ₁₂	51,7	2,6	20,8	óleo diesel
T ₁₃	51,7	2,6	20,8	óleo diesel
T ₁₄	60,3	2,5	14,5	compensação de armas
T ₁₅	60,3	2,5	14,5	compensação de armas
T ₁₆	63,2	3,6	1,4	operação de armas
T ₁₇	63,2	3,6	1,4	operação de armas
FTT	65,6	1,8	13,8	trimagem

Figura 95 – Plano de capacidades (tanques)



Fonte: autor

L-5) Equilíbrio hidrostático e estabilidade

Centro de carena e tanques de lastro

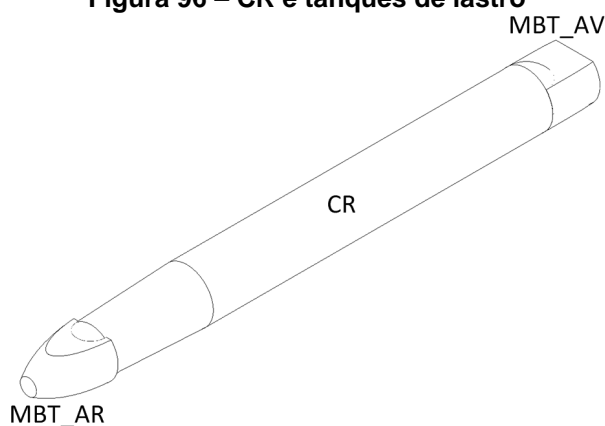
Em primeira análise, o centro de carena em condição submersa pode ser tomado como o centro geométrico do CR. Assim, $B = [37,7 \mid 0,0 \mid 3,3]$.

Os volumes do CR e dos tanques de lastro são dados na Tabela 99. Eles são representados na Figura 96.

Tabela 99 – Casco resistente e tanques de lastro

Tanque	x/PPAR [m]	z/LB [m]	V _{bruto} [m ³]
Casco Resistente	37,7	3,3	1924
MBT_AR	12,8	1,9	112
MBT_AV	12,8	1,9	103

Figura 96 – CR e tanques de lastro



Fonte: autor

Pesos e Centros

Os itens analisados no estudo de equilíbrio e respectivos pontos de referência, adotados para obtenção das coordenadas, são listados na Tabela 100.

Tabela 100 – Itens e pontos de referência

(continua)

Grupo	Item	Descrição	Ponto de referência
1	W_1	peso do grupo 1	--x--
	W_{casco}	peso do casco	centro geométrico do CR
	W_{180}	peso de jazentes	centro geométrico do CR
	W_{191}	peso do lastro de comissionamento	centro do comp. de comando
	W_{1_misc}	peso restante do grupo 1	centro geométrico do CR
2	W_2	peso do grupo 2	--x--
	W_{MEP}	peso do MEP	centro do MEP
	W_{DG}	peso dos DG's	centro do comp. da propulsão
	W_{inv}	peso dos inversores do MEP	centro do comp. de inversores
	W_{bat}	peso das baterias	centro das praças de baterias
	W_{240}	peso da linha de eixo	extremidade de ré do CR
3	W_3	peso do grupo 3	--x--
	W_{dist}	peso do sist. de distribuição elétrica	centro geométrico do CR
	W_{light}	peso do sistema de iluminação	centro geométrico do CR
4	W_4	peso do grupo 4	--x--
	W_{400}	peso de gabinetes e consoles	posição aproximada do conjunto
	W_{misc}	peso das estações de manobra	posição aproximada do conjunto
	W_{ic}	peso do sistema de comunicações interiores	centro geométrico do CR
	W_{co}	peso dos sistemas de controle do navio	centro do comp. de comando
	W_{cc}	peso dos sistemas de comando e controle	centro do comp. de comando
5	W_5	peso do grupo 5	--x--
	W_{593}	peso dos sistemas de prevenção de poluição	centro da segunda PA ²¹⁸
	W_{598}	peso de fluidos dos sistemas auxiliares	centro geométrico do CR
	W_{aux}	peso dos sistemas auxiliares	centro geométrico das PA's
6	W_6	peso do grupo 6	--x--
	W_{of1}	peso de acessórios e acabamento (casco)	centro geométrico do CR
	W_{of2}	peso de acessórios e acabamento (habitáveis)	centro das áreas habitáveis
7	W_7	peso do grupo 7 (armamento)	centro do conjunto de armas
Lastro fixo	W_{fb}	peso de lastro fixo	(calculado)
Cargas variáveis	W_{LV}	peso das cargas variáveis	--x--
	W_{wep}	peso das armas	centro do conjunto de armas

²¹⁸ Praça de Auxiliares (PA).

Tabela 100 – Itens e pontos de referência

(conclusão)

Grupo	Item	Descrição	Ponto de referência
Cargas variáveis	W_{F31}	peso de víveres	centro aproximado das AAG ²¹⁹
	W_{F32}	peso de itens associados a mantimentos	centro aproximado das AAG
	W_{F10}	peso da tripulação e pertences	posição aproximada das áreas habitáveis
	W_{io}	peso de óleo lubrificante	centro do comp. de propulsão
	fuel	peso de combustível	centro geométrico dos tanques
	W_{wot}	peso no tanque de operação de armas	centro geométrico dos tanques
	W_{fw}	peso de aguada	centro geométrico dos tanques
Lastro variável	W_{sew}	peso de efluentes	centro geométrico do tanque
	W_{CT}	peso no tanque compensação	centro geométrico do tanque
	W_{ATT}	peso no tanque de trim de ré	centro geométrico do tanque
	W_{FTT}	peso no tanque de trim de vante	centro geométrico do tanque

Os pesos, coordenadas e momentos da Condição A são listados na Tabela 101. As coordenadas longitudinais são tomadas a partir da PPAR e as verticais são tomadas a partir da linha de base.

