DIEGO FELIPE SARZOSA BURGOS Técnica de Otimização Multiobjetivo Aplicada ao Projeto Preliminar de Navios Petroleiros

São Paulo

2008

DIEGO FELIPE SARZOSA BURGOS

Técnica de Otimização Multiobjetivo Aplicada ao Projeto Preliminar de Navios Petroleiros

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

DIEGO FELIPE SARZOSA BURGOS

Técnica de Otimização Multiobjetivo Aplicada ao Projeto Preliminar de Navios Petroleiros

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. Marcelo Ramos Martins

São Paulo 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Burgos, Diego Felipe Sarzosa

Técnica de otimização multiobjetivo aplicada ao projeto preliminar de navios petroleiros / D.F.S. Burgos. -- São Paulo, 2008. p.

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

1.Algoritmos genéticos 2.Otimização matemática 3.Navio tan que (Projeto) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

DEDICATÓRIA

Para Deus meu amigo fiel e imparcial, conselheiro de todo instante.

À minha esposa Tatiane por sua incrível ajuda, carinho e amor e meu filho Guillermo Henrique que chegou para iluminar minha vida.

A meu pai Guillermo Enrique que descansa na graça de Deus pelo amor, apoio e forças que me deu, muito obrigado pai.

A minha mãe Lyra Beatriz, meus irmãos Alberto, Guillermo, Manuel, Enrique, irmãs Isabel, Rosário, Carmen, Maria Luisa, sobrinhos Ariana, Jorge Enrique, Guillermo David, José Luis, Luis, Daniela, Issac, e Fernando Ernesto por ser minha fonte de inspiração e vontade de superação.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Rui Carlos Botter por sua imensurável ajuda para vir ao Brasil e realizar meu curso de pós graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins, por sua ótima orientação, dedicação de tempo, valiosas sugestões, constante apoio e contribuições que tornaram este trabalho possível.

A Faculdade de Engenharia Marítima e Ciências do Mar da Escola Superior Politécnica do Litoral do Equador, em forma especial aos Professores Cristobal Mariscal Díaz, José Rolando Marin, Bolivar Vaca Romo, Eduardo Cervantez e ao Reitor. Moises Tacle G.

A meu amigo Carlos Mojica por sua ajuda imparcial em todo momento.

A meus amigos no Brasil Clemente, Ruben, Maricruz, Juan Carlos, Rodolfo, Balu, Newton e todos meus amigos no Equador.

Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP pela oportunidade de realização deste curso de mestrado.

Thomas Edison fez 2000 experiências até inventar a lâmpada. Um jovem jornalista lhe perguntou: Por que de tantos fracassos? Ele respondeu: "Não fracassei nenhuma vez. Inventei a lâmpada. Acontece que foi um processo de 2000 passos."

RESUMO

Este trabalho apresenta um processo racional para a seleção das dimensões e coeficientes de forma ótimos para um navio petroleiro usando a técnica dos algoritmos genéticos. É proposto um procedimento para balanceamento em função do peso e espaço disponível de carga, determinando sua viabilidade e permitindo balancear navios de peso ou de volume. A elaboração de um procedimento e sua implementação em um programa eficiente é muito importante no dimensionamento preliminar de um navio, assim, esta pesquisa é uma divulgação da técnica dos algoritmos genéticos como uma técnica robusta para o projeto preliminar do navio.

Duas funções de mérito são usadas para avaliar cada projeto: custo e vazamento médio de óleo. Estes atributos são conflitantes entre si, isto é, um baixo custo corresponde a um alto vazamento e vice-versa. O vazamento médio de óleo é avaliado com a metodologia probabilística proposta pela INTERTANKO (INTERTANKO, 2002). A avaliação do vazamento médio, através de um adimensional, considera a possibilidade de ocorrência de eventos de encalhes e/ou colisão resultando, respectivamente, em dano ao fundo e ao costado. Para a estimativa do custo são utilizados dois modelos, apresentando-se uma comparação dos seus efeitos nos valores finais das dimensões principais. Além disso, para o procedimento de balanceamento, cinco modelos de peso do casco são testados e analisados os impactos na forma e distribuição da fronteira de Pareto.

Um algoritmo genético é implementado para buscar os parâmetros de projeto ótimos e identificar a fronteira não-dominada de Pareto. O algoritmo é testado com quatro funções encontradas na literatura técnica. As funções de teste são convexas, não-convexa, descontínua e uma com quatro restrições funcionais. A implementação mostra resultados similares com os apresentados na literatura. Um navio Suezmax, um Aframax e um Panamax são usados como

estudo de casos para comparar os resultados obtidos com o programa implementado.

Um objetivo adicional deste trabalho é expor à comunidade naval a utilidade e efetividade dos algoritmos genéticos nos problemas de projeto multiobjetivo. O enfoque desta pesquisa está na metodologia implementada e na sua recomendação para o projeto preliminar de navios.

Palavras chaves: Algoritmos Genéticos. Navio Tanque (Projeto). Otimização Matemática.

ABSTRACT

This paper shows the rational process of selecting the optimal dimensions and forms coefficients of tanker ships using the technique of genetic algorithm. It is proposed a procedure to balance designs in weight and useful space and assesses their feasibility so that weight and volume limited tankers can be balanced. The elaboration of a procedure and its implementation in an efficient program is so important in the preliminary dimension of a ship, so this paper is a divulgation of the genetic algorithm as robust technique for the preliminary ship design.

Two objective attributes are used to evaluate each design: Total Cost and Mean Oil Outflow. This attributes are conflicting between them, that is, a low cost correspond a high outflow and vice versa. The Mean Oil Outflow is evaluated with the probabilistic methodology proposed by the INTERTANKO to IMO. The assessment of mean oil outflow, by a non dimensional parameter, supposes the event of grounding and/or collision resulting in bottom and side damage respectively. In estimating the cost two models are used performing a comparison of their effects on the final values of principal dimension. In addition, for the balance procedure, five hull weight models are tested and analyzed the impact on the form and distribution of Pareto frontier.

A genetic algorithm is implemented to search the optimal design parameters and identify non-dominated frontier of Pareto. The algorithm is tested with four test functions found in the technical literature. The test functions selected are convex, non convex, discontinuing and one with four restrictions. The implementation shows similar results with those showed in others papers. A Suezmax, an Aframax, and a Panamax ships are used as case study in order to compare the gotten results by the implemented program.

One additional goal of this work is to expose to naval community the usefulness and effectiveness of the genetic algorithm in the Multi-Objective design. The

emphasis of this paper is on methodology of design implemented and is suggested for preliminary ship design.

Keywords: Genetic Algorithm. Ship Tanker Design. Mathematic Optimization.

SUMÁRIO

	LISTA DE ILUSTRAÇÕES	i
	LISTA DE TABELAS	vi
	LISTA DE SIMBOLOS	ix
1.	INTRODUÇÃO	1
1.	.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.	.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	3
1.2	.2 Objetivos	4
1.3	.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
1.4	.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2.	PROJETO DE NAVIOS	13
2.	.1. PROJETO PRELIMINAR DE NAVIOS	13
2.2	.2. Representação do Navio	17
2.3	.3. Requisitos e Restrições do Projeto	19
2.4	.4. DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES PRINCIPAIS E COEFICIENTES DE FORMA	23
2.	.5. Definição da Casaria do Convés.	26
2.0	.6. DETERMINAÇÃO DA TRIPULAÇÃO	28
2.	.7. ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO	29
2.8	.8. CÁLCULO DA POTÊNCIA REQUERIDA	32
2.9	.9. DEFINIÇÃO DO MOTOR PROPULSOR PRINCIPAL	33
2.	.10. ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE OPERAÇÃO	
2.	.11. ESTIMATIVA DE PESOS	36
	2.11.1. Peso Estrutural	37
	2.11.1.1.Peso do Casco e Casaria	38
	2.11.2. Peso do Sistema Propulsor	40
	2.11.3. Peso do Outfit	41
	2.11.4. Itens do Peso Morto	42
2.	.12. ESPAÇO DE CARGA	
2.	.13. DEFINIÇÃO DOS PEAKS DE PROA E POPA E COFFERDAM	45
2.	.14. ESTIMATIVA DE CENTROS VERTICAIS DE GRAVIDADE E AVALIAÇÃO DA ESTABILIDA	ADE TRANSVERSAL
	INICIAL	
	2.14.1. Localização do Centro de Gravidade	47
	2.14.2. Cálculo do BMT e KB	51
2.	.15. ESTIMATIVA DE CUSTOS	
	2.15.1. Custos de Construção	59
	2.15.2. Comparação dos três modelos de Custo de Construção	63
	2.15.3 Custos de Operação	64

	2.15.3.1	.Critério Econômico	66
2.16	. Avai	IAÇÃO DE RISCO DE ESPALHAMENTO DE ÓLEO.	68
3.	MÉTO	DOS DE OTIMIZAÇÃO	71
3.1.	Intr	ODUÇÃO AO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DE NAVIOS	71
3.2.	TÉCI	NICAS DE OTIMIZAÇÃO	72
3.3.	Pro	BLEMAS DE OTIMIZAÇÃO COM MÚLTIPLOS OBJETIVOS	76
3.4.	ALG	DRITMOS GENÉTICOS E ESTRATÉGIAS EVOLUTIVAS	79
	3.4.1.	Idéia Básica dos AGs	81
	3.4.2.	Campo de Aplicação dos AGs	85
	3.4.3.	Vantagens e Desvantagens dos AGs	86
	3.4.4.	Representação do Cromossomo e do Espaço Solução	87
	3.4.5.	Operadores Genéticos	91
	3.4.5.1.	Operador de Seleção	91
	3.4.5.2.	Operador de Cruzamento ou Recombinação	98
	3.4.5.3.	Operador de Mutação	99
	3.4.6.	Métodos de Tratamento das Restrições usando AGs	100
3.5.	DES	CRIÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO	104
	3.5.1.	Restrições Impostas	110
3.6.	VALI	DAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO	111
	3.6.1.	Função Teste 1	112
	3.6.2.	Função Teste 2	114
	3.6.3.	Função Teste 3	117
	3.6.4.	Caso Real: Viga Soldada	119
	PROJ	ETO OTIMIZADO	122
4.1.	Mod	ELO DE SÍNTESE	122
4.2.	DEF	NIÇÃO DAS FUNÇÕES DE MÉRITO EMPREGADAS	141
4.3.		JDOS DE CASOS	
j.	CON	CLUSÕES	176
5.	REFE	RÊNCIAS	179
\PÊN	IDICE	Α	187
Mod	ELO DE \	Vatson e Gilfillan	187
Mod	ELO DE l	MISH ET AL.	188
Mod	ELO DE Ì	HARVALD E JUNCHER	193
Mod	ELO DE A	ALVARINHO ET AL	194
Mod	ELO DE S	SATO	194
APÊN	IDICE	B	195

Modelo de Carreyette	195
Modelo de Watson	
Modelo PODAC	199
APÊNDICE C	201
Estimativa de vazamento dada a ocorrência de colisão	201
Estimativa de vazamento dada a ocorrência de encalhe	205
APÊNDICE D	210
APÊNDICE E	213
CARACTERÍSTICAS DOS NAVIOS BALANCEADOS	213
CARACTERÍSTICAS DOS NAVIOS NÃO BALANCEADOS	214

LISTA DE ILUSTRAÇOES

Figura 1.1: Diferentes formas do casco para avaliar a influência no custo de
construção e operação (MURPHY et al. (1965))8
Figura 2.1: Processo de solução de um problema (NISHIMOTO, 2006) 14
Figura 2.2: Tipos de popa (LAMB 1986)
Figura 2.3: Espiral de projeto (MURPHY R. D et al., (1965))
Figura 2.4: Representação da área obscura máxima permitida pela IMO
("Adaptado de IMO, 1997")
Figura 2.5: Esquema empregado para definir a altura total da casaria 27
Figura 2.6: Número de Tripulantes em função do Peso Morto do navio 28
Figura 2.7: Diferentes tipos de popa e seus correspondentes coeficientes
C _{STERN} (WATSON, 1998)
Figura 2.8: Comparação de tamanho, densidade e peso para vários tipos de
motores (WATSON ,1998)
Figura 2.9: Variação do peso do aço do navio com o peso morto total a ser
transportado empregando os diferentes modelos descritos anteriormente .
40
Figura 2.10: Peso do Outfit em função do comprimento, (Watson 1998) 41
Figura 2.11: Classificação dos níveis de estimativa dos custos de um navio
(Adaptado de National Steel & Shipbuilding, 2000) 55
Figura 2.12: Curva de Períodos de Falha 57
Figura 2.13: Custos aproximados da maquinaria (BENFORD, 1956) 58
Figura 2.14: Diminuição dos custos pela construção em serie de navios
(BENFORD, 1956) 58

Figura 2.15: Hierarquia de produtos usado no PWBS (National Steel &
Shipbuilding, 2000) 62
Figura 2.16: Comparação entre custo de construção 63
Figura 3.1: Fronteira de Pareto para um problema 2D77
Figura 3.2: Funções teste do problema proposto por Shaffer
Figura 3.3: Fronteira de Pareto diferenciada
Figura 3.4: Seqüência lógica de processamento em um AGs
Figura 3.5: Simulação dos valores Iniciais aleatórios do vetor de projeto para
um indivíduo90
Figura 3.6: Exemplo de distribuição de probabilidades usando uma roleta 92
Figura 3.7: Variação de A1 com a pressão de seleção94
Figura 3.8: Probabilidade de sobrevivência para diferentes pressões de
seleção95
Figura 3.9: Roleta usada por Barker com N _{POP} marcadores igualmente
separados96
Figura 3.10: Seleção experimental de acordo ao algoritmo de Baker (Shahak
1998)96
Figura 3.11: Ilustração do processo de cruzamento com um ponto 98
Figura 3.12: Exemplo de aplicação do operador de mutação
Figura 3.13: Espaço de busca viável, inviável e pontos factíveis
Figura 3.14: Fluxograma do Algoritmo de Otimização Multiobjetivo
Implementado 106
Figura 3.15: Operações realizadas para determinar quais serão os novos
membros da população (CHENG E LI, 1997) 109

Figura 3.16: Fronteira de Pareto da função de teste $\varphi_{\rm l}$ obtida com PATANGA.
114
Figura 3.17: Resultados obtidos de 5 execuções do problema $\varphi_{\rm l}$,(CASTRO,
2001)114
Figura 3.18: Resultados obtidos de 2 execuções empregando o algoritmo
desenvolvido para o problema ϕ_2
Figura 3.19: Resultados obtidos de 5 execuções do problema ϕ_2 (CASTRO,
2001)116
Figura 3.20: Resultados obtidos para o problema ϕ_3 a partir de 3 execuções do
algoritmo desenvolvido
Figura 3.21: Resultados obtidos de 5 execuções do problema ϕ_3 (CASTRO,
2001)118
Figura 3.22: Viga soldada num extremo (DEB, 1998)
Figura 3.23: Fronteira ótima de Pareto para o problema da viga soldada 121
Figura 4.1: Modelo de Síntese proposto
Figura 4.2: Adequação do espaço disponível para a praça de máquinas 126
Figura 4.3: Redução do pontal do navio e aumento do espaço de carga devido
ao espaço da praça de máquinas ser muito maior que o requerido 128
Figura 4.4: Iterações realizadas no processo de balanceamento proposto 130
Figura 4.5: Navios não balanceados durante o processo de otimização 131
Figura 4.6: História do processo de convergência do modelo de síntese
proposto para o primeiro navio escolhido133
Figura 4.7: Processo de convergência do modelo de síntese proposto para o