Tabela 101 – Pesos e centros (W_{A1})

(continua)

Item	W [t]	x/PPAR [m]	z/LB [m]	Mx [t.m]	Mz [t.m]
W_1	697,5	37,8	3,31	26334,3	2307,5
W_{casco}	394,0	37,7	3,3	14853,8	1300,2
W_{180}	68,3	37,7	3,3	2574,9	225,4
W_{191}	4,1	47,1	4,7	193,1	19,3
W_{1_misc}	231,1	37,7	3,3	8712,5	762,6
W_2	319,6	29,3	2,30	9377,0	735,5
W_{MEP}	36,0	10,4	3,3	374,4	118,8
W_{DG}	76,8	20,5	4,0	1574,4	307,2
W_{inv}	14,4	12,6	3,8	181,4	54,7
W_{bat}	172,8	41,2	1,1	7119,4	190,1
W_{240}	19,6	6,5	3,3	127,4	64,7

²¹⁹ Áreas de Armazenamento de Gêneros (AAG).

Tabela 101 - Pesos e centros (W_{A1})

(conclusão)

W_3	62,5	37,7	3,30	2356,3	206,3
W_{dist}	24,0	37,7	3,3	904,8	79,2
W_{light}	38,5	37,7	3,3	1451,5	127,1
W_4	31,1	44,9	4,19	1395,2	130,2
W_{400}	6,1	46,4	3,7	283,0	22,6
W_{misc}	0,4	48,2	4,6	19,3	1,8
W_{ic}	7,0	37,7	3,3	263,9	23,1
W_{co}	13,5	47,1	4,7	635,9	63,5
W_{cc}	4,1	47,1	4,7	193,1	19,3
W_5	146,8	35,7	2,33	5243,9	341,5
W_{593}	2,3	27,4	2,2	63,0	5,1
W_{598}	4,1	37,7	3,3	154,6	13,5
W_{aux}	140,4	35,8	2,3	5026,3	322,9
W_6	72,5	38,7	3,84	2805,0	278,2
W_{of1}	52,0	37,7	3,3	1960,4	171,6
W_{of2}	20,5	41,2	5,2	844,6	106,6
W_7	50,3	61,0	4,10	3068,3	206,2
A-1	1380,3	36,6	3,05	50579,7	4205,4

Com base nos pesos e momentos da condição A-1 é possível calcular a posição do centro de gravidade do lastro fixo.

Deseja-se ter $LCG = LCB$ (mesma posição para o centro de gravidade e o centro de carena) e $VCG - VCB \geq BG_{min}$ (distância vertical entre o centro de carena e o CG do lastro fixo igual ao braço de endireitamento requerido).

Neste estágio inicial, pode-se assumir que o centro de carena se localizará exatamente no centro geométrico do casco resistente ($x = 37,7 \mid y = 0 \mid z = 3,3$) e pode-se restringir o estudo do equilíbrio apenas no plano XZ. Além disso, os REM exigem um valor mínimo de BG de 4%D, o seja 0,27 m. Aqui, adota-se $BG = 0,55$ m.

Como $W_A = W_{A1} + W_{fb}$, é simples demonstrar que as posições do centro de gravidade do lastro fixo são dadas por:

$$x_{fb} = \frac{W_A LCB - W_{A1} x_{A1}}{W_{fb}} \quad \text{eq. (76)}$$

$$z_{fb} = \frac{(VCB - BG)W_A - W_{A1}z_{A1}}{W_{fb}} \quad \text{eq. (76b)}$$

Assim, temos para W_A (Tabela 102):

Tabela 102 – Pesos e centros (W_A)

Item	W [t]	x/PPAR [m]	z/LB [m]	Mx [t.m]	Mz [t.m]
W ₁	697,5	37,8	3,31	26334,3	2307,5
W ₂	319,6	29,3	2,3	9377,0	735,5
W ₃	62,5	37,7	3,3	2356,3	206,3
W ₄	31,1	44,9	4,19	1395,2	130,2
W ₅	146,8	35,7	2,33	5243,9	341,5
W ₆	72,5	38,7	3,84	2805,0	278,2
W ₇	50,3	61,0	4,1	3068,3	206,2
A-1	1380,3	36,64	3,05	50579,9	4205,4
W _{fb}	300,0	42,58	1,40	12774,0	420,0
W _A	1680,3	37,70	2,75	63353,9	4625,4

Os pesos, coordenadas e momentos das cargas e lastro variáveis são listados na Tabela 103. As cargas variáveis, em condição normal, foram definidas com base em [65]²²⁰. A distribuição de pesos do sistema de compensação e trimagem foi estabelecido com base no polígono de equilíbrio do S4 (ver item L-6).