Figura 4.8: Processo de balanceamento para o primeiro navio escolhido 137
Figura 4.9: Processo de balanceamento para o segundo navio escolhido 140
Figura 4.10: Comparação das curva de Pareto para cada modelo de Pesc
analisado144
Figura 4.11: Comparação das curvas de Pareto obtidas para cada modelo de
custo analisado146
Figura 4.12: Fronteira ótima de Pareto para diversos tamanhos de populações
iniciais para o projeto do navio Tatina151
Figura 4.13: Fronteira ótima de Pareto para vários tamanhos máximos do
número de gerações para o projeto do navio Tatina151
Figura 4.14: Fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade
de cruzamento para o projeto do navio Tatina152
Figura 4.15: Fronteira ótima de Pareto para o projeto do navio Hellspont Tatina
Figura 4.16: Fronteira ótima de Pareto para vários tamanhos máximos do
número de gerações para o projeto do navio Ataulfo Alves
Figura 4.17: Fronteira ótima de Pareto para diversos tamanhos de populações
iniciais para o projeto do navio Ataulfo Alves161
Figura 4.18: Fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade
de cruzamento para o projeto do navio Ataulfo Alves161
Figura 4.19: Fronteira de Pareto para dimensionar um navio que satisfaça os
requisitos de projeto do Suezmax Ataulfo Alves162
Figura 4.20: Fronteira ótima de Pareto para diversos tamanhos de populações
iniciais para o projeto do navio Hellspont Pride169

Figura 4.21: Fronteira ótima de Pareto para vários tamanhos máximos do
número de gerações para o projeto do navio Hellspont Pride 170
Figura 4.22: Fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade
de cruzamento para o projeto do navio Panamax Hellspont Pride 170
Figura 4.23: Fronteira ótima de Pareto para o projeto do navio Panamax
Hellspont Pride

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Restrições de projeto nas dimensões principais do navio (WATSON,
1998)21
Tabela 2 - Dimensões principais de navios petroleiros (WATSON, 1998;
CEGEN, 2008)21
Tabela 3 - Estimativas do coeficiente de bloco até o pontal e 80% do pontal
(WATSON, 1998)26
Tabela 4 - Estimativa dos pesos correspondentes ao peso morto 43
Tabela 5 - Estimativa dos centros verticais de gravidade dos componentes do
peso leve do navio (KUPRAS apud PARSON, 2003) 48
Tabela 6 - Estimativa dos centros verticais de gravidade dos componentes do
peso morto do navio48
Tabela 7 - Pesos e centros verticais de gravidade da água do mar utilizada
como lastro (MISH et al., 2000)50
Tabela 8 - Estimativa do KB e BMT na condição de lastro 52
Tabela 9 - Valores assumidos de anos de vida útil, quantidade de dias
trabalhados por ano e taxa de juros anual para fazer uma análise de valor
presente64
Tabela 10 - Valores unitários de diversos custos de operação (WATSON, 1998;
MISH et al., 2000) 65
Tabela 11 - Custos de operação em US\$ 67
Tabela 12 - Algoritmos de Otimização Numéricos (RAO, 1996)
Tabela 13 - Limites do espaço de busca e número de divisões adotadas para
cada gene 89
Tabela 14 - Formulação do problema da viga soldada (DEB, 1998) 120

Tabela 15 Variáveis de projeto iniciais que definem a geometria dos navios
selecionados e balanceados132
Tabela 16 - Variáveis de projeto iniciais que definem a geometria dos navios
selecionados e que não foram balanceados
Tabela 17 - Dados empregados para a comparação entre modelos de Peso do
Aço142
Tabela 18 - Dimensões principais obtidas com os diferentes modelos de peso
do aço das soluções com mínimo custo total
Tabela 19 - Dimensões principais obtidas com os diferentes modelos de peso
do aço das soluções com mínimo vazamento meio (OM) 145
Tabela 20 - Dimensões principais obtidas com os diferentes modelos de custo
de construção para as soluções com mínimo custo
Tabela 21 - Dimensões principais obtidas com os diferentes modelos de peso
do aço param as soluções com mínimo vazamento médio (OM) 147
Tabela 22 - Requisitos de projeto impostos para o navio Hellspont Tatina 150
Tabela 23 - Características do navio Hellspont Tatina e resultados obtidos com
o PATANGA154
Tabela 24: Parcelas da resistência ao avanço para o navio Hellspont Tatina e o
projeto equivalente obtido com PATANGA155
Tabela 25 - Parcelas da resistência ao avanço para o navio de mínimo custo e
mínimo OM para o caso de projeto do navio Hellspont Tatina 159
Tabela 26 - Requisitos de projeto impostos para o navio Ataulfo Alves 160
Tabela 27 - Dimensões do Ataulfo Alves e resultados obtidos com o PATANGA.

Tabela 28 - Parcelas da resistência ao avanço para o navio Ataulfo Alves e o
projeto equivalente obtido com PATANGA164
Tabela 29 - Parcelas da resistência ao avanço para o navio de mínimo custo e
mínimo OM para o caso de projeto do navio Ataulfo Alves
Tabela 30 - Requisitos de projeto impostos para o navio Panamax Hellspont
Pride
Tabela 31 - Características do navio Hellspont Pride e resultados obtidos com o
PATANGA172
Tabela 32 - Parcelas da resistência ao avanço para o navio Hellspont Tatina e
o projeto equivalente obtido com PATANGA173

LISTA DE SIMBOLOS

A Área da superfície molhada do casco (m²)

a Limite inferior da variável de projeto

A* Área da seção mestra até o calado, considerada com um

retângulo (m²)

A_x Área máxima da seção mestra submersa (m²)

B Boca do navio (m)

b Limite superior da variável de projeto
BCB Largura dos tanques de carga e Slop (m)

BMT Distância entre o centro de flutuação e o metacentro (m) C Variável usada para calcular o critério de estabilidade

C_B Coeficiente de bloco

C_BPONTAL Coeficiente de bloco até o pontal do navio

C_B Coeficiente de bloco até o 80% do pontal do navio

C_X
 Coeficiente da seção mestra
 C_{DWT}
 Coeficiente de peso morto total
 C_P
 Coeficiente prismático longitudinal
 C_{WI}
 Coeficiente do plano da linha d'água

CF_{TK} Coeficiente empregado para estimar o coeficiente de bloco dos

tanques de carga de proa até o pontal

CS_{TK} Coeficiente empregado para estimar o coeficiente de bloco dos

tanques de Slop até o pontal

D Pontal do navio (m)

DCB Altura dos tanques de carga e Slop (m)

DWT_{CARGA}
Peso morto da carga (Ton)
DWT_{TOTAL}
Peso morto total do navio (Ton)
Autonomia do navio (milhas náuticas)

EHP Potência efetiva total (HP) E_T Numeral do casco (m^2)

F_i Valor da função aptidão para cada solução

F_{MIN} Borda livre mínima (m) GM Altura metacêntrica (m)

g Aceleração da gravidade (m/s²)
Hv Altura total da casaria de convés (m)

h_{db} Altura do duplo fundo (m)

H_{DK} Altura de cada deck da casaria (m)

I Inércia da secção mestra

Inércia transversal do plano de flutuação ao calado de projeto

 $(m^{4)}$

KB Posição vertical do centro de flutuação do volume submerso (m)

KG Centro vertical de gravidade do navio (m) LCtk Comprimento dos tanques de carga (m)

LDH_{REQUERIDO} Comprimento requerido da casaria de convés (m) LPP Comprimento do navio entre perpendiculares (m)

LStk Comprimento dos tanques de Slop (m)

LWL Comprimento do navio ao calado de projeto (m)

L^{Máquina} Comprimento disponível para praça de máquinas (m) Disponível

Comprimento do motor escolhido (m)

L^{Motor} Escolhido

L^{Máquina} Requerido Comprimento requerido da praça de máguinas (m)

Momento flexor vertical de flexão (Ton-m) M_{FLETOR}

Nível de automatização do navio ManFac

Número de divisões desejadas na faixa de valores de cada Ν

variável de projeto

Número de divisões transversais no espaço de carga N_{CARGO}

Número total de decks na casaria N_{DK}

Número máximo de gerações feitas pelo algoritmo N_{GER}

Velocidade de rotação do motor principal em revoluções por N_{MOT}

minuto (rpm).

 N_{POP} Tamanho da população

Tipo de popa N_{POPA}

Número de tripulantes necessários para operar o navio N_{TRIPULAÇÃO}

Número de soluções escolhidas para realizar o torneio N_{TORNEIO}

OASS Comprimento da área escura da superfície do mar a partir da

proa do navio

OM Vazamento médio de óleo (m³)

Vazamento médio dado a ocorrência de encalhe (m³) O_{MB} Vazamento médio dado a ocorrência de colisão (m³) O_{MS}

Pe Potência de reboque do casco nu (HP)

PC Coeficiente propulsivo

 P_{c} Probabilidade de cruzamento Ы Potência total instalada (HP) P_{m} Probabilidade de mutação **PMF** Fator marginal de potência

Pressão de seleção $P_{\rm s}$

Número de motores principais P_{systyp} Resistência total ao avanço (N) $R_{\scriptscriptstyle T}$ Raio de curvatura do bojo (m) Coeficiente de apêndices do navio

S

Consumo específico de combustível (Kg /Hora - HP) **SFC**

SHP Potência no eixo (HP)

Τ Calado na linha de projeto (m)

 T_{m} Calado mínimo na condição de lastro (m) Espessura da chapa da viga-caixão (m) tt Velocidade de projeto ou de serviço (nós) V VCG_{AD} Centro vertical de gravidade da água doce (m)

 VCG_{CARGA} Centro vertical de gravidade da carga transportada (m)

 VCG_{HULL} Centro vertical de gravidade do casco (m)

 VCG_{MAG} Centro vertical de gravidade da máquina principal (m) Centro vertical de gravidade da máquina principal (m) VCG_{MAC} **VCG**_{oc} Centro vertical de gravidade do óleo combustível (m) VCG_{OL} Centro vertical de gravidade do óleo lubrificante (m)

VCGOUTFIT Centro vertical de gravidade do Outfit (m)

Centro vertical de gravidade das provisões (m) VCG_{PROVISÕES}

VCG_{TRIPULAÇÃO} Centro vertical de gravidade da tripulação e seus efeitos (m)

V_s Velocidade obtida com o motor escolhido (nós)

w Largura do duplo costado (m)
W_{AD} Peso da água doce (Ton)
W_{CASCO} Peso do casco (Ton)

 $\begin{array}{lll} W_{\text{DH}} & \text{Peso da casaria de convés (Ton)} \\ W_{\text{M}} & \text{Peso do sistema propulsor (Ton)} \\ W_{\text{ME}} & \text{Peso do motor principal (Ton)} \\ W_{\text{OC}} & \text{Peso do óleo combustível (Ton)} \\ W_{\text{OL}} & \text{Peso do óleo lubrificante (Ton)} \\ \end{array}$

W_{OUTFIT} Peso do Outfit (Ton) W_{PROV} Peso das provisões (Ton)

W_{REM} Peso do restante da máquina (Ton) WS Peso da estrutura de aço (Ton)

W_{TRIP} Peso da tripulação e seus efeitos (Ton)

X_a Posição a ré do tanque medido desde a perpendicular de popa

(m)

X_f Posição a vante do tanque desde a perpendicular de popa (m) y Mínima distância horizontal entre o tanque e o costado do navio

(m)

y_{NA} Posição vertical da linha neutra da seção (m)

Y_P Distância horizontal entre o ponto mais a bombordo do tanque

até um plano vertical localizado a $\frac{B}{2}$ a boreste da linha de centro

(m)

Y_s Distância horizontal entre o ponto mais a boreste do tanque até

um plano vertical localizado a $\frac{B}{2}$ a boreste da linha de centro

(m)

Z_I Altura mais baixa do tanque medido desde a linha base (m)
 Z_u Altura mais alta do tanque medido desde a linha base (m)

 Δ Deslocamento do navio ao calado de projeto (Ton)

 Δ_{LASTRO} Deslocamento na condição de lastro (Ton)

 ∇ Volume de deslocamento ao calado de projeto (m³⁾

 ∇_{ACO} Volume das chapas de aço que conformam a viga-caixão (m³⁾

 ∇_{carga} Volume total da carga (m³⁾

 γ_{AGUA} Peso específico da água salgada (Ton/m³⁾

 γ_{ACO} Peso específico do aço (Ton/m³) γ_{CARGA} Peso específico da carga (Ton/m³)

 $\sigma_{\text{FLEXÃO}}$ Esforço longitudinal de flexão (Ton/m²⁾

1. INTRODUÇÃO

Será feita neste capítulo a contextualização do trabalho, apresentando as principais referências que abordaram o problema de projeto preliminar de navios, indicando a aplicabilidade da metodologia que vai ser proposta com suas limitações. Posteriormente, será apresentada a justificativa do trabalho como os objetivos propostos. Por último, será feita a revisão bibliográfica e uma descrição dos temas tratados no desenvolvimento nesta dissertação.

1.1. Contextualização

As técnicas de otimização aplicada ao projeto de navios têm sido uma área muito pesquisada na engenharia naval, ressaltando os trabalhos feitos por Murphy et al. (1965), Buxton (1966), Moe e Lund (1968), Nowachi e Swift (1970), Thomas (1998), Shakak (1998) e Brown (2000). A necessidade de escolher um conjunto de parâmetros que definam corretamente o projeto, que sejam compatíveis entre eles, torna o processo iterativo e complexo, devido à forte relação não linear entre as variáveis e a não continuidade do espaço de busca, visto que as soluções devem satisfazer os diferentes tipos de restrições impostas no projeto.

Na literatura disponível existem muitos projetos na área de otimização, começando na década de 60, abordando temas diversos, desde as dimensões principais, passando pela capacidade de carga, formas das balizas, estruturas, resistência ao avanço, propulsão, comportamento no mar, até os custos de construção e operação ou frete requerido. Uma grande parte dos trabalhos desenvolvidos restringiu-se ao uso de uma só função de mérito, devido às limitações tecnológicas e dos algoritmos criados para a resolução de problemas de otimização. Mandel e Leopold (1966) descreveram os métodos desenvolvidos até essa data e os aplicaram ao projeto de navios mercantes.

Nas últimas duas décadas, com o surgimento de novas técnicas de otimização, tal como a Computação Evolucionária (Castro 2001), passou a ser viável a consideração de mais de uma função de mérito no processo de otimização, sendo possível analisar melhor o comportamento dos sistemas que devem ser projetados. A técnica Multi-Objetivo teve sua origem na década de 50 e é usualmente atribuída a Kuth e Tocker, de acordo com Thomas (1998). Os métodos evolucionários são uma generalização da técnica dos algoritmos genéticos, que foi criada por Holland em 1975 e que durante os anos tem sido modificada e melhorada, incorporando operadores que aprimoram o desempenho deste tipo de algoritmo. Shahak (1998) foi o pioneiro a utilizá-la na área de projeto de navios, porém o seu trabalho foi limitado a uma só função de mérito. Thomas (1998) foi o primeiro a construir um algoritmo multiobjetivo e utilizá-lo na área naval. Ele levou em consideração o conceito da fronteira de Pareto para obter as soluções não dominadas do problema em termos do volume do casco útil e a eficiência propulsiva, com a intenção de pesquisar a viabilidade do, assim chamado, submersível de "popa cheia" (Full Stern). A definição formal da fronteira de Pareto será apresentada no capítulo 3 deste trabalho.

Este trabalho se insere na área de otimização de projetos e analisa o impacto econômico e a conseqüência do espalhamento de óleo em função da seleção preliminar das dimensões principais de um navio novo, destinado ao transporte de petróleo ou seus derivados. O trabalho é desenvolvido com a finalidade de criar um procedimento racional, que ajude o engenheiro na fase preliminar de projeto na escolha das dimensões principais, que minimizam as funções de mérito escolhidas em um problema específico. Tem-se uma visão sistêmica do problema, isto é, considerando os diferentes subsistemas que compõem o sistema analisado e o impacto que cada um deles sofre com uma mudança de qualquer outro subsistema componente.

Este trabalho apresenta uma metodologia e a implementa em uma ferramenta computacional, sendo possível incluir quantos objetivos sejam necessários na composição da função de mérito e a quantidade de variáveis independentes não tem limitações em número. As restrições funcionais presentes em todo

problema de otimização podem ser impostas, sejam estas lineares ou não lineares, de igualdade ou desigualdade. O algoritmo implementado foi capaz de resolver eficientemente funções de teste cujo espaço de busca é convexo, não convexo e descontínuo. No presente trabalho usam-se duas métricas para avaliar cada possível navio que resulta do processo de otimização, descritas a seguir:

- Custo total formado pelo custo de construção mais o custo de operação na vida útil do navio;
- Vazamento médio de óleo dada a ocorrência de encalhe ou colisão acidental do navio

Relações empíricas, estatísticas, racionais e de regressão são utilizadas no processo para estimar pesos e centros, resistência ao avanço, capacidades, custos e vazamento de óleo. A validade dos resultados obtidos dependerá diretamente da qualidade destas estimativas. Portanto, as limitações na aplicação do processo estudado são impostas pela faixa de validade das formulações empregadas no processo de balanceamento de cada navio. O modelo está limitado a navios tanques de "grande" porte ou "grande" capacidade de carga, isto é, navios petroleiros com porte bruto entre 70 e 180 mil toneladas Situações de projeto que precisem de extrapolações não devem consideradas sem análises adicionais que validem possíveis ser inconsistências nos resultados obtidos.

1.1 Justificativa do trabalho

Um procedimento que ajude na elaboração de projetos preliminares de forma rápida e confiável é muito importante e indispensável. No mercado profissional existem várias ferramentas computacionais utilizadas na elaboração dos projetos preliminares de navios, tais como AutoCAD, FastShip, SHCP, NavCad, GHS, SAP, Maestro, Algor, Nastran, ShipWeight, entre outros, sendo todas ferramentas de análise e não de síntese. Mas, pela complexidade que tem esse tipo de projeto, o tempo requerido para obter um projeto ótimo é muitas

vezes proibitivo, não levando em conta um procedimento adequado de síntese. Além disso, o custo de um novo projeto está ligado fortemente à escolha das características principais do navio (LWL, B, D, C_B, SHP¹), sendo que a obtenção de valores ótimos das variáveis de projeto em um estágio inicial do projeto é fundamental para obter uma proposta econômica. Reed (1976) ressalta a importância de realizar estudos de viabilidade no projeto conceitual para avaliar diferentes opções e obter um conjunto ótimo de características, a partir da comparação de várias alternativas analisadas, procedimento que se torna "fácil" com a ajuda dos computadores digitais, sendo este procedimento utilizado com este propósito desde o início dos anos 60. Murphy et al. (1965) usa esta metodologia na obtenção do navio ótimo que apresenta o menor preço comparando uma família de 1024 navios.

Portanto, a elaboração de um procedimento de síntese e sua implementação em uma ferramenta computacional eficiente que ajude o projetista na tomada de decisões é vital no processo de dimensionamento preliminar de um navio novo. Esta dissertação constitui um aporte para a divulgação da técnica dos algoritmos evolucionários como técnica eficiente e eficaz no projeto de navios.

1.2 Objetivos

O objetivo desta pesquisa é a apresentação de uma metodologia e sua implementação em uma ferramenta computacional eficiente que ajude na otimização dos projetos preliminares de navios petroleiros, tendo como função de mérito o custo total de operação e construção e o vazamento médio de óleo devido à ocorrência de um evento de encalhe ou colisão.

Para a apresentação da metodologia e posterior implementação, os seguintes tópicos serão abordados:

_

¹ Variáveis definidas no capítulo 2 e apresentadas na lista de símbolos ao início do trabalho.

 Avaliação de modelos de regressão e/ou racionais disponíveis na literatura para estimar as dimensões principais, resistência ao avanço, peso do casco, casaria e Outfit, espaço disponível para o carregamento e as características funcionais, tais como estabilidade transversal na condição de lastro e carregada, velocidade de operação, etc.;

- Avaliação, comparação, seleção e implementação de modelos para a estimativa de peso da embarcação;
- Proposição, validação e implementação de um modelo para balanceamento, em peso e espaço disponível para carga, dos navios gerados em cada uma das iterações durante o procedimento de otimização;
- Apresentação e implementação do modelo não determinístico submetido pela INTERTANKO² à IMO³ (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF INDEPENDENT TANKER OWNERS, 2002) para estimar o vazamento médio de óleo para navios tanque, dada a ocorrência de colisão ou encalhe;
- Avaliação, comparação, seleção e implementação de modelos de custo de construção e operação;
- Apresentação e implementação de um algoritmo evolucionário para obter a fronteira ótima de Pareto do problema em estudo.

Para a validação do procedimento apresentado serão comparadas as características principais de três navios que estão atualmente operando, com os valores obtidos pelo procedimento implementado. Cardoso (2006) descreve o trabalho operativo da frota nacional de Petroleiro da Transpetro (Ataulfo Alves, Cartola, Xtena Spirit entre outros) e mostra as características principais desses navios. Um deles, o Ataulfo Alves (Suezmax) foi escolhidos para avaliar o procedimento elaborado e a implementação realizada. Os outros dois navios, o Aframax Tatina e o Panamax Pride, empregados na análise comparativa

_

² International Association of Independent Tanker Owners

³ International Maritime Organization

pertencem ao grupo Hellspont, que está dedica ao serviço de transporte oceânico há mais de 60 anos.

1.3 Revisão Bibliográfica

Esta pesquisa começa analisando os sistemas e subsistemas presentes em um navio, suas ligações e dependências, apresentando o conceito de visão sistêmica. O corpo principal teórico está focalizado nos capítulos 2 e 3, onde será estudado o projeto de navios e o método de otimização empregado.

Há muitos artigos disponíveis na literatura técnica relacionados a projeto preliminar de navios que apresentam diferentes tipos de abordagens. As referências descritas a seguir serão utilizadas para a abordagem do projeto preliminar de navios.

Evans (1959) introduz a idéia da espiral de projeto, que foi uma tentativa de criar uma metodologia para o projeto global do navio, sendo ele concebido como um processo racional na geração integral de um projeto novo. O objetivo principal foi organizar o trabalho em forma lógica e seqüencial, incrementando o nível de detalhe dos subsistemas componentes do navio em cada volta da espiral, melhorando o procedimento de busca da solução ótima e, ao mesmo tempo, automatizando o processo de projeto. Esta metodologia foi aceita pela maioria dos projetistas navais que acrescentaram algumas características adicionais às apresentadas originalmente. Um problema ou limitação desta metodologia é que ela não garante que os valores finais sejam ótimos.

Watson e Gilfillan (1976) e Lamb (1969) descrevem o processo de projeto aplicado a navios e apresentam metodologias sistemáticas para a seleção das dimensões principais para diferentes tipos de navio. Os procedimentos de projeto apresentados nesses trabalhos estão baseados nas relações funcionais e dimensionais do navio, obtidos da recopilação de dados de navios similares existentes e apresentados em forma de gráficos para agilizar o projeto. Neste

sentido, Watson (1998) e Schneekluth (1998) apresentam excelentes trabalhos baseados na experiência deles como projetistas em estaleiros no Reino Unido e Alemanha, respectivamente. Eles apresentam as relações entre as diferentes dimensões principais do navio e seus efeitos no que diz respeito à estabilidade, resistência estrutural, propulsão, comportamento no mar, etc.

O peso e o custo de navios estão fortemente ligados, sendo possível a estimativa preliminar dos custos em função do peso do sistema que está sendo analisado. Desta forma todos os trabalhos consultados — Johnson e Rumble (1965), Moe e Lund (1968), Carreyete (1977), Gray (1987), Watson (1998), entre outros - expressam o custo de um determinado grupo de navios como dependente do peso. O deslocamento total de um navio é a soma do peso leve mais o peso morto total, sendo o peso leve do navio o peso do casco, maquinaria e Outfit⁴.

Outra forma muito útil de classificar e estimar os itens que formam o peso do navio consiste em utilizar o SWBS⁵ implementado pela marinha dos Estados Unidos da América. Esse sistema foi desenvolvido para fornecer aos estaleiros e companhias envolvidas na gestão de navios, ferramentas para apoiar as atividades de estimativa de custos de construção. Um sistema similar de classificação foi criado pelo Ship Research Institute da Noruega chamado de SFI. Esta forma de classificação subdivide o projeto em pacotes de trabalho, componentes ou tarefas que representam o trabalho total a ser realizado para obter os objetivos finais do projeto, facilitando o entendimento e a administração de sistemas grandes e complexos, simplificando o problema. A administração marítima dos Estados Unidos de America (MARAD) utiliza uma classificação simples do peso, considerando duas parcelas principais (peso morto total e peso leve), para depois decompô-las em peso do casco e superestrutura, peso do sistema propulsor e peso do Outfit e nas diferentes

⁴Nomenclatura empregada para agrupar diferentes pesos presentes no navio, tais como: tubulações, acomodações, maquinaria, auxiliar, equipamento elétrico e eletrônico, equipamento do convés, etc.

⁵ Ship Work Breakdown Structure

parcelas constitutivas que formam o peso morto total (peso da carga, peso da tripulação e consumíveis).

A área de otimização tem evoluído muito com o passar dos anos, graças ao grande avanço na capacidade de análise dos computadores. O processamento em paralelo tem contribuído para que os pesquisadores invistam seus esforços para criar algoritmos numéricos capazes de resolver problemas não lineares, não contínuos, com restrições, multidisciplinares, multiobjetivo e multidimensionais nas diferentes áreas da engenharia, onde não é possível a aplicação dos métodos tradicionais que usam derivadas da função objetivo.

Murphy et al. (1965) desenvolveram um processo sistemático utilizando técnicas computacionais para determinar a combinação ótima de comprimento, boca, calado, coeficiente de bloco e pontal para satisfazer um predeterminado custo para um navio de carga seca. Este foi um dos primeiros trabalhos na área naval que analisou de forma sistemática e racional uma série de opções de projeto com diferentes características. A idéia foi permutar cinco parâmetros de projeto $\left(\Delta, C_B, \frac{B}{T}, \frac{V}{\sqrt{LWL}}, \frac{LWL}{D}\right)$ para criar famílias de navios, de onde foi escolhido o navio de menor custo. O trabalho apresenta um gráfico dos custos do aço, Outfit, maquinaria e combustível para cinco formas extremas de navios, isto é, um navio de forma "Comprido e Estreito", "Largo e Esbelto", "Convencional", "Pequeno e Alto" e "Pequeno e Cheio" de acordo a

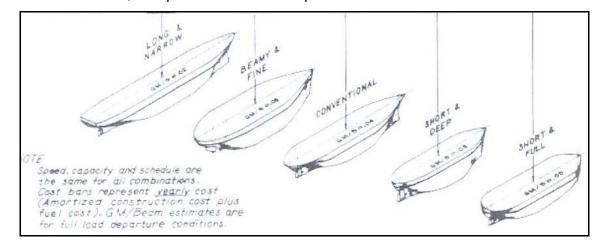


Figura 1.1: Diferentes formas do casco para avaliar a influência no custo de construção e operação (MURPHY et al. (1965)).

Quando os custos de construção são considerados, o navio "pequeno e alto" é o menos custoso. Mas quando os custos do combustível são incluídos, o navio de forma "Comprido - Estreito" tem o menor custo. Quando um critério de estabilidade transversal foi aplicado, a forma convencional foi a melhor opção. Um estudo mais profundo mostrou que uma combinação das formas "Largo e Esbelto" e "Pequeno e Alto" representou o navio com menor custo. A sugestão desse trabalho foi que a seleção das dimensões ótimas, com um nível de incerteza, não pode ser feita sem ter realizado uma procura compreensiva e sistemática.

Nowacki e Swift (1970) mostram que o projeto preliminar de um navio é, de forma geral, um problema de otimização não linear com restrições, onde na função de mérito, usualmente algum critério econômico, e suas restrições são funções não lineares das variáveis do projeto. As variáveis que escolheram foram $\frac{V}{\sqrt{L}}, \frac{B}{T}, \frac{LWL}{B}, C_B, \frac{LWL}{D}$. Eles utilizaram o método SUMT (Sequential

Unconstrained Minimization) para otimizar as dimensões de um navio tanque, incorporando restrições funcionais de borda livre, estabilidade transversal mínima e máxima na condição carregada, resistência longitudinal e período de balanço. Apresentaram vários gráficos com os contornos da função de mérito e as restrições de projeto para diferentes relações de $\frac{V}{\sqrt{L}}$ mantendo as demais variáveis constantes para mostrar o comportamento da procura e a influência das penalidades envolvidas. As principais limitações foram a falta de dados relacionados à potência e pesos.

Shahak (1998) em seu trabalho de mestrado pesquisou a combinação ideal de variáveis em um algoritmo evolutivo. Analisou o impacto de várias opções propostas para os operadores de seleção, cruzamento, mutação e o efeito das restrições na obtenção do valor ótimo. Para problemas com uma função de mérito introduziu indicadores de desempenho do algoritmo, tais como o centro de seleção e a variância média. Finalmente, recomendou uma busca final local

na vizinhança, tomando como ponto de partida o encontrado pelo algoritmo genético.

Quanto à otimização multiobjetivo, este tópico tem despertado muito interesse nos pesquisadores ao longo dos anos e se convertido em uma popular área de pesquisa. Vários algoritmos têm sido desenvolvidos e publicados na literatura técnica. A principal técnica empregada é a Computação Evolucionária, sendo a idéia central evoluir um conjunto de indivíduos, chamado de população, até a fronteira ótima de Pareto, usando modelos de seleção natural, reprodução e mutação.