²²⁰ Há uma pequena diferença nos valores componentes de W_{LDT} obtidos pelo modelo de síntese e os apresentados na tabela. Isso se deve às diferenças no nível de alguns tanques (óleo lubrificante e sanitário) quando adotados os percentuais da referência [65]. Isso faz com que o peso no sistema de compensação também tenha que ser ajustado.

Tabela 103 – Pesos e centros (W_{LV} e W_{VB})

Item	W [t]	x/PPAR [m]	z/LB [m]	Mx [t.m]	Mz [t.m]
W_{LV}	307,9	37,83	2,11	11647,0	648,8
W_{wep}	28,1	61,0	4,1	1712,9	115,1
W_{F31}	8,6	30,6	4,8	263,2	41,3
W_{F32}	2,6	30,6	4,8	79,6	12,5
W_{F10}	5,3	41,2	5,2	218,4	27,6
W_{lo}	1,0	20,5	4,0	19,5	3,8
fuel	220,0	36,2	1,7	7964,0	374,0
W_{wot}	2,7	63,2	2,5	172,3	6,8
W_{wct}	0,0	60,3	2,5	0,0	0,0
W_{fw}	38,9	30,8	1,7	1196,7	66,1
W_{sew}	0,8	27,4	2,2	20,6	1,7
W_{VB}	83,0	37,61	2,05	3127,8	173,6
W_c	71,0	37,7	2,1	2676,7	149,1
W_{ATT}	6,0	8,5	1,7	51,0	10,2
W_{FTT}	6,0	65,6	1,8	393,6	10,8

Tabela 104 – Pesos e centros (W_N)

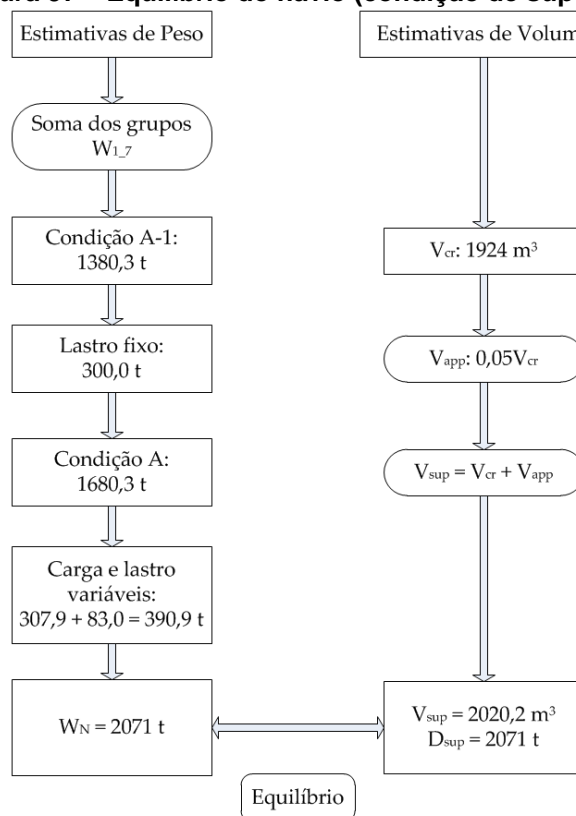
Item	W [t]	x/PPAR [m]	z/LB [m]	Mx [t.m]	Mz [t.m]
W_1	307,9	37,8	2,11	11647,0	648,8
W_2	28,1	61,0	4,1	1712,9	115,1
W_3	8,6	30,6	4,8	263,2	41,3
W_4	2,6	30,6	4,8	79,6	12,5
W_5	5,3	41,2	5,2	218,4	27,6
W_6	1,0	20,5	4,0	19,5	3,8
W_7	220,0	36,2	1,7	7964,0	374,0
A-1	2,7	63,2	2,5	172,3	6,8
W_{fb}	0,0	60,3	2,5	0,0	0,0
W_A	38,9	30,8	1,7	1196,7	66,1
W_{LV}	307,9	37,83	2,11	11647,0	648,8
W_{VB}	83,0	37,61	2,05	3127,8	173,6
W_N	2071	37,7	2,63	78122,3	5444,3

Dessa forma o equilíbrio, em condição de superfície, pode ser estabelecido (Tabela 105 e Figura 97):

Tabela 105 – Pesos e centros (W_N)

Item	Descrição	W [t]
W ₁	Estruturas	697,5
W ₂	Propulsão	319,6
W ₃	Sistemas Elétricos	62,5
W ₄	Comando e Controle	31,1
W ₅	Sistemas Auxiliares	146,8
W ₆	Acessórios e Acabamento	72,5
W ₇	Armamento	50,3
A-1	Condição A-1	1380,3
W _{fb}	Lastro fixo	300,0
W _A	Condição A	1680,3
W _{LV}	Cargas variáveis	307,9
W _{VB}	Lastro variável	83,0
W _N	Condição N	2071

Figura 97 – Equilíbrio do navio (condição de superfície)



Fonte: autor

L-6) Polígono de Equilíbrio

A capacidade do sistema de compensação e trimagem do navio pode ser verificada com base em uma representação gráfica conhecida como Polígono de Equilíbrio.

Aqui, a explicação do assunto visa apenas a propiciar entendimento dos cálculos apresentados. Abordagem teórica mais completa pode ser obtida em [4] e [51]. Há descrição bastante detalhada das condições de carga e metodologia de implementação em [65]²²¹, embora sem maiores detalhes sobre como efetivamente efetuar os cálculos (há mais de uma forma de fazê-los). A abordagem de cálculo adotada é semelhante à apresentada em [53], com as condições de carga adaptadas a partir do constante em [65].

Em essência, o sistema de compensação deve prover capacidade de reequilibrar o navio diante de mudanças de peso/força de flutuação. O peso do navio e sistemas (condição A) não sofre alterações frequentes após a construção²²². Entretanto, as cargas variáveis sofrem alteração de peso durante a operação. Adicionalmente, a força de flutuação pode mudar por variação da densidade da água e também por contração do casco devido à pressão hidrostática.

Cinco condições de carga são de interesse para o estudo do polígono [49]:

1. Normal: condição de operação normal do navio, flutuando em água de densidade normal, tanques de combustíveis totalmente cheios e demais quantidades de carga variável em seus níveis normais;
2. Light: condição de início de patrulha (trânsito ou exercício), flutuando em água de alta densidade, tanques de combustíveis totalmente cheios mas sem armas (torpedos/mísseis/minas) a bordo, demais quantidades de carga variável em seus níveis normais;
3. Heavy: final de uma longa patrulha sem engajamento, todo o combustível consumido, mas sem disparo das armas, flutuando em água de baixa densidade;

²²¹ Ressalta-se que esta referência é norma técnica de projeto cujos detalhes excedem em muito o escopo dessa dissertação.

²²² Mais precisamente, não sofre alterações durante as missões ou períodos normais entre elas. Após períodos de longa manutenção, docagem, alteração de sistemas de bordo e/ou modernização do navio W_A pode ser alterado.

4. *Heavy FWD*: final de uma patrulha de média duração sem engajamento, combustível dos tanques à vante de LCB totalmente consumido, sem disparo das armas, flutuando em água de baixa densidade;
5. *Heavy AFT*: final de uma patrulha de média duração sem engajamento, combustível dos tanques à ré do LCB totalmente consumido, sem disparo das armas, flutuando em água de baixa densidade.

As condições de carga do S4 são estabelecidas nas tabelas seguintes. Cada condição de carga implica um percentual do peso total dos itens (para expressar variação na quantidade daquele peso, conforme previsto para cada condição de carga). A densidade dos fluidos também pode mudar (por exemplo, o combustível, quando consumido, é substituído por água salgada; assim a densidade do fluido deve ser alterada).

Outro esclarecimento concerne o tanque de compensação do armamento. Aqui, quando um torpedo é disparado, assume-se que uma massa de água de peso equivalente ao do torpedo é embarcada. Assim, o sistema compensa a variação de peso devida ao disparo²²³. Por fim, o sistema de trimagem é considerado “fechado”, ou seja, a água embarcada no sistema é doce, transferida entre os tanques por bombeamento, e sua quantidade não varia (12 t).

Os cálculos das condições de carga são apresentados nas tabelas seguintes (Tabelas 106 a 110).

²²³ Outra forma de abordar o problema seria traçar a envoltória do polígono tratando os tanques de compensação do armamento como componentes do sistema de compensação e trimagem. Isso mudaria a forma, ampliando o perímetro, do polígono de equilíbrio.

Tabela 106 – Cargas variáveis (Norma)

Item	V _{bruto} [m ³]	V _{liq} [m ³]	ρ [t/m ³]	Peso [t]	Fator	Peso [t]	x/LCB [m]	Mx [t.m]
W _{lv}	--x--	--x--	--x--	337,5	--x--	<u>307,86</u>	<u>0,11</u>	<u>33,12</u>
W _{wep}	--x--	--x--	--x--	28,1	1,00	28,08	23,30	654,26
W _{F31}	--x--	--x--	--x--	8,6	1,00	8,60	-7,10	-61,06
W _{F32}	--x--	--x--	--x--	2,6	1,00	2,60	-7,10	-18,46
W _{F10}	--x--	--x--	--x--	5,3	1,00	5,30	3,50	18,55
W _{lo}	--x--	--x--	--x--	1,0	0,95	0,95	-17,20	-16,34
fuel	260,2	247,2	0,890	220,0	1,00	220,00	-1,53	-337,52
T ₁	5,1	4,8	0,890	4,3	1,00	4,31	-27,30	-117,72
T _{2,3}	13,6	12,9	0,890	11,5	1,00	11,50	-24,90	-286,32
T ₄	50,1	47,6	0,890	42,4	1,00	42,36	-21,20	-898,02
T _{5,6}	17,2	16,3	0,890	14,5	1,00	14,54	-15,10	-219,59
T ₈	20,6	19,6	0,890	17,4	1,00	17,42	-3,50	-60,96
T ₉	48,7	46,3	0,890	41,2	1,00	41,18	4,10	168,82
T ₁₀	30,1	28,6	0,890	25,4	1,00	25,45	7,50	190,87
T ₁₁	33,2	31,5	0,890	28,1	1,00	28,07	14,00	392,99
T _{12,13}	41,6	39,5	0,890	35,2	1,00	35,17	14,00	492,42
W _{wot}	2,8	2,7	1,025	2,7	1,00	2,73	25,50	69,53
W _{wct}	29	27,6	1,025	28,1	0,00	0,00	23,30	0,00
W _{fw}	40,9	38,9	1,000	38,9	1,00	38,86	-6,90	-268,10
W _{sew}	2,2	2,2	1,025	2,3	0,33	0,75	-10,30	-7,74