A solução ótima de Pareto é uma solução na fronteira não dominada que satisfaz as restrições, tal que um objetivo não pode ser melhorado sem uma correspondente diminuição do valor de outro objetivo. O conjunto de soluções é freqüentemente referido como a fronteira ótima de Pareto. Castro (2001) justifica, segundo dois pontos de vista, a utilização da computação evolucionária: o filosófico e o prático. Filosófico: já que é o método utilizado pela natureza pode ser considerado "perfeito". Prático: resolve problemas muito complexos de modo simples e é de fácil adaptação com outras técnicas.

Brown (2000) propõe uma metodologia de projeto que inclui três componentes necessárias para obter uma aproximação sistemática do projeto conceitual do navio:

- Procurar eficientemente e efetivamente no espaço de projeto;
- Uma correta definição e quantificação dos objetivos;
- Um formato eficiente para descrever o espaço de projeto e apresentar o conceito de dominância para uma seleção racional do cliente.

Brown também implementou um algoritmo genético para identificar a fronteira não dominada baseado no custo total e no risco de vazamento de óleo.

1.4 Organização do trabalho

A dissertação tem dois tópicos distintos, mas conectados: otimização multiobjetivo e projeto preliminar de navios. No capítulo 2 é descrito o processo empregado no projeto para se definir preliminarmente um navio. Utilizam-se diferentes modelos matemáticos racionais clássicos e de regressões de navios similares, muito utilizado na engenharia naval para definir um candidato no processo de balanceamento. Este capítulo tem como finalidade mostrar em detalhe o processo de geração de cada navio durante a otimização, além de prover uma descrição detalhada das principais regressões propostas para estimar as dimensões principais, os coeficientes de forma, pesos e centros para navios petroleiros, estimativa dos custos de construção e operação e vazamento médio de óleo dada a ocorrência de encalhe ou colisão.

Em seguida, no capítulo 3 se descreve os principais conceitos dos métodos de otimização empregados na engenharia naval, tais como método de Hooke & Jeekes e Procura Direita. Depois, são descritos em detalhes os algoritmos genéticos, seu campo de aplicação. Diferentes variantes implementadas (tipo de seleção, operador de cruzamento) ao algoritmo original são analisadas, operadores genéticos, vantagem e desvantagem do uso desta técnica e a inclusão de restrições. Finalmente, o algoritmo implementado é descrito e se apresentam os resultados da validação feita da ferramenta construída empregando 4 funções de teste.

O capítulo 4 descreve o procedimento para o projeto otimizado. É modificado e melhorado o modelo proposto por Reed (1976) para balancear cada navio. Inclui-se o pontal no processo de balanceamento como restrição para garantir que a carga imposta seja transportada. Assim o procedimento é validado para navios de peso e de volume. Além disso, são definidas as funções de mérito empregadas e a validade de cada uma delas. O modelo de custo é escolhido entre três opções e o modelo de peso do aço entre cinco disponíveis na literatura. Assim também, apresentam-se os estudos casos de escolhidos para validar a metodologia proposta.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações do trabalho.

2. PROJETO DE NAVIOS

Neste capítulo são descritos detalhadamente diferentes modelos paramétricos úteis para o projeto preliminar de um novo projeto de um navio petroleiro. O capítulo começa com uma introdução sucinta da metodologia de solução de projetos de engenharia, chegando a apresentar a espiral de projeto típica empregada em projetos navais. Posterior a isto é feita a descrição das variáveis de projeto escolhidas para representar o navio, bem como os requisitos e restrições impostas ao projeto. Em seguida são detalhados os modelos paramétricos que definem a geometria do navio, altura total da casaria do convés, número de tripulantes necessário para operar o navio, estimativa da resistência ao avanço e escolha do motor principal, cálculo de pesos dos diferentes itens que constituem o navio e seus respectivos centros verticais de gravidade, cálculo da estabilidade transversal inicial na condição de lastro e carregada. Finalmente, para fechar o capítulo, são apresentadas as metodologias empregadas para o cálculo dos custos e do vazamento médio de óleo.

2.1. Projeto Preliminar de Navios

O projeto de navios é um problema muito complexo que, influenciado por uma grande quantidade de variáveis e indeterminada influência de cada variável nas demais, força o projetista a manter em mente todas as possíveis conseqüências da seleção de um conjunto de parâmetros no comportamento final do navio. Quando o projetista sintetiza o conceito do navio, dimensões principais e seu comportamento, satisfazendo os requisitos do projeto e suas restrições - físicas, legais, naturais, políticas, econômicas - reduzirá de forma significativa o esforço e o tempo total para realizar um projeto final.

Todo projeto de engenharia é um processo cíclico, isto é, para obter o produto final é necessário realizar várias etapas de análise, síntese e avaliação. O

processo de solução de um problema pode ser esquematizado da seguinte maneira:

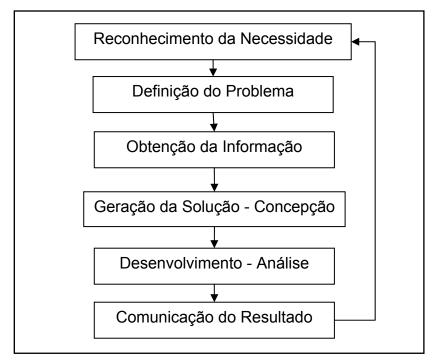


Figura 2.1: Processo de solução de um problema (NISHIMOTO, 2006).

Por outro lado, um navio é formado por um conjunto de sistemas interligados uns aos outros, que muitas vezes têm características conflitantes, sendo necessário realizar um balanço para escolher a melhor opção. Por exemplo, uma popa com muita curvatura (Cruiser Stern) é difícil de produzir — pois necessita de muito trabalho - mas é eficiente já que reduz a resistência total e, portanto, o navio requer uma menor potência propulsora já que menos energia é gasta na geração de ondas. Já uma popa plana (Transom Stern) é fácil de produzir — envolve pouco trabalho — mas é pouco eficiente, consumindo o navio maior quantidade de energia para se movimentar. A Figura 2.2 apresenta esses dois tipos de popa.

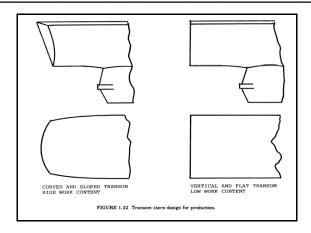


Figura 2.2: Tipos de popa (LAMB 1986).

Outros casos onde, freqüentemente, é necessário o balanceamento das variáveis podem ser citados, por exemplo, o balanço entre as características que definem a velocidade de resposta do navio no movimento de jogo e o conforto da tripulação; a seleção das balizas - tipo V em um extremo e tipo U no outro – para obter determinado desempenho no comportamento no mar considerando uma determinada potência instalada.

Uma análise total do sistema não é usualmente possível e a solução deve ser dividida em partes para encontrar uma solução viável e, para tanto, o projetista deve ter uma visão sistêmica do problema que está sendo resolvido. A visão sistêmica pode ser definida como "habilidade de um indivíduo (Engenheiro) em obter soluções para um sistema (problema), integrando vários subsistemas e funcionalidades que compõem este sistema" (NISHIMOTO, 2006). A visão sistêmica é formada a partir do conhecimento do conceito e das características dos subsistemas componentes. Tendo um conhecimento do todo, de modo a permitir a análise ou a identificação de interferências entre os diferentes componentes, é possível a obtenção de um produto final confiável.

A espiral de projeto é o resultado da integração dos diferentes sistemas componentes do navio de uma maneira sistemática, sendo a ordem lógica dos itens na espiral dependente da interferência e dependência que tem cada subsistema com os demais, motivo pelo qual a montagem da espiral de projeto

pode ser considerada como uma forma de treinar a habilidade de ter uma visão sistêmica segundo Nishimoto (2006).

Murphy R.D et al. (1965) apresentam um excelente exemplo da típica espiral de projeto, onde estão marcados em cada volta da espiral os tipos de análise que devem ser feitas para cada subsistema componente que compõem o navio, isto é, se a característica deve ser selecionada, calculada, corrigida, ajustada ou estimada. Na seguinte figura, mostra-se a proposta preliminar da espiral de projeto segundo Murphy R.D et al.

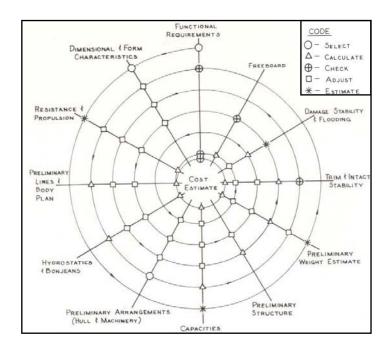


Figura 2.3: Espiral de projeto (MURPHY R. D et al., (1965)).

Portanto, reconhece-se a necessidade de criar um procedimento racional de projeto, integrando os diferentes sistemas componentes do navio que está sendo objeto de estudo representado por modelos paramétricos, para obter uma solução confiável e viável que satisfaça todos os requisitos de projeto nele impostos. A seguir apresentam-se as variáveis de projeto usadas na representação de um navio petroleiro.

2.2. Representação do Navio

Na modelagem do navio é necessário, de forma preliminar, definir os seguintes subsistemas:

- Geometria do casco;
- Espaço disponível de carga e sua distribuição;
- Estrutura e Superestrutura;
- Sistema de Propulsão;
- Sistema Elétrico e Auxiliar.

Watson (1998) e Parson (2003) explicam o efeito das relações entre as dimensões principais na estabilidade, resistência ao avanço e resistência estrutural do navio. Parâmetros de arquitetura naval são definidos em Lewis (1988) e não serão discutidos neste trabalho. Por exemplo, a razão entre a Boca e o Calado está fortemente ligada à estabilidade, uma vez que a posição vertical do centro de gravidade é função do pontal e a altura do metacentro⁶ é fortemente proporcional a boca, assim como a razão entre o comprimento e o pontal está fortemente ligada à resistência estrutural do navio. Por conseguinte, para definir a geometria do casco do navio foram escolhidas as seguintes relações como representativas:

- LWL/B (Comprimento / Boca);
- B/T (Boca / Calado);
- C_B (Coeficiente de Bloco);
- N_{POPA} (Tipo de popa).

As três primeiras variáveis definem a geometria inicial do navio (comprimento, largura, altura, formas cheias ou finas). A última variável, N_{POPA}, permitirá incluir na metodologia de projeto uma exploração da eficiência no uso de combustível

⁶Ponto cuja posição define a estabilidade dos corpos flutuantes e que está definido pela interseção de uma linha vertical que passa pelo de centro de flutuação do navio na posição de equilíbrio com a linha que passa pelo novo ponto de flutuação quando o navio sofre uma

inclinação transversal (banda).

versus os custos de produção para duas alternativas da forma do corpo da popa selecionadas.

Atualmente existem várias restrições que limitam o projeto de embarcações petroleiras, objetivando-se um nível de segurança adequado ao transporte de produtos perigosos. Desta forma, é necessário incluir entre as variáveis independentes do projeto a altura do duplo fundo (h_{db}), largura do duplo costado (w) e o número de divisões transversais no espaço de carga (N_{cargo}), para ter em conta o efeito de cada uma delas no dimensionamento preliminar de navios petroleiros. Além disso, deve ser considerada a presença ou não de uma antepara longitudinal no espaço de carga. Geralmente em navios petroleiros com comprimento maior de 100 m é comum utilizar uma antepara longitudinal na área de carga enquanto que para navios menores esta prática não é utilizada. Logo, como as equações empregadas neste trabalho são, de uma forma geral, válidas para navios de "grande" porte é incluído no arranjo geral do espaço de carga uma antepara longitudinal.

No que diz respeito ao sistema de propulsão será considerada uma variável no processo de otimização para ter controle na estimativa deste sistema. O parâmetro P_{systyp} é empregado para escolher o número de motores principais a serem instalados a bordo.

Considerando o trabalho feito por Brown (2000), uma variável (ManFac⁷) que controla a quantidade de tripulantes foi incluída no processo. A quantificação do número de tripulantes necessários para operar com segurança um navio petroleiro depende fortemente do nível de automatização do navio. Um navio muito automatizado custa muito, esperando-se que tenha um baixo risco de vazamento de óleo. Em contraposição, um navio com baixo nível de automatização tem um baixo custo, porém espera-se que tenha um alto risco de vazamento de óleo.

-

⁷ Termo que vem de "man factor"

Por último, uma variável que controla a altura entre cada deck da casaria (H_{DK}) foi considerada para levar em conta a influência do peso da casaria, bem como analisar diferentes configurações possíveis.

Em resumo, para representar matematicamente cada navio foram utilizados 10 parâmetros, como segue abaixo:

- 1. LWL/B (C_{LB});
- 2. B/T (C_{BT});
- 3. C_B;
- 4. N_{POPA}
- 5. h_{db};
- 6. w;
- 7. N_{CARGO};
- 8. P_{systyp};
- 9. ManFac:
- 10. H_{DK} .

Os três primeiros coeficientes definem o casco do navio; o quarto parâmetro define o tipo de popa a ser construída, que influenciará a eficiência propulsiva do navio; os três seguintes definem o espaço de carga; o oitavo está ligado ao sistema de propulsão, o nono parâmetro ao nível de automatização do navio e o décimo define a altura entre cada deck da casaria. Consideram-se essas variáveis como suficientes para definir preliminarmente cada navio. A seguir serão expostos os requisitos e restrições de projeto considerados nesta pesquisa.

2.3. Requisitos e Restrições do Projeto

Todo novo projeto é desenvolvido satisfazendo certos requisitos, que são impostos pelo cliente que deseja o produto final. Além disso, existem certas restrições ou limitações de diferentes tipos que devem ser consideradas no momento do projeto. Os requisitos de projeto de navios mercantes são

usualmente obtidos de uma análise econômica feita no mercado alvo. Quando estão sendo impostos requisitos sob o projeto é recomendável diferenciar entre aqueles que são essenciais dos que são desejáveis e podem ser modificados se o preço para obtê-los for muito alto.

Segundo Watson (1998), os principais requisitos que devem ser estabelecidos para um navio mercante são:

- 1. Tipo de navio e quantidade total de carga a ser transportada;
- 2. Velocidade de serviço, rota e distância da viagem.

O tipo de navio é definido pelo tipo de carga e o modo de manipulação da mesma, enquanto a quantidade de carga a ser carregada define o tamanho do navio. Neste trabalho foram considerados os seguintes itens como requisitos dados pelo armador:

- Navio tipo Petroleiro;
- Peso morto total a ser transportado (DWT_{TOTAL}, Ton);
- $\bullet \quad \text{Peso específico da carga} \left(\gamma_{\text{CARGA}}, \frac{Ton}{m^3} \right) ;$
- Velocidade de operação (V, nós);
- Distância da viagem (E, milhas náuticas);

Diferentes tipos de restrições podem ser impostos a um novo projeto, tais como de meio ambiente, legais, econômicas, construtivas, geométricas. As restrições na geometria do navio — Comprimento, Boca, Calado - são impostas geralmente pelas possíveis condições de operação ou manutenção do mesmo, isto é, a necessidade de passar por um determinado canal ou ingresso a um porto. Duas importantes restrições nas dimensões do navio são mostradas a seguir:

Tabela 1 - Restrições de projeto nas dimensões principais do navio (WATSON, 1998).