Tabela 107 – Cargas variáveis (Light)

Item	V _{bruto} [m ³]	V _{liq} [m ³]	ρ [t/m ³]	Peso [t]	Fator	Peso [t]	x/LCB [m]	Mx [t.m]
W _{lv}	--x--	--x--	--x--	337,5	--x--	<u>285,5</u>	<u>0,20</u>	<u>56,91</u>
W _{wep}	--x--	--x--	--x--	28,1	0,00	0,0	23,30	0,00
W _{F31}	--x--	--x--	--x--	8,6	0,75	6,5	-7,10	-45,80
W _{F32}	--x--	--x--	--x--	2,6	0,75	2,0	-7,10	-13,85
W _{F10}	--x--	--x--	--x--	5,3	1,00	5,3	3,50	18,55
W _{lo}	--x--	--x--	--x--	1,0	0,75	0,75	-17,20	-12,90
fuel	260,2	247,2	0,890	220,0	1,00	220,0	-1,53	-337,52
T ₁	5,1	4,8	0,890	4,3	1,00	4,3	-27,30	-117,72
T _{2_3}	13,6	12,9	0,890	11,5	1,00	11,5	-24,90	-286,32
T ₄	50,1	47,6	0,890	42,4	1,00	42,4	-21,20	-898,02
T _{5_6}	17,2	16,3	0,890	14,5	1,00	14,5	-15,10	-219,59
T ₈	20,6	19,6	0,890	17,4	1,00	17,4	-3,50	-60,96
T ₉	48,7	46,3	0,890	41,2	1,00	41,2	4,10	168,82
T ₁₀	30,1	28,6	0,890	25,4	1,00	25,4	7,50	190,87
T ₁₁	33,2	31,5	0,890	28,1	1,00	28,1	14,00	392,99
T _{12_13}	41,6	39,5	0,890	35,2	1,00	35,2	14,00	492,42
W _{wot}	2,8	2,7	1,025	2,7	1,00	2,7	25,50	69,53
W _{wct}	29	27,6	1,025	28,1	1,00	28,1	23,30	654,73
W _{fw}	40,9	38,9	1,000	38,9	0,50	19,4	-6,90	-268,10
W _{sew}	2,2	2,2	1,025	2,3	0,33	0,75	-10,30	-7,74

Tabela 108 – Cargas variáveis (*Heavy*)

Item	V _{bruto} [m ³]	V _{liq} [m ³]	ρ [t/m ³]	Peso [t]	Fator	Peso [t]	x/LCB [m]	Mx [t.m]
W _{lv}	--x--	--x--	--x--	370,89	--x--	<u>335,18</u>	<u>0,09</u>	<u>29,43</u>
W _{wep}	--x--	--x--	--x--	28,08	1,00	28,08	23,30	654,26
W _{F31}	--x--	--x--	--x--	8,60	0,50	4,30	-7,10	-30,53
W _{F32}	--x--	--x--	--x--	2,60	0,50	1,30	-7,10	-9,23
W _{F10}	--x--	--x--	--x--	5,30	1,00	5,30	3,50	18,55
W _{lo}	--x--	--x--	--x--	1,00	0,50	0,50	-17,20	-8,60
fuel	260,2	247,2	0,890	253,37	1,00	253,37	-1,53	-388,71
T ₁	5,1	4,8	1,025	4,97	1,00	4,97	-27,30	-135,58
T _{2_3}	13,6	12,9	1,025	13,24	1,00	13,24	-24,90	-329,75
T ₄	50,1	47,6	1,025	48,78	1,00	48,78	-21,20	-1034,24
T _{5_6}	17,2	16,3	1,025	16,75	1,00	16,75	-15,10	-252,90
T ₈	20,6	19,6	1,025	20,06	1,00	20,06	-3,50	-70,21
T ₉	48,7	46,3	1,025	47,42	1,00	47,42	4,10	194,43
T ₁₀	30,1	28,6	1,025	29,31	1,00	29,31	7,50	219,82
T ₁₁	33,2	31,5	1,025	32,33	1,00	32,33	14,00	452,60
T _{12_13}	41,6	39,5	1,025	40,51	1,00	40,51	14,00	567,11
W _{wot}	2,8	2,7	1,025	2,73	1,00	2,73	25,50	69,53
W _{wct}	29	27,6	1,025	28,10	0,00	0,00	23,30	0,00
W _{fw}	40,9	38,9	1,000	38,86	1,00	38,86	-6,90	-268,10
W _{sew}	2,2	2,2	1,025	2,26	0,33	0,75	-10,30	-7,74

Tabela 109 – Cargas variáveis (Heavy FWD)

Item	V _{bruto} [m ³]	V _{liq} [m ³]	ρ [t/m ³]	Peso [t]	Fator	Peso [t]	x/LCB [m]	Mx [t.m]
W _{lv}	--x--	--x--	--x--	357,21	--x--	<u>304,88</u>	<u>0,82</u>	<u>249,61</u>
W _{wep}	--x--	--x--	--x--	28,08	1,00	28,08	23,30	654,26
W _{F31}	--x--	--x--	--x--	8,60	0,75	6,45	-7,10	-45,80
W _{F32}	--x--	--x--	--x--	2,60	0,75	1,95	-7,10	-13,85
W _{F10}	--x--	--x--	--x--	5,30	1,00	5,30	3,50	18,55
W _{lo}	--x--	--x--	--x--	1,00	0,50	0,50	-17,20	-8,60
fuel	260,2	247,2	0,890	239,70	1,00	239,70	-0,62	-148,65
T ₁	5,1	4,8	0,890	4,31	1,00	4,31	-27,30	-117,72
T _{2,3}	13,6	12,9	0,890	11,50	1,00	11,50	-24,90	-286,32
T ₄	50,1	47,6	0,890	42,36	1,00	42,36	-21,20	-898,02
T _{5,6}	17,2	16,3	0,890	14,54	1,00	14,54	-15,10	-219,59
T ₈	20,6	19,6	0,890	17,42	1,00	17,42	-3,50	-60,96
T ₉	48,7	46,3	1,025	47,42	1,00	47,42	4,10	194,43
T ₁₀	30,1	28,6	1,025	29,31	1,00	29,31	7,50	219,82
T ₁₁	33,2	31,5	1,025	32,33	1,00	32,33	14,00	452,60
T _{12,13}	41,6	39,5	1,025	40,51	1,00	40,51	14,00	567,11
W _{wot}	2,8	2,7	1,025	2,73	1,00	2,73	25,50	69,53
W _{wct}	29	27,6	1,025	28,10	0,00	0,00	23,30	0,00
W _{fw}	40,9	38,9	1,000	38,86	0,50	19,43	-6,90	-268,10
W _{sew}	2,2	2,2	1,025	2,26	0,33	0,75	-10,30	-7,74

Tabela 110 – Cargas variáveis (*Heavy AFT*)

Item	V _{bruto} [m ³]	V _{liq} [m ³]	ρ [t/m ³]	Peso [t]	Fator	Peso [t]	x/LCB [m]	Mx [t.m]
W _{lv}	--x--	--x--	--x--	351,19	--x--	<u>315,75</u>	<u>-0,52</u>	<u>-163,27</u>
W _{wep}	--x--	--x--	--x--	28,08	0,00	0,00	23,30	0,00
W _{F31}	--x--	--x--	--x--	8,60	0,50	4,30	-7,10	-30,53
W _{F32}	--x--	--x--	--x--	2,60	0,50	1,30	-7,10	-9,23
W _{F10}	--x--	--x--	--x--	5,30	1,00	5,30	3,50	18,55
W _{lo}	--x--	--x--	--x--	1,00	0,75	0,75	-17,20	-12,90
fuel	260,2	247,2	0,890	233,67	1,00	233,67	-2,47	-577,57
T ₁	5,1	4,8	1,025	4,97	1,00	4,97	-27,30	-135,58
T _{2,3}	13,6	12,9	1,025	13,24	1,00	13,24	-24,90	-329,75
T ₄	50,1	47,6	1,025	48,78	1,00	48,78	-21,20	-1034,24
T _{5,6}	17,2	16,3	1,025	16,75	1,00	16,75	-15,10	-252,90
T ₈	20,6	19,6	1,025	20,06	1,00	20,06	-3,50	-70,21
T ₉	48,7	46,3	0,890	41,18	1,00	41,18	4,10	168,82
T ₁₀	30,1	28,6	0,890	25,45	1,00	25,45	7,50	190,87
T ₁₁	33,2	31,5	0,890	28,07	1,00	28,07	14,00	392,99
T _{12,13}	41,6	39,5	0,890	35,17	1,00	35,17	14,00	492,42
W _{wot}	2,8	2,7	1,025	2,73	1,00	2,73	25,50	69,53
W _{wct}	29	27,6	1,025	28,10	1,00	28,10	23,30	654,73
W _{fw}	40,9	38,9	1,000	38,86	1,00	38,86	-6,90	-268,10
W _{sew}	2,2	2,2	1,025	2,26	0,33	0,75	-10,30	-7,74

A eq. (13) pode ser rearranjada de forma a determinar os valores de peso e momento requeridos do sistema de compensação e trimagem. Ressalta-se que aqui as variáveis representam massas e não as respectivas forças peso (como originalmente estabelecido no capítulo 5). Por simplificação, a presença de água residual nos tanques de lastro é desconsiderada ($L_{RW} = 0$). Dessa forma:

$$W = W_A + (W_{LV} + W_{VB} + W_{MBT}) = \Delta \downarrow \quad \text{eq. (77)}$$

$$W_{VB} = \Delta \downarrow - W_A - W_{MBT} - W_{LV} \quad \text{eq. (77b)}$$

Raciocínio análogo pode ser estabelecido para os momentos necessários ao equilíbrio do navio. A Tabela 111 apresenta os cálculos.