Nome	Comprimento Máx. (m)	Boca Max. (m)		Calado Máx (m).	Altura acima do Calado (m)
Canal de Panamá.	294,1	32.31		12.04	57.91
Canal de	Não tem	74	&	11	Não tem
Suez	Suez		α	17	INDU (CIII

As restrições geométricas impostas neste trabalho foram as necessárias para delimitar em faixas aceitáveis – correspondentes a navios petroleiros – cada variável escolhida para representar um navio, como descrito anteriormente. Watson (1998) apresenta as dimensões principais de diferentes tipos de navios petroleiros obtidos da base de dados da Lloyd Register of Shipping (LRS), publicado anualmente. A tabela que segue resume as características principais relativas a 21 navios petroleiros compilados pela sociedade LRS, considerados como representativos para os navios objeto de estudo, que foram construídos de 1988 até 2006.

Tabela 2 - Dimensões principais de navios petroleiros (WATSON, 1998; CEGEN, 2008).

#	Nome	L	В	D	Т	Ts	Св	Δ	DWT	DWT/ A	V	Fn	L/B	В/Т	D/T	L/D
#	Nome	m	m	m	m	m	CB	Ton	Ton	DW1/A	nós	FII	L/D	D/ I	ו /ט	LID
1	Bunga Siantan	133	22,4	11,8		9,1	0,779	21739	16294	0,75	13,5	0,1921	5,94	2,46	1,30	11,27
2	B.P Admiral	169	30,8	17	10	11,5	0,762	40866	33000	0,81	14	0,17673	5,49	3,08	1,70	9,94
3	Australia Sky	171	26,8	16,4	10,67		0,804	40492	33239	0,82	14,75	0,18511	6,38	2,51	1,54	10,43
4	Guangzhou	182,86	27,42	16,8	11,617		0,8043	48020,4	38500	0,802			6,67	2,36	1,45	10,88
5	Fandango	173	32,2	17,8		12,3	0,805	56583	46087	0,81	14,5	0,18091	5,37	2,63	1,45	9,72
6	Zafra	218,7	32,24	21,6	11,58	16	0,823	69200	54000	0,78	14,4	0,1598	6,78	2,78	1,87	10,13
7	Asopos	213,36	32,26	18,5	11,28			73528,6	61000	0,83			6,61	2,86	1,64	11,53
8	Achilles	215,02	32,2	18,3	13,2		0,829	78031	63800	0,82	14,5	0,16228	6,68	2,44	1,39	11,75
9	Fr8 Venture	228,6	32,26	20,8	14,48		0,8071	88340,4	74065	0,838			7,09	2,23	1,44	10,99
10	Olympic Ser.	222,12	42	20,3	14,2		0,835	113948	96733	0,85	14	0,15416	5,29	2,96	1,43	10,94
11	Samsung 1592	249,97	43,8	21,3	14,9		0,7951	132957	113420	0,853			5,71	2,94	1,43	11,74
12	Arabiyah	242,19	43,28	23,8	15,62		0,845	142529	121109	0,85	13	0,13709	5,60	2,77	1,52	10,18
13	Jhare Traveller	260	44,5	24,2	15,6	16,6	0,818	152000	131000	0,86	14	0,14249	5,84	2,85	1,55	10,74
14	Polar Enterprise	272,7	46,2	25,3	16,31		0,7837	165062	141739	0,859			5,90	2,83	1,55	10,78
15	Golar Coleen	256,01	46,21	23,8	17,02		0,842	174566	152385	0,87	14	0,14359	5,54	2,72	1,40	10,74
16	Navigator	264	50	23,1	16		0,8822	190980	164600	0,862			5,28	3,13	1,44	11,43
17	Columbia	313	56,6	28,6	19,44		0,849	301000	258076	0,86	14	0,12986	5,53	2,91	1,47	10,94
18	Universal Ariake 042	333	60	29,7	21,5		0,778	342556	298300	0,871			5,55	2,79	1,38	11,21
19	Dalian New T3000-8	332,95	58	31	22,3		0,7804	344483	300000	0,871			5,74	2,60	1,39	10,74
20	Golar Cordelia	315,02	57,21	30,4	22,03		0,849	347078	304622	0,88	14	0,12945	5,51	2,60	1,38	10,36
21	Argo electra	315	57,2	30,4		20,8	0,828	285000			14	0,12945	5,51	2,75	1,46	10,36

As faixas limites dos parâmetros escolhidos para representar o casco do navio, tendo como referência os valores mostrados na Tabela 2 são as seguintes:

• $2 \le C_{BT} \le 4$

(Boca/Calado)

 $\bullet \quad 5 \le C_{\text{LB}} \le 7$

(Comprimento/Boca)

• $2 \le C_{BT} \le 4$

(Coeficiente de Bloco)

Para a variável escolhida para representar o tipo de popa do navio, serão avaliadas duas possibilidades. Uma primeira alternativa — $N_{POPA} = 1$ - associada a uma forma da popa que é fácil de produzir, com baixo custo de construção, mas com baixa eficiência propulsiva que implica um alto consumo de combustível. A segunda opção, $N_{POPA} = 2$, é uma alternativa com uma popa difícil de produzir com alto custo de construção, mas com boa eficiência propulsiva, portanto, com menor consumo de combustível. Resumindo, tem-se:

•
$$N_{POPA} = 1$$
 ou $N_{POPA} = 2$ (Forma da Popa)

A IMO (International Maritime Organization) regula os valores limites da altura do fundo e do duplo costado, garantindo que o espaço seja o suficiente para possibilitar a realização da manutenção devida. Segundo a IMO, a altura do duplo fundo deve ser superior ao menor valor entre 2 m e B/20, fixando um valor mínimo de 1 m. A largura do duplo costado deve ser superior ao menor valor entre 2 m ou $\left(0.5 + \frac{\nabla_{\text{carga}}}{20000}\right)$, fixando um valor mínimo de 1m (IMO 2005).

Para o número de divisões transversais no espaço de carga não existe um valor mínimo, nem máximo, impostos pelos organismos de controle marítimo para embarcações petroleiras, sendo essa variável geralmente escolhida pelo projetista em função da experiência. A faixa de valores escolhidos nesta pesquisa são as mesmas empregadas por Mish et al. (2000). As restrições para os parâmetros que definem a geometria do espaço de carga foram definidas como segue:

•
$$1 \le h_{db}(m) \le 4$$
 (Alto Duplo Fundo)

•
$$1 \le w(m) \le 4$$
 (Largo Duplo Costado)

• $4 \le N_{\text{CARGO}} \le 8$ (Número de divisões transversais no espaço de carga)

Assim também, foram consideradas duas possíveis alternativas para o número de motores a serem instalados no navio. A primeira opção é um navio com um só motor principal, enquanto a outra representa um navio com dois motores que fornecerão os requisitos de potência. Logo, o valor possível da variável número de motores é:

•
$$P_{SYSTYP} = 1$$
 ou $P_{SYSTYP} = 2$ (Número de Motores Principais)

A variável contínua ManFac que controlará o nível de automatização do navio está limitada em uma faixa de 0.5 até 1, sendo o valor de 0.5 para um navio muito automatizado e 1 para um navio com pouca automatização.

No subcapítulo 2.6 será apresentado o modelo paramétrico que estimará o número de tripulantes necessários para operar o navio, valor que multiplicado por ManFac dirá o número final de tripulantes.

Finalmente, para a variável que controla a altura entre cada deck da casaria foi escolhida uma faixa de 2 até 3 metros.

•
$$2 \le H_{DK}(m) \le 3$$
 (Altura entre cada deck da casaria)

A seguir, apresentam-se em seqüência os diferentes modelos paramétricos usados nesta pesquisa, que definirão em forma preliminar cada navio obtido assim como suas características principais, que serão úteis no momento de calcular a performance de cada navio por meio das funções objetivos escolhidas.

2.4. Determinação das Dimensões Principais e Coeficientes de Forma

Neste item apresenta-se a descrição de como é feito o cálculo das características principais que definem a geometria do casco. Partindo do Princípio de Arquimedes, Watson e Gilfillan (1976), com adequada manipulação algébrica, obtiveram a seguinte expressão para calcular o comprimento do navio:

$$LWL = \left(\frac{\Delta \times \left(\frac{LWL}{B}\right)^2 \times \left(\frac{B}{T}\right)}{\gamma_{AGUA} \times (1+s) \times C_B}\right)^{1/3}$$
(2.1)

onde

 Δ : deslocamento do navio, [Ton];

γ_{AGUA}: peso específico da água salgada, [Ton/m³];

s: coeficiente de apêndices expressado como porcentagem;

C_B: coeficiente de bloco;

B: boca, [m];

T: calado, [m].

LWL: comprimento, [m];

O calado e a boca são calculados usando os parâmetros L/B e B/T escolhidos para representar a geometria do casco. Assim:

$$T = \frac{B}{C_{BT}}$$
 (2.2)

$$B = \frac{LWL}{C_{LB}}$$
 (2.3)

Inicialmente é assumida uma relação entre o Pontal e o Calado igual a 1.2. Esse valor é atualizado posteriormente quando se calcula o espaço de carga disponível no processo de balanceamento do navio. Usa-se o valor da equação (2.2) e a razão $\frac{D}{T}$ assumida para calcular o pontal do navio. No capítulo 4 que se descreve o modelo de síntese desenvolvido neste trabalho se explica em detalhe como é feita a atualização da razão $\frac{D}{T}$.

Considerando que o navio apresenta uma seção mestra cheia, de costado vertical e fundo plano, Parson (2003) propõe a seguinte expressão para estimar o coeficiente da seção mestra:

$$C_x = 1 - \left(\frac{0.4292 \times r^2}{B \times T}\right)$$
 (2.4)

onde

r: raio de curvatura do bojo, [m].

A inferência da equação anterior pode ser feita usando a razão $\left(\frac{A_x}{A^*}\right)$, sendo A_x a área máxima da seção mestra submersa e A^* a área da seção até o calado considerada como um retângulo (BxT) e considerando que $r \ll B$. Considerações a respeito da produção farão o raio do bojo menor ou igual à altura do duplo fundo para facilitar a construção do navio (PARSON, 2004). Portanto, o valor de r utilizado será igual a h_{db} , ficando desta maneira definido o valor do coeficiente da seção mestra empregando as equações (2.2) e (2.3) na equação (2.4).

Na literatura existem várias expressões desenvolvidas para estimar o coeficiente do plano da linha d' água em função do coeficiente prismático longitudinal (C_P) ou coeficiente de bloco (C_B). Parson (2003) apresenta uma tabela com diversas relações mencionando a aplicabilidade de cada equação. A seguinte regressão é utilizada, por ser válida para navios tanques:

$$C_{WL} = \frac{C_{B}}{0.471 + 0.551 \times C_{B}}$$
 (2.5)

onde:

C_B: Coeficiente de bloco

C_{WL}: Coeficiente do plano da linha d' água.

No modelo paramétrico que está sendo descrito vai ser necessário conhecer o valor do coeficiente de bloco até o pontal ou até o 0.8D. Watson (1998) propõe duas expressões empíricas para realizar está estimativa.

Tabela 3 - Estimativas do coeficiente de bloco até o pontal e 80% do pontal (WATSON, 1998).

Descrição	Valor
Coef. de Bloco até o Pontal	$C_{\rm B}^{\rm pontal} = C_{\rm B} + (1-C_{\rm B}) \times \frac{(0.8D - T)}{3T}$
Coef. de Bloco ate 80% do Pontal	$C_{\rm B}^{0.8D} = C_{\rm B} \left[1 + \left(\frac{1}{21} \right) \left(\frac{1 - C_{\rm B}}{C_{\rm B}} \right) \right]$

O valor do coeficiente de bloco até o pontal será necessário para o cálculo do espaço disponível de carga e o valor até 80% do pontal para a estimativa do peso do casco para um dos modelos paramétricos empregados.

2.5. Definição da Casaria do Convés.

Esta característica é estimada considerando os requisitos da MARPOL 73/78 (IMO, 1997) que define o máximo comprimento da área escura da superfície do mar vista desde a cabine de navegação. Este valor deve ser, no máximo, igual a 2LWL ou 500 m, o que for menor. A figura seguinte ilustra esta restrição. Escolhe-se a condição em lastro como mais crítica uma vez que o comprimento da região escura na frente do navio é maior em lastro quando comparada a condição carregada, tornando-se a condição crítica de análise.

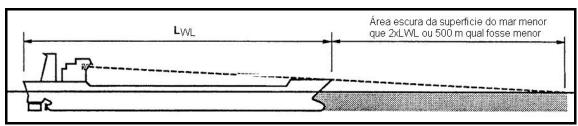


Figura 2.4: Representação da área obscura máxima permitida pela IMO ("Adaptado de IMO, 1997").

Os requisitos da MARPOL 73/78 determinam o mínimo calado na condição de lastro com a seguinte condição:

$$T_m = 2 + 0.02 \times LWL, [m]$$
 (2.6)

Para a definição da casaria, assume-se que a mesma está localizada a partir da posição a $0.85 \times LWL$ a ré da proa. Considere os dois triângulos da Figura 2.5 definidos da seguinte maneira:

- Um vértice na ponte de governo, outro na interseção de uma perpendicular traçada a partir deste vértice com a linha de flutuação e o último vértice na superfície do mar sendo o alvo a ser visto desde a ponte de governo;
- Um vértice na proa e os outros dois vértices definidos como no triângulo anterior.

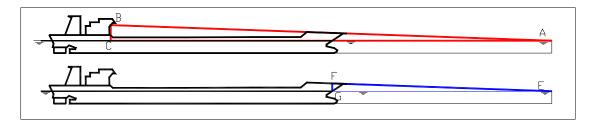


Figura 2.5: Esquema empregado para definir a altura total da casaria.

Utilizando a semelhança entre os triângulos ABC e EFG da figura anterior e considerando que o ponto B da Figura 2.5 está a 1.5 metros⁸ do teto da casaria, chega-se a:

$$Hv = \left(\frac{0.85LWL}{OASS}\right) \times \left(D - T_{m} + H_{DK}\right) + H_{DK} + 1.5$$
 (2.7)

onde

OASS9: 2xLWL ou 500 m,

 H_{DK} : altura entre cada deck na casaria, [m]

Hv : Altura total da casaria, [m]

O número total de decks na casaria é obtido:

⁸Área escura da superfície do mar, correspondente as iniciais em inglês Obscured Area of Superfície Sea

$$N_{DK} = ceil \left(\frac{H_{V}}{H_{DK}} \right)$$
 (2.8)

A função "ceil" retornará o inteiro mais próximo e superior a H_V/H_{DK}.

No próximo item será apresentado o método de cálculo do número de tripulantes necessários para operar o navio.

2.6. Determinação da Tripulação

O número de tripulantes necessários para operar o navio é estimado usando os dados apresentados em Watson (1998). Os dados são representativos para navios petroleiros para uma faixa de peso morto de 3.000 até 320.000 ton. A Figura 2.6 mostra a curva de regressão obtida com base aos dados apresentados por Watson.

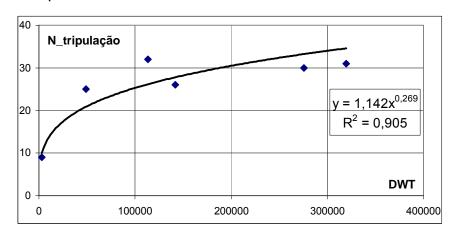


Figura 2.6: Número de Tripulantes em função do Peso Morto do navio.