Tabela 111 – Lastro Variável (Polígono de Equilíbrio)

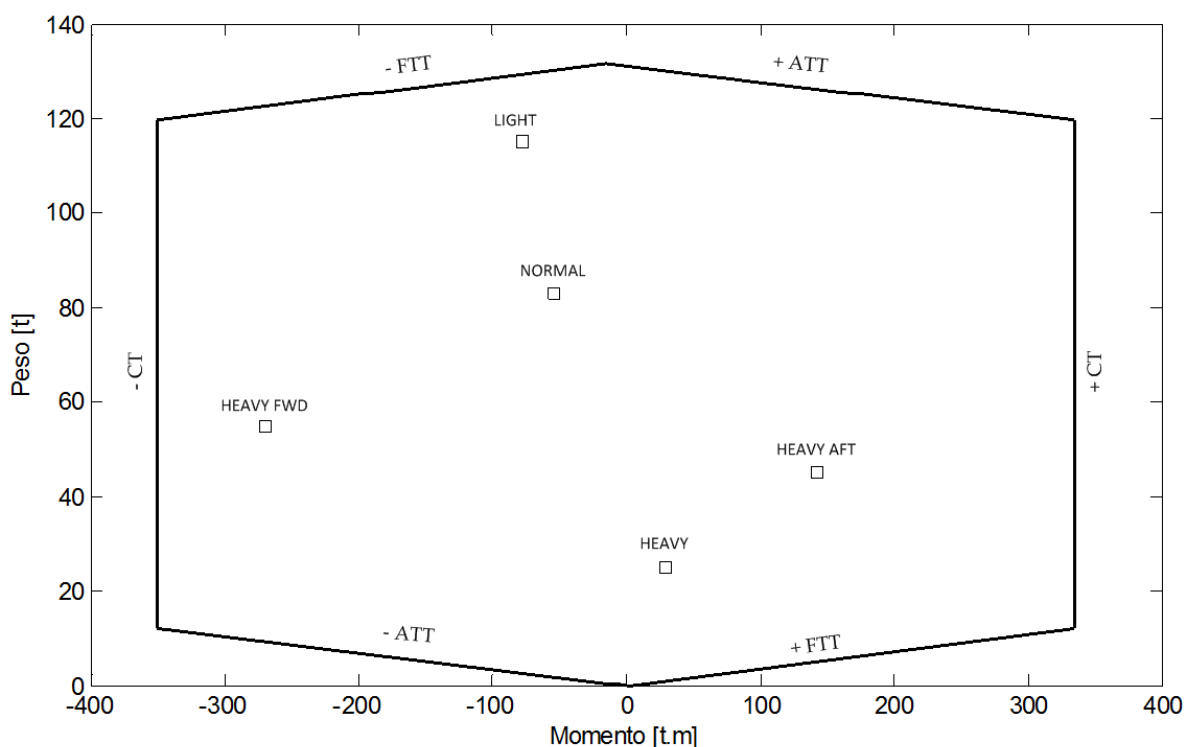
	Normal		Light		Heavy		Heavy FWD		Heavy AFT	
Volumes [m³]										
$\nabla\downarrow$	2224,4		2224,4		2224,4		2224,4		2224,4	
V_{MBT}	204		204		204		204		204	
ρ_{sw} [t/m ³]	1,025		1,030		1,010		1,010		1,010	
Pesos	W [t]	M_x [t.m]	W [t]	M_x [t.m]	W [t]	M_x [t.m]	W [t]	M_x [t.m]	W [t]	M_x [t.m]
$\Delta\downarrow$	2280	0,00	2291	0,00	2247	0,00	2247	0,00	2247	0,00
W_{MBT}	209,1	20,91	210	21,01	206	20,60	206	20,60	206	20,60
W_A	1680,3	0,00	1680,3	0,00	1680,3	0,00	1680,3	0,00	1680,3	0,00
W_{LV}	307,9	33,12	285,5	56,91	335,18	-10,60	304,9	249,61	315,8	-163,27
W_{VB}	83	-54,03	115	-77,92	25	29,43	55	-270,21	45	142,67

De posse dos pares de lastro variável para cada condição de carga é necessário traçar a envoltória do polígono. Isto é feito supondo que os tanques de trimagem/compensação são preenchidos de forma quase estática, sucessivamente, a partir dos tanques de vante (no presente caso, FTT, CT, ATT). Traçam-se os respectivos momentos (t.m) no eixo das abscissas e pesos (t) no eixo das ordenadas. Em seguida os tanques são esvaziados, também de vante para ré, sucessivamente e de forma quase-estática, e o restante do polígono é traçado.

A envoltória resultante representa os limites da capacidade de compensação e trimagem que o sistema possui. Se todos os pontos das diversas condições de carga se situarem internamente ao polígono, o sistema de trimagem e compensação é adequado. Do contrário, deve-se reformular o arranjo do navio e/ou o volume dos tanques do sistema de compensação.

O polígono de equilíbrio do S4 é apresentado na Figura 98.

Figura 98 – Polígono de Equilíbrio



Fonte: autor

L-7) Estimativa de calado e GM

Conhecido o valor de W_N , é possível estimar o calado na superfície por estudo dos volumes estanques abaixo da linha d'água (eles deslocarão uma massa de água de peso igual ao da condição W_N). O calado é de aproximadamente 5,81 m. Isso, permite também traçar o plano de linha d'água e calcular a altura metacêntrica do navio:

$$BM_T = \frac{I_x}{\nabla \uparrow} = \frac{336,5}{2020,4} = 0,167\text{m}$$

$$GM = (KB + BM_T - KG) = 3,3 - 2,63 + 0,17 = 0,84\text{m}$$

Este valor é maior que o GM mínimo requerido nos REM.

APÊNDICE M – MODELOS PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE MÁXIMA

Dois modelos alternativos para o cálculo da velocidade máxima são apresentados a seguir. Os equacionamentos originais partem de uma dada velocidade para derivar a potência efetiva requerida.

O proposto por Burcher e Rydill [4] é similar aos modelos clássicos baseados no Coeficiente de Almirantado. As equações foram manipuladas para expressar v_{\max} como função da potência do MEP²²⁴.

Tabela 112 – Modelo de resistência ao avanço e velocidade (Burcher e Rydill)

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
$P_{\text{MEP}} = \text{SHP}$	potência do MEP [W] (considerada igual à potência no eixo)	entrada
V_{CR}	volume do casco resistente [m ³]	entrada
V_{MBT}	volume bruto dos tanques de lastro [m ³]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
v_{\max}	velocidade máxima do submarino [m/s]	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
K_p	constante de proporcionalidade	20
PC	coeficiente propulsivo	0,74

Tabela 113 – Equacionamento (Burcher e Rydill)

Equacionamento	Legenda/Comentários
$\nabla_f = 1,15(V_{\text{CR}} + V_{\text{MBT}})$	eq. (78a) $\nabla_f =$ volume de forma [m ³]
$\text{EHP} = \text{SHP} \cdot \text{PC}$	eq. (78b) EHP = potência efetiva [W]
$v_{\max} = \left(\frac{\text{EHP}}{K_p \nabla_f^{0,64}} \right)^{1/2,9}$	eq. (78c) SHP = potência no eixo [W]

No caso do S4, temos $V_{\text{CR}} = 1924 \text{ m}^3$, $V_{\text{MBT}} = 215 \text{ m}^3$ e $P_{\text{MEP}} = \text{SHP} = 2200 \text{ kW}$. Assim, aplicado o modelo anterior, $\nabla_f = 2460 \text{ m}^3$ e $v_{\max} = 17 \text{ kt}$ (8,81 m/s).

²²⁴ Aqui, $P_{\text{MEP}} = \text{SHP}$.

O modelo proposto por Gillmer e Johnson [51] é mais sofisticado e faz uso de alguns coeficientes de forma para derivar os valores de interesse. A obtenção da velocidade máxima pode ser feita por processo iterativo ou pela manipulação conveniente da formulação, com vistas a estabelecer uma equação semelhante à eq. (28b). Aqui, o processo iterativo foi utilizado. O modelo fornece equações para a estimativa das áreas molhadas, porém optou-se por utilizar os valores obtidos da maquete eletrônica do navio.

As variáveis de entrada/saída e parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 114. O equacionamento é apresentado na Tabela 115.

Tabela 114 – Modelo de resistência ao avanço e potência (Gillmer e Johnson)

Variáveis de entrada		
Var.	Definição	Valor
D	diâmetro do submarino [m]	entrada
L	comprimento do submarino [m]	entrada
V_{env}	volume de envelope do casco externo [m ³]	entrada (ver Tabela 13)
v	velocidade considerada [m/s]	entrada
Variáveis de saída		
Var.	Definição	Valor
SHP	potência no eixo [kW]	saída
v_{max}	velocidade máxima do submarino [m/s]	saída
Parâmetros do Modelo		
Par.	Definição	Valor
ρ_{sw}	densidade da água do mar [kg/m ³]	1025
ν	viscosidade cinemática da água [m ² /s]	1,05e-6
C_a	coeficiente de correlação	0,0002
PC	coeficiente propulsivo	0,75

Tabela 115 – Equacionamento (Gillmer e Johnson)

Equacionamento		Legenda/Comentários
$C_p = \frac{V_{env}}{\frac{\pi}{4} D^2 L}$	eq. (79a)	C_p = coeficiente prismático
$C_s = 1,03 C_p^{(2/3)}$	eq. (79b)	C_s = coeficiente de área molhada
$WS = C_s \pi L D$	eq. (79c)	WS = área molhada do casco externo [m ²]
$S_a = 0,2 WS$	eq. (79d)	S_a = área molhada de apêndices [m ²]
$Re = \frac{vL}{\nu}$	eq. (79e)	Re = Número de Reynolds
$C_f = \frac{0,075}{[\log_{10}(Re) - 2]^2}$	eq. (79f)	C_f = coeficiente de resistência friccional
$C_v = C_f \left[1 + \frac{D}{2L} + 3 \left(\frac{D}{L} \right)^3 \right]$	eq. (79g)	C_v = coeficiente de resistência viscosa
$C_{v_ap} = 1,8 C_v$	eq. (79h)	C_{v_ap} = coeficiente de resistência viscosa de apêndices
$EHP = \frac{1}{2000} \rho_{sw} v^3 [WS(C_v + C_a) + C_{v_ap} S_a]$	eq. (79i)	EHP = potência efetiva [kW]
$SHP = \frac{EHP}{PC}$	eq. (79j)	SHP = potência no eixo [kW]

No caso do S4, temos $V_{env} = 2235 \text{ m}^3$, $WS = 1194 \text{ m}^2$, $S_a = 521 \text{ m}^2$ e $P_{MEP} = SHP = 2200 \text{ kW}$. Assim, aplicado o modelo anterior, $v_{max} \approx 18 \text{ kt}$ (9,21 m/s).

(página deixada intencionalmente em branco)

APÊNDICE N – ARRANJO GERAL – S4