O valor final do número de tripulantes obtido com a equação de regressão é multiplicado pela variável ManFac para realizar o balanço entre as diferentes opções e características de navios automatizados e não automatizados. A expressão final é mostrada a seguir:

$$N_{TRIPULACÃO} = ManFac \times ceil (1.142 \times DWT_{TOTAL}^{0.269})$$
 (2.9)

onde:

ManFac :variável que controla a automatização do navio;

DWT_{TOTAL}: peso morto total, [Ton].

Em seguida, explica-se a metodologia empregada para o cálculo da resistência ao avanço e potência requerida no eixo para obter a velocidade de projeto imposta como requisito.

2.7. Estimativa da Resistência ao Avanço

A estimativa da resistência ao avanço será realizada utilizando o método de Holtrop (1984), descrito sucintamente neste item. O cálculo é feito para uma faixa de velocidade variando entre 2 nós até 5 nós a mais do que o valor da velocidade de projeto imposta como requisito. Deste modo, gera-se uma curva da resistência versus velocidade. Uma análise detalhada da metodologia de Holtrop foi feita por Miranda e Martins (2005), que deve ser consultada pelo leitor para uma descrição mais profunda.

O método de Holtrop considera a resistência total (R_{HOLTROP}) ao avanço como sendo composta por um somatório contendo 5 parcelas: parcela devido à geração de ondas (R_{w}); devido ao atrito (R_{f}); devido à proximidade do bulbo à superfície do mar (R_{B}); devido a submersão da popa transom (R_{TR}) e devido a efeitos de escala (R_{A}). Assim;

$$R_{HOLTROP} = R_w + R_f \times (1+k) + R_B + R_{TR} + R_A, [N]$$
 (2.10)

A resistência de atrito é estimada pela placa plana do ITTC¹⁰-1957 e o fator (1+k) contabiliza os efeitos de forma viscosos. O fator de forma anterior tem uma relação de dependência com as seguintes variáveis:

$$(1+k) = f(c_{14}, LWL, B, L_R, \nabla, C_P)$$
 (2.11)

onde:

 $c_{_{14}}$: coeficiente dependente da forma da popa da embarcação;

-

¹⁰ International Towing Tank Conference

 L_R : comprimento do corpo de entrada, [m];

C_P: coeficiente prismático longitudinal.

O coeficiente c_{14} depende, fundamentalmente, da forma da popa da embarcação e está definido da seguinte maneira (HOLTROP e MENNEN, 1982):

$$c_{14} = 1 + 0.011 \times C_{STERN} \tag{2.12}$$

O coeficiente C_{STERN} define a forma do corpo da popa do navio. Exemplos de possíveis valores para este coeficiente, em função da forma da popa, são mostrados a seguir:

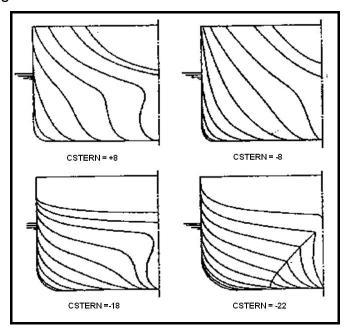


Figura 2.7: Diferentes tipos de popa e seus correspondentes coeficientes C_{STERN} (WATSON, 1998).

O comprimento do corpo de entrada vem expresso em função da posição do centro de flutuação e do coeficiente de bloco. A expressão para a parcela correspondente a $R_{\rm f}$ é igual a:

$$R_{f} = \frac{1}{2} \rho \times C_{f} \times A \times V^{2}$$
 (2.13)

Sendo

$$C_{f} = \frac{0.075}{\left(\log_{10}(Re) - 2\right)^{2}}$$

$$Re = \frac{VL}{v}$$

 υ : viscosidade cinemática da água, $(1 \times 10^{-6} \lceil m^2/s \rceil)$;

A: área da superfície molhada do casco, [m²];

V: velocidade, [m/s];

 ρ : densidade da água do mar, [kg/m³].

A parcela da resistência correspondente a geração de ondas, para número de Froude¹¹ (Fr) menor a 0.4, valor típico para os navios objeto de estudo, tem a seguinte forma:

$$R_{W} = c_{1} \times c_{2} \times c_{5} \times \nabla \times \rho g \times e^{\left[m_{1} \times Fr^{d} + m_{4} \cos\left(\lambda Fr^{-2}\right)\right]}$$
(2.14)

Os valores das variáveis das quais depende a resistência devido à geração de ondas, indicadas na equação anterior, são dependentes da geometria do navio (LWL, B, T, C_P , C_x , ∇), mostradas minuciosamente no trabalho de Holtrop (1984), remetendo o leitor a consulta para mais detalhes.

A parcela $(R_{\scriptscriptstyle B})$ procura acrescentar o efeito negativo do bulbo na resistência, quando está muito próximo da superfície da água. Assim também, o componente $(R_{\scriptscriptstyle TR})$ estima o efeito negativo da popa transom quando ela está submersa e $(R_{\scriptscriptstyle A})$ representa a correção prevista da escala do modelo para o navio real.

Finalmente, deve ser considerada a resistência produzida pela força que exerce o ar na área do navio acima da linha de flutuação, conhecida como área morta. Shahak (1998) assumiu a área morta como um retângulo e propôs a seguinte expressão para estimar a área frontal acima da linha d' água, considerando uma adição de 5% por equipamento externo:

$$A_{frontal} = 1.05 \times B \times (D - T + N_{DK} \times H_{DK}), \quad \lceil m^2 \rceil$$
 (2.15)

-

¹¹ O número de Froude é definido da seguinte forma: Fr= $\frac{V}{\sqrt{g\times LWL}}$

Para calcular a resistência adicional devido ao ar, é necessário conhecer o coeficiente de resistência do ar (C_{ar}), sendo que a Naval Sea System Command **apud** Shahak (1998) recomenda o valor de 0.7. Deste modo, a componente de resistência correspondente ao ar é:

$$R_{ar} = \frac{1}{2} \rho_{ar} \times C_{ar} \times A_{frontal} \times V^2$$
 (2.16)

Onde

 ρ_{ar} : densidade do ar, [kg/m³]

Assim, somando as equações (2.10) e (2.16), chega-se ao valor final da resistência total ao avanço do navio:

$$R_{\text{TOTAL}} = R_{\text{HOLTROP}} + R_{\text{ar}} \tag{2.17}$$

Para determinar se a curva de resistência, como mencionado no início do capítulo, o valor da velocidade nas equações descritas neste subcapítulo variará em uma faixa de valores desejado. Quando o objetivo for determinar a resistência total se usa a velocidade de projeto requerida.

2.8. Cálculo da Potência Requerida

A potência do casco nu é calculada multiplicando a resistência total pela velocidade de projeto requerida:

$$Pe = R_{T} \times V \quad [HP] \tag{2.18}$$

Finalmente, por considerações de projeto, é considerado um fator de segurança para levar em conta diferentes condições que poderiam exigir uma situação pior da que foi estimada. Esse parâmetro (PMF) é configurado como 5% no modelo empregado. Então, a potência efetiva total resulta em:

$$EHP = PMF \times (Pe) \tag{2.19}$$

Onde

PMF: fator marginal de potência

EHP: potência efetiva total, [HP]

A potência disponível no eixo - SHP - é calculada dividindo a potência efetiva total pelo coeficiente propulsivo (PC). O coeficiente propulsivo é definido em função da variável N_{POPA} dos parâmetros de projeto. Brown (2000) associou o coeficiente da popa (C_{STERN}), usado na metodologia de Holtrop para a estimativa da resistência ao avanço, a um coeficiente propulsivo da seguinte maneira:

1.
$$C_{STERN} = -11 \Rightarrow PC = 0.7$$

2.
$$C_{STERN} = -25 \Rightarrow PC = 0.75$$

Resumindo, as seguintes operações são realizadas durante o cálculo da resistência ao avanço e potência ao eixo:

- Se N_{POPA} é igual a 1 então C_{STERN} = -11 e PC = 0.7
- Se N_{POPA} é igual a 2 então C_{STERN} = -25 e PC= 0.75

Desta maneira, assumindo certa eficiência propulsiva baseado nos valores obtidos em navios petroleiros que estão atualmente operando é possível estimar a curva de potência necessária no eixo para a faixa de velocidade mencionada anteriormente. Uma vez conhecida a curva da potência necessária no eixo versus a velocidade é possível escolher o motor principal para obter a velocidade de projeto.

2.9. Definição do Motor Propulsor Principal

Existem vários critérios para escolher e acomodar a máquina principal e auxiliar¹², tais como potência requerida; peso, espaço; vibração e custos de aquisição, operação e manutenção. A importância de cada critério difere entre

-

¹² Referem-se às plantas geradoras de energia e qualquer outro equipamento necessário para a operação do navio (bombas, trocadores de calor, compressores de ar, purificadores de água, etc.).

os diferentes tipos de navios. Atualmente, a maioria dos navios mercantes em serviço usam motores a diesel, sendo eles de três tipos:

- Baixa velocidade de rotação, aproximadamente 60 –150 rpm;
- Média velocidade de rotação, aproximadamente 450 800 rpm;
- Alta velocidade de rotação, aproximadamente 1000 3000 rpm.

Watson (1998) mostra uma pequena comparação entre motores de baixa, média e alta velocidade de rotação para uma potência aproximada de 7000 kW.

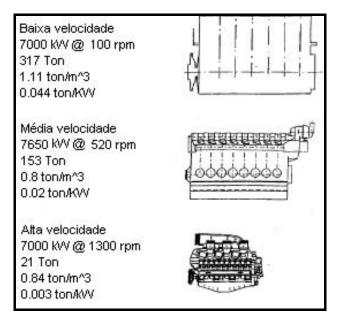


Figura 2.8: Comparação de tamanho, densidade e peso para vários tipos de motores (WATSON ,1998).

Atualmente, motores de baixa velocidade são os mais utilizados em navios mercantes de grande porte. As baixas velocidades de rotação estão associadas aos grandes diâmetros do hélice, que são altamente eficientes. O combustível requerido é o "heavy marine fuel oil", o mais barato combustível. Motores de média velocidade podem ser usados em pequenos navios com um só propulsor e em navios ligeiramente grandes com dois propulsores.

Em navios de grande porte, motores de média velocidade são usados com engrenagem para reduzir a velocidade do hélice aos valores menores possíveis que possam ser fixados pelo hélice de maior tamanho permissível, para

otimizar a eficiência do hélice. Segundo Watson (1998) o maior valor disponível de potência para este tipo de motores é de 23450 kW, que para uma instalação com dois motores pode fornecer uma potência total de 47000 kW. Este tipo de alternativa oferece consideráveis vantagens de espaço, peso e possível arranjo de mais de um motor quando comparados com os de baixa velocidade, fatores que podem ser favoráveis para tomar uma decisão.

Portanto, para a busca das características preliminares do navio petroleiro foram considerados motores diesel de baixa e média velocidade de rotação, com o objetivo de permitir que o processo de projeto faça um balanço entre estas duas alternativas para depois conhecer a opção mais adequada.

A potência necessária calculada no subcapítulo anterior deve ser fornecida pela máquina propulsora, que fornece uma potência máxima ao freio. A partir da curva potência versus velocidade calculada anteriormente, obtem-se a potência necessária no eixo, SHP para a velocidade de operação imposta como requisito através de uma interpolação. Com o valor da variável de projeto P_{systyp}, número de motores e o valor de SHP calculado, escolhe-se o motor principal. Foi pesquisada nos sites da Man B&W, Caterpillar, e Wartsila dados técnicos de motores diesel marinos. Foi criada uma base de dados com 68 motores, na faixa de potência de 1400 HP até 70000 HP. As seguintes características foram registradas:

- Potência Total instalada (PI, HP);
- Consumo de Combustível [SFC, N / (Hora x HP)];
- Comprimento (L^{Motor}_{Escolhido},m);
- Largura (m);
- Altura (m);
- Peso (Ton);
- Velocidade Rotação (N_{MOT}, rpm).

A base de dados foi organizada em ordem ascendente em relação à potência dos motores. Uma procura seqüencial na base de dados é feita para localizar o primeiro motor que tenha uma potência igual ou superior à potência estimada

(SHP). Se a variável de projeto P_{systype} é igual a dois (2), o valor de SHP requerido é dividido por dois (2).

2.10. Estimativa da Velocidade de Operação

Depois de ter escolhido a máquina principal, o valor da velocidade que se obtém com esse motor é calculada. Uma interpolação usando splines é realizada na curva de SHP versus Velocidade entrando com o valor da potência do motor escolhido como variável independente, isto é:

$$V_S = Interpolar(SHP_{CURVA}, PI)$$

onde:

V_s: Velocidade obtida com o motor escolhido, [nós];

PI: Potência instalada, [HP];

SHP_{CURVA}: Valores de potência no eixo requerida para uma faixa de velocidade.

A seguir serão detalhados os modelos paramétricos utilizadas para estimar os pesos que constituem o navio.

2.11. Estimativa de Pesos

Para obter as dimensões principais que satisfaçam os requisitos impostos é necessário realizar um processo iterativo, com o intuito de conseguir o balanço entre peso e empuxo e/ou volume requerido com o disponível. Para tanto, é necessário ter modelos paramétricos que estimem os diferentes pesos e volume. Nesta secção serão descritos diversos métodos para calcular em forma preliminar os principais pesos que constituem o peso leve do navio.

O peso leve de navios mercantes é composto pelos seguintes itens:

- Peso da estrutura de aço do casco;
- Peso do sistema propulsor;

- Peso do Outfit:
- Peso adicional para um possível crescimento ou erro nas estimativas dos itens anteriores (aproximadamente 6% dos três itens anteriores).

O outro componente do deslocamento é o peso morto, sendo igual aos seguintes itens:

- Peso do carregamento;
- Peso da água doce para todos os propósitos;
- Peso dos combustíveis e lubrificantes;
- Peso da tripulação e seus efeitos;
- Peso dos alimentos.

Nas próximas seções será abordada a metodologia de cálculo de todos os itens indicados anteriormente.

2.11.1. Peso Estrutural

O peso estrutural inclui o peso do casco até o pontal na seção mestra, o peso da superestrutura e o peso da casaria. A Germanischer Lloyd (2007) define a superestrutura como uma estrutura no convés de borda livre¹³, que se estende de costado a costado ou a estrutura com chapa de costado a uma distância inferior a 0.04xB em relação ao costado do navio. Uma casaria é uma estrutura no convés resistente¹⁴ onde a chapa de costado da estrutura começa a uma distância superior a 0.04 x B em relação ao costado do casco. Neste trabalho, é considerado que o navio possui apenas casaria. A seguir será feita uma descrição dos modelos empregados para estimar o peso do casco e da casaria.

¹³É o convés continuo no navio que contem os meios para garantir a condição estanque do navio em todo seu comprimento.

¹⁴ O convés contínuo mais alto o qual forma a face superior da viga-caixão.

2.11.1.1. Peso do Casco e Casaria

Nesta seção serão comentados sucintamente os cinco modelos paramétricos, disponíveis na literatura, escolhidos para estimar o peso de casco e da casaria, sendo os detalhes de cada um apresentados no $\operatorname{AP\hat{E}NDICE} A$.

O primeiro modelo é o proposto por Watson e Gilfillan (1976). Basicamente, consiste em usar uma variável dependente da área do navio, sendo modelado como um caixão, isto é, calcula-se área do fundo e convés, área do costado acima e abaixo da linha de flutuação tendo em conta as diferentes exigências de carga no costado por meio de coeficientes de "carga" nas respectivas expressões. Além disso, é considerado o peso da superestrutura e da casaria.

O segundo modelo empregado é proposto por Mish¹⁵ et al. (2000). O processo consiste em estimar uma espessura equivalente da chapa, representando o navio como uma viga-caixão. O volume de aço da viga caixão é calculado em função do comprimento, boca, pontal, espessura e número de anteparas. Finalmente, calcula-se o peso do casco multiplicando o volume de aço pelo seu peso específico. O cálculo do peso da casaria é feito em função das necessidades de área para tripulação, navegação, cabines, etc. Adota-se que a casaria tem uma forma retangular e em função dos requisitos de área, assumindo a sua largura, calcula-se o comprimento. Com os valores anteriores e empregando um peso específico para o aço da casaria calcula-se o seu peso.

_

¹⁵ O trabalho apresentado por Mish et al corresponde ao curso de graduação **AEO 4065** no **Virginia Tech**, sendo professor o Doutor Alan Brown, motivo pelo qual chama-se indistintamente a proposta do modelo de peso apresentado por Mish et al. como Modelo de Brown.

O terceiro modelo analisado é o proposto por Harvald e Juncher¹⁶. Esta é uma proposta simples para estimar o peso da estrutura de diversos tipos de embarcações (graneleiros, petroleiros, carga geral, rebocadores, fornecedores) em função das dimensões principais (LWL, B, D) e o deslocamento.

Alvarinho et al. (1997) fazem uma descrição de diferentes metodologias para estimar pesos e centros de gravidade de diferentes tipos de navios. O quarto modelo é o proposto por Alvarinho et al. (1997). Para navios petroleiros com duplo casco Alvarinho et al. propõem uma fórmula de regressão, em função das dimensões principais, levantada com uma base de dados de navio que têm um peso morto na faixa de 45000 até 300000 Ton.

O último modelo a ser empregado neste trabalho é o proposto por Sato¹⁷. Um procedimento de como obter uma expressão muito similar a de Sato é detalhado por Watson (1998). Esta aproximação é basicamente dependente do modulo de seção do navio sendo modelado como uma viga "I". A fórmula proposta por Sato vai ser empregada com certo nível de conservadorismo, pelo fato de sua faixa de validade não ser compatível 100% com as das demais formulações empregadas nesta pesquisa. Em função disto, talvez seja necessário realizar extrapolações comprometendo a consistência dos resultados obtidos.

No processo de otimização é comparado o efeito que produz cada um dos modelos descritos anteriormente, tanto nos valores finais ótimos, quanto na distribuição da população na fronteira dominante do problema. Para se analisar a tendência dos modelos de pesos descritos, foi calculado o peso de aço para diferentes valores do peso morto a ser carregado (vide

Figura 2.9). Cada ponto representa o valor médio do peso de aço de 300 navios gerados aleatoriamente com cada modelo e para cada peso morto considerado

¹⁶Harvald,Sv. Aa, Juncher J., '"Steel Weight Estimation for Ships". The Technical University of Denmark, Department of Ocean Engineering.

¹⁷ Effect of Principal Dimensions on Weight and Cost of Large Ships". N.Y Metropolitan Section, SNAME, 1967.

- valores de peso morto desde 100.000 até 200.000 toneladas com incrementos de 10.000 toneladas.

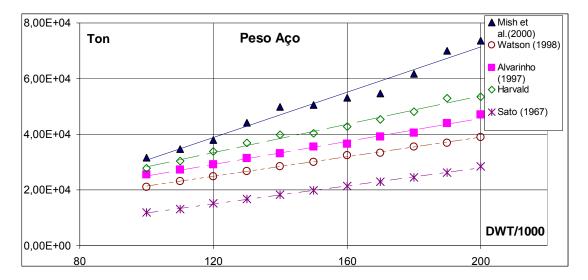


Figura 2.9: Variação do peso do aço do navio com o peso morto total a ser transportado empregando os diferentes modelos descritos anteriormente.

É importante ressaltar o comportamento similar (tendência) das metodologias apresentadas, porém o efeito que cada um destes modelos produz na busca do navio ótimo, conforme definido na contextualização deste trabalho, será apresentado no capítulo 4. No próximo item será apresentado o método de cálculo do peso do sistema propulsor.

2.11.2. Peso do Sistema Propulsor

O peso do sistema propulsor inclui o motor principal, redutor, eixo, mancais e propulsor. Watson e Gilfillan (1976) propõem as seguintes divisões dos pesos:

$$W_{M} = W_{ME} + W_{REM}$$
 (2.20)

onde;

W_{ME}: peso do motor principal, [Ton];

W_{REM}: Peso do restante da máquina, [Ton].

O motor principal já foi escolhido e com isso o seu peso é conhecido. A quantidade pendente é o peso do equipamento restante. Watson apresenta uma figura relacionando a potência do motor com o peso restante. A equação que representa melhor essas variáveis é:

$$W_{REM} = k \times PI^{0.7}, \quad [Ton]$$
 (2.21)

onde,

k: constante dependente do tipo de navio

PI: potência instalada, [kW]

Para navios petroleiros o valor de k é igual a 0.72.

Em seguida mostra-se o modelo empregado para estimar o peso do Outfit.

2.11.3. Peso do Outfit

Não existe um consenso geral na definição dos elementos que formam o grupo Outfit. Nos estaleiros, geralmente os itens do navio que são terceirizados correspondem a este grupo. Carreyette (1978) propõe uma descrição clara dos elementos que deveriam entrar no grupo de peso Outfit. Watson (1998) apresenta em um gráfico, representado na Figura 2.10, o comprimento do navio versus o peso do Outfit para vários tipos de navios.

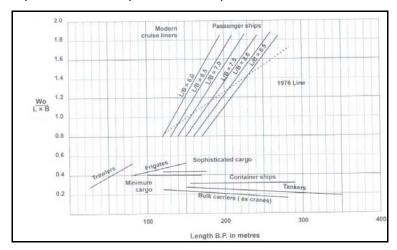


Figura 2.10: Peso do Outfit em função do comprimento, (Watson 1998).

A regressão que estima o peso do Outfit obtida para navios petroleiros é a seguinte:

$$W_{OUTFIT} = Co \times LWL \times B, \quad [Ton]$$
 (2.22)

Onde,

 $Co = -0.0006 \times LWL + 0.38$, [m]

LWL e B devem estar em metros

O item seguinte trata as componentes de peso que constituem o peso morto do navio.

2.11.4. Itens do Peso Morto

O peso morto da carga é geralmente um requisito do armador ou dono do navio e os demais itens são geralmente estimados usando modelos racionais ou formulados pelos anos de experiência e prática. O peso morto total é dividido da seguinte maneira:

$$DWT_{TOTAL} = DWT_{CARGA} + W_{TRIP} + W_{AD} + W_{OC} + W_{OL} + W_{PROV}, [Ton] \qquad (2.23)$$

onde,

DWT_{CARGA}: peso morto da carga, [Ton];

W_{TRIP}: peso da tripulação e seus efeitos, [Ton];

W_{AD}: peso da água doce, [Ton];

W_{oc}: peso do óleo combustível, [Ton];

W_{oL}: peso do óleo lubrificante, [Ton];

W_{PROV}: peso das provisões, [Ton].

As equações mostradas na tabela abaixo foram obtidas em Parson (2003) e representam as estimativas realizadas para o peso dos itens correspondentes ao peso morto:

Tabela 4 - Estimativa dos pesos correspondentes ao peso morto.

Descrição	Peso [Ton]
Óleo Combustível	$SFC \times PI \times \frac{E}{V} \times \left(\frac{1}{9800}\right)$
Óleo Lubrificante	20
Água doce	$0.17 \times N_{TRIPULACAO} \times \frac{E}{V} \times \left(\frac{1}{24}\right)$
Tripulação	0.17 × N _{TRIPULACAO}
Provisões	$0.01 \times N_{TRIPULACAO} \times \frac{E}{V} \times \left(\frac{1}{24}\right)$

Sendo cada variável da tabela anterior definida como segue:

SFC: consumo específico de combustível, [N / (Hora - HP)];

PI: potência instalada da máquina principal, [HP];

E: distância da viagem de projeto, [milhas náuticas].

V: velocidade de projeto, [nós].

Em seguida será detalhado o processo de cálculo do espaço necessário para acomodar a carga a ser transportada.

2.12. Espaço de Carga

No processo de balanceamento de cada navio será necessário conhecer o espaço que ocupará a carga. Para tanto, deve-se calcular inicialmente o peso morto da carga (DWT_{CARGA}) que vai ser transportada, isto é, do peso morto total imposto como requisito deverá ser subtraído os itens analisados na seção anterior: óleo combustível, óleo lubrificante, água doce, tripulação e provisões.

Em seguida, será calculado o volume necessário para a carga e, em função da geometria do espaço de carga (altura do duplo fundo, largura do duplo costado, tanques de proa e Slop), calcula-se o comprimento necessário para os tanques de carga.

O volume necessário para a acomodação da carga especificada, considerando um volume para expansão de 0.02%, é:

$$\nabla_{\text{CARGA}} = \frac{\text{DWT}_{\text{CARGA}}}{0.98 \times \gamma_{\text{CARGA}}}, \quad \left[\text{m}^3\right]$$
 (2.24)

Para estimar o comprimento necessário para o espaço de carga (LCtk), devese fazer uma correção pela forma "reduzida" dos tanques da proa quando comparados com os da seção mestra do navio. Mish et al. (2000) propõem o seguinte fator para ter em conta essa variação:

$$LCtk = Fator_{TANQUES} \times \left(\frac{V_{CARGA}}{BCB \times DCB \times C_{R}^{Pontal}}\right), \quad [m]$$
 (2.25)

Onde,

$$Fator_{TANQUES} = \left(\frac{N_{CARGO}}{N_{CARGO} - 1 + CF_{TK} \times C_{B}} \right)$$

CF_{TK}: coeficiente empregado para estimar o coeficiente de bloco do tanque de carga de proa até o pontal;

BCB: largura dos tanques de carga, [m];

DCB: altura dos tanques de carga, [m].

A expressão Fator_{TANQUES} incrementa o valor do espaço necessário para a carga. O produto CF_{TK} pelo coeficiente bloco do navio estima a contribuição em volume do tanque de proa até o pontal do navio. Na equação (2.25) é utilizado o coeficiente bloco até o pontal do navio para estimar o volume total disponível na área de carga.

Em função de normas aplicáveis em navios petroleiros é necessário projetar tanques para coletar todos os resíduos de água e óleo que resultam da lavagem dos tanques de carga, assim como qualquer substância que seja prejudicial ao meio ambiente, sendo eles chamados de Tanques de Slop. Um critério para dimensionar esses tanques é considerar entre 2% e 5% do volume de carga.

Estes tanques são colocados atrás do último tanque do espaço de carga. Assim como no caso dos tanques de carga da proa, é necessário considerar a diminuição das seções do navio e utilizar um fator de forma na estimativa do volume desses tanques. O comprimento, segundo Mish et al. (2000), é estimado por:

$$LStk = \frac{0.02 \times \nabla_{CARGA}}{(CS_{TK} \times C_B) \times BCB \times DCB}, \quad [m]$$
 (2.26)

onde,

 CS_{TK} : coeficiente empregado para estimar o coeficiente de bloco do tanque de Slop até o pontal.

O produto do coeficiente CS_{TK} pelo coeficiente bloco do navio é empregado para estimar o coeficiente de bloco do tanque de Slop até o pontal do navio. O valor total do comprimento da área de carga é dado pela soma das equações (2.25) e (2.26), como segue:

$$L_{BLOCO \text{ de CARGA}} = LCtk+LStk$$
 (2.27)

Onde.

LCtk: comprimento dos tangues de carga, [m]

LStk: comprimento dos tanques de Slop, [m].

A seguir se explica a forma de cálculo dos comprimentos dos peaks de proa e popa e do espaço vazio (Cofferdam) requerido entre a praça de máquinas e os tanques de carga e Slop.

2.13. Definição dos Peaks de Proa e Popa e Cofferdam

Todos os navios devem possuir anteparas estanques distribuídas ao longo do comprimento para dividi-lo em compartimentos estanques. O mínimo número de anteparas a ser fixadas no navio, segundo ABS (2007), deve ser:

- 1. Antepara de colisão em proa;
- 2. Antepara em popa;
- 3. Duas anteparas isolando o espaço da praça de máquinas.

Em navios com a praça de máquinas na popa, a antepara em popa pode substituir à antepara colocada a ré da praça de máquinas. Os comprimentos mínimos dos Peaks de proa e popa estão estabelecidos pelas regras das sociedades de classificação de navios, chegando a ter um valor padrão para estas duas variáveis e definidas pelos seguintes valores:

$$\begin{cases} L_{peak}^{proa} = 0.05 \times LWL, & LWL \leq 200 \, m \\ 10, & LWL > 200 \, m \end{cases} \tag{2.28}$$

$$L_{peak}^{popa} = 0.062 \times LWL, \quad [m]$$
 (2.29)

As normas exigem a presença de um Cofferdam¹⁸ entre os tanques de carga e o espaço da praça de máquinas, podendo colocar nesta área as bombas ou os tanques de combustível. Considerou-se um valor constante de 3 metros para este espaço (MISH et al., 2000).

A seguir é descrito o modelo paramétrico usado para o cálculo dos centros verticais de gravidade dos pesos a bordo no navio e a estabilidade transversal inicial.

2.14. Estimativa de Centros Verticais de Gravidade e Avaliação da Estabilidade Transversal Inicial

No item 2.11 foram descritos os diferentes modelos paramétricos para se estimar os pesos dos diversos itens presentes no navio. Para avaliar a estabilidade inicial transversal do navio é necessário conhecer também a posição vertical dos centros de massa de cada um daqueles itens. Todos os valores calculados nesta secção são referenciados a linha base ou fundo. Não será avaliada a estabilidade longitudinal do navio pela falta de informação ou modelos para estimar as posições dos centros de massa longitudinal dos diferentes itens a bordo.

¹⁸Os espaços entre duas anteparas ou dois conveses primários designados como segurança contra o vazamento de óleo de um compartimento a outro

A estabilidade inicial é avaliada usando a razão entre a distância do centro de gravidade do navio até o metacentro, chamada de altura metacêntrica (GM), e a boca do navio. A seqüência empregada no cálculo dos parâmetros dependentes para determinar a estabilidade inicial transversal é:

- 1. Determinação do centro de gravidade do navio;
- 2. Cálculo da distância entre o centro de flutuação e o metacentro;
- 3. Cálculo da altura do centro de flutuação.

O cálculo será feito em forma paralela para a condição de lastro e carregada.

2.14.1. Localização do Centro de Gravidade

Kupras apud Parson (2003) propõe as relações mostradas na Tabela 5 para fazer estimativas de centros verticais dos componentes que constituem o peso leve do navio. Observando as expressões, é importante notar que a equação que estima o centro da máquina principal é colocada a 35% da distância entre o teto do duplo fundo e o convés principal do navio, sendo possível adaptar essa relação para intenções de projeto de uma situação particular (PARSON, 2003).

Tabela 5 - Estimativa dos centros verticais de gravidade dos componentes do peso leve do navio (KUPRAS apud PARSON, 2003).

Item	Centro de Gravidade Vertical [m]		
	$VCG_{CASCO} = 0.01 \times D \times \left[\left[46.6 + 0.135 \times \left(0.81 - C_B \right) \times \left(\frac{LWL}{D} \right)^2 \right] \right] +$		
Casco	$0.008 \times D \times \left(\left(\left(\frac{LWL}{B} \right) - 6.5 \right) \right)$		
	LWL<120 m		
	$VCG_{CASCO} = 0.01 \times D \times \left(46.6 + 0.135 \times (0.81 - C_B) \times \left(\frac{LWL}{D}\right)^2\right)$, LWL>120		
Máquina Principal	$VCG_{MAQ} = h_{db} + 0.35 \times (D - h_{db})$		
	VCG _{Outfit} = D + 1.25 , LWL<125 m		
Outfit	$VCG_{Outfit} = D+1.25+0.01 \times (LWL-125)_{,} 125 \le LWL \le 250$		
	$VCG_{Outfit} = D + 2.5$, LWL>250 m		

A Tabela 6 apresenta os valores que Mish et al. (2000) sugere para os centros de gravidade dos itens correspondentes às componentes do peso morto. Para a estimativa do centro da carga, Mish et al. assumem que o tanque está com 98% de sua capacidade e que o centróide está na metade da distância entre o teto do duplo fundo e o convés.

Tabela 6 - Estimativa dos centros verticais de gravidade dos componentes do peso morto do navio.

Item	Centro de Gravidade Vertical [m]
Carga	$VCG_{CARGA} = 0.98 \times \left(\frac{D - h_{db}}{2}\right) + h_{db}$
Óleo combustível	VCG _{oc} = 0.7×D
Óleo Lubrificante	VCG _{OL} = 1.1× VCG _{Maq}
Água doce	$VCG_{AD} = 0.95 \times D$
Tripulação	$VCG_{TRIPULAÇÃO} = D + 0.4 \times (N_{DK} \times H_{DK})$
Provisões	VCG _{Provisões} = D×1.05

Em relação à casaria do convés, assume-se que a posição vertical do seu centro de gravidade está a 35% da altura total da casaria, pensando que a parte inferior é mais reforçada, assim:

$$VCG_{CASARIA} = D + (0.35N_{DK} \times H_{DK}), \quad [m]$$
 (2.30)

A primeira situação a ser analisada é a condição de navio carregado, para o qual se toma momentos com respeito à linha do fundo, como segue:

$$VCG = \frac{\sum_{i} VCG_{i} \times W_{i}}{\sum_{i} W_{i}}$$
 (2.31)

Onde,

VCG_i: altura do centro vertical de gravidade do peso i, [m];

W_i: Peso de cada item que constitui o deslocamento do navio, [Ton].

Substituindo os valores das Tabela 5 e Tabela 6 e as expressões expostas no item 2.11 na equação (2.31) se calcula o centro vertical de gravidade do navio na condição de navio carregado. Este valor deve ainda ser corrigido para consideração do efeito de superfície livre e acrescentado um valor de segurança ou margem para considerar possíveis erros nas estimativas feitas anteriormente. A superfície livre dos líquidos presentes no navio eleva virtualmente o centro de gravidade do navio e deve ser considerado desde a fase inicial de projeto. O valor do centro vertical de gravidade fica assim:

$$KG_{PROJETO} = VCG \times \left(1 + \left(\frac{FS}{100}\right)\right) + KG_{MARGIN}, \quad [m]$$
 (2.32)

onde

FS: efeito da superfície livre;

KG_{MARGIN}: incremento de segurança, [m].

Na forma como está sendo expresso o efeito da superfície livre, o valor de FS, deve ser utilizado como porcentagem. O valor de FS considerado é de 3% e o incremento de segurança do centro de gravidade é de 0.03 m (MISH et al, 2000).

Na condição em lastro, a primeira coisa a fazer é calcular o deslocamento do navio nesta nova condição. Ao peso leve do navio deve se adicionar os itens do peso morto, substituindo o peso da carga pelo peso do lastro. Uma interpolação linear é feita para determinar o calado do navio na condição de lastro como segue (MISH et al, 2000):

$$T_{LASTRO} = \left(\frac{\Delta_{LASTRO}}{\Delta_{CARREGADO}}\right) \times T_{CARREGADO}, \quad [m]$$
 (2.33)

Onde,

$$\Delta_{LASTRO} = W_{PESO_LEVE} + \gamma_{\acute{A}GUA} \times \nabla_{LASTRO} + W_{OC} + W_{OL} + W_{AD} + W_{TRIP} + W_{PRO}, \quad \left[Ton\right]$$

 ∇_{LASTRO} : volume de lastro carregado pelo navio, [m³].

Na estimativa do centro de gravidade na condição de lastro se considera a contribuição do peso de lastro colocado no duplo fundo, duplo costado e peaks de proa e popa. Os pesos e centros verticais destes itens, definidos pela geometria do navio, são mostrados na Tabela 7.

Da mesma maneira como foi feito para a condição do navio carregado, calculase o centro vertical de gravidade (KG_{LASTRO}) do navio tomando momentos dos pesos que constituem a condição em lastro empregando a equação (2.31).

Tabela 7 - Pesos e centros verticais de gravidade da água do mar utilizada como lastro (MISH et al., 2000).

Descrição	Peso [Ton]	Posição Vertical [m]
Costado	$2\Big[L_{\text{Bloco de Carga}} \times w \times (D-h_{db})\Big] \gamma_{\text{ÁGUA}}$	$\frac{1}{2}$ ×(D-h _{db})
Fundo	$\left(L_{\text{Bloco de Carga}} \times h_{\text{db}} \times B\right) \times \gamma_{\text{ÁGUA}}$	$\frac{1}{2} \times h_{db}$
Peak de Proa	$(0.0229 \times \nabla_{CASCO}) \times \gamma_{AGUA}$	0.65×D
Peak de Popa	$(0.00938 \times \nabla_{CASCO}) \times \gamma_{AGUA}$	0.55×D

MARPOL 73/78 (IMO 1997) exige, para navios petroleiros novos de transporte de óleo cru de 20000 DWT ou mais, tanques de lastro segregado de

capacidade tal que o navio satisfaça o calado obtido pela equação (2.6) — baseado no peso leve mais o lastro. Os tanques segregados de lastro devem ser arranjados de forma tal de minimizar o vazamento de óleo em um evento de encalhe ou colisão. Assim, são comparados os valores T_{LASTRO} e T_{m} , equações (2.33) e (2.6) respectivamente, para determinar se o navio atende os requisitos da MARPOL. Caso o calado na condição em lastro seja inferior ao mínimo requerido, os valores das funções objetivo que avaliam a performance do navio serão diminuídos como será explicado em 3.4.6.

2.14.2. Cálculo do BMT e KB

Para a estimativa da estabilidade transversal inicial do navio é necessário determinar a distância relativa entre o centro de gravidade e o metacentro, representada pelo raio metacêntrico transversal (BMT). A seguir, mostram-se os modelos empregados para a condição carregada e, posteriormente, para a condição em lastro.

O raio metacêntrico transversal é função do volume submerso e das dimensões e forma do plano de flutuação, que determinam o momento de inércia do plano de flutuação em relação ao eixo longitudinal passante pelo centro de área do plano (centro de flutuação). A distância fica desta forma (LEWIS, 1988):

$$BMT = \frac{I_{TRANSVERSAL}}{\nabla}, \quad [m]$$
 (2.34)

onde;

I_{TRANSVERSAL}: inércia do plano de flutuação em relação ao eixo longitudinal (eixo de simetria), [m⁴];

 ∇ : volume de flutuação na condição analisada, [m³].

O momento de inércia pode ser eficientemente estimado usando coeficientes adimensionais do plano da linha d' água. Parson (2003) faz uma recopilação

das formulações encontradas na literatura que permite aproximar o coeficiente mencionado. A seguinte formulação é utilizada:

$$I_{TRANSVERSAL} = C_{IT} \times LWL \times B^3, \quad [m^4]$$
 (2.35)

onde:

$$C_{IT} = 0.1216 \times C_{W} - 0.0410$$

C_{wL}: coeficiente do plano da linha d' água.

A última variável a ser estimada é a posição vertical do centro de flutuação do navio. Um navio com as formas muito cheias, tipo U, tem um coeficiente prismático vertical próximo a 1 e a altura do centro de flutuação próximo a metade do calado; no outro extremo, Tipo V, o casco teria um coeficiente prismático vertical próximo a 0.5 e o centro de flutuação próximo a 2/3 do calado. Portanto, existe uma forte correlação inversa entre a posição vertical do centro de flutuação e o coeficiente prismático vertical, sendo possível empregar esta dependência para estimar a posição vertical do centro de flutuação do navio. Posdunine e Lachenby apud Parson (2004) propõem a seguinte relação para navio com coeficiente da seção mestra maior que 0.9:

$$KB = \frac{T}{1+C_{vp}}, \quad [m]$$
 (2.36)

onde

C_{vp}: coeficiente prismático vertical.

As equações (2.34) e (2.36) são aplicáveis tanto para a condição carregado ou de lastro, ou seja:

Tabela 8 - Estimativa do KB e BMT na condição de lastro.

Item	Valor [m]
KB _{Lastro}	$\frac{\mathrm{T_{LASTRO}}}{1+\mathrm{C_{VP}}}$
BMT _{Lastro}	$\frac{I_{\frac{1}{1000000000000000000000000000000000$

¹⁹O coeficiente prismático vertical é definido como a relação entre o volume de deslocamento e o produto do calado com o coeficiente do plano da linha d' água,

Embora a inércia transversal da equação (2.34) e da Tabela 8 refira-se a planos de flutuação diferentes, usa-se o mesmo valor para as duas condições de carga em estudo, pela impossibilidade de determinar nesta etapa do projeto as características do plano de flutuação para o calado em lastro.

Finalmente conhecendo KB, BMT e KG para as duas condições de carga, procede-se ao cálculo da altura metacêntrica da seguinte forma (LEWIS, 1988):

$$GM_{T} = KB + BMT - KG_{PROJETO}, \quad [m]$$
 (2.37)

Substituindo as equações (2.36), (2.34) e (2.32) na equação (2.37) a expressão final do GM transversal para a condição carregada, necessário para avaliar a estabilidade inicial, fica como segue:

$$GM_{T}^{Carregada} = \frac{T}{1+C_{vp}} + \frac{C_{IT} \times LWL \times B^{3}}{\nabla} - \left(VCG \times \left(1 + \left(\frac{FS}{100}\right)\right) + KG_{MARGIN}\right)$$
(2.38)

Analogamente, para a condição de lastro, o GM transversal é estimado por:

$$GM_{T}^{LASTRO} = KB_{LASTRO} + BMT_{LASTRO} - KG_{LASTRO}$$
 (2.39)

Onde:

KB_{LASTRO} e BMT_{LASTRO}: definidos na Tabela 8;

KG_{LASTRO}: calculado usando os pesos na condição em lastro empregado (2.32).

O critério de estabilidade é um valor não dimensional obtido dividindo o valor do GM pela boca do navio:

$$C = \frac{GM_T^k}{B}$$
 (2.40)

Onde

GM_T: altura metacêntrica transversal na condição k;

k: índice que indica a condição analisada (carregada ou lastro).

A estabilidade transversal em lastro e carregada, a quantidade de lastro, a velocidade obtida com o motor selecionado e a mínima borda livre serão os

parâmetros que avaliarão a viabilidade ou não de cada navio no processo de

parâmetros que avaliarão a viabilidade ou não de cada navio no processo de otimização.

2.15. Estimativa de Custos

Tanto os custos de construção quanto os de operação devem ser considerados em um projeto, sendo cada um deles influenciado por vários fatores, tais como as características de mercado ou do navio (tipo de navio, tamanho, automatização, etc.), normativas legais e ambientais. Embora não seja um objetivo deste trabalho o cálculo com exatidão do custo total de um navio novo, estimativas preliminares usando três modelos diferentes – Carreyette (1978), Watson (1998) e PODAC²⁰ apud Miroyannis (2006) – serão consideradas para avaliar o impacto do custo nos valores ótimos das dimensões principais de um navio petroleiro.

Os modelos que estimam o custo podem ser classificados em duas categorias: paramétricos e determinísticos. Os modelos paramétricos usam uma variável independente que geralmente é uma medida direta das unidades dos itens a serem estimados. As relações usadas estão sujeitas a conjectura²¹. Com modelos determinísticos, as variáveis independentes são mais ou menos uma medida definitiva do item que está sendo estimado, sendo que ela não está sujeita a conjectura. Como o nível de definição do projeto é incrementado desde o estagio inicial até o projeto detalhado, a metodologia tende a utilizar modelos paramétricos nas fases inicias do projeto e modelos determinísticos nas fases mais avançadas.

Existem muitas características que podem ser usadas para categorizar o tipo de estimativa do custo. As mais significativas são o grau de definição do

²⁰Product Oriented Design and Construction Cost Model Development, Howard Bunch, University of Michigan, May 1995.

²¹Refere-se à incerteza dos resultados obtidos pela validade e/ou aplicabilidade das relações usadas

projeto, metodologia empregada na estimativa e esforço e tempo necessário para preparar a estimativa. A National Steel & Shipbuilding (2000) reproduz os cinco níveis de estimativa de custos estabelecidas pelas normas da ANSI²², que são mostrados na Figura 2.11.

Mello (1993) faz uma descrição detalhada dos componentes representativos dos custos de aquisição e operação de navios petroleiros como está descrito nos seguintes parágrafos.

O custo de aquisição de um navio é a soma de dinheiro a ser pago pelos materiais e mão de obra envolvida na construção, mais custos indiretos²³ necessários para a continuidade do funcionamento do estaleiro e que não geram lucro. Além disso, deve se considerar despesas diretas de produção, tais como eletrodos, oxigênio, maquetes e modelos, provas de mar, despesas com projeto, rebocadores, limpeza e vigilância.

Classe	Característica Primaria		Característica Secundária			
Estimada	Estagio de definição do Projeto		Meto	dologia	Faixa esperada de exatidão	Esforço de Preparação
			Mão de obra	Material	Porcentagem	Horas
5	0 % - 2 %	Projeto de Viabilidade	Paramétrico	Paramétrico	-20 % até 100 %	1 - 4
4	1 % - 15 %	Projeto Conceitual	Paramétrico	Paramétricos e alguns preços orçamentados	-15 % até 60 %	2 - 32
3	10 % - 40 %	Ponto de Projeto	Paramétrico e Determinístico	Paramétricos e vários preços orçamentados	-10 % até 30 %	10 - 80
2	30 % - 70 %	Projeto Contratual	Paramétrico e Determinístico	Preços orçamentados	-5 % até 15 %	20 - 160
1	50 % - 100 %	Projeto Detalhado	Paramétrico e Determinístico	Preços orçamentados	-5 % até 5 %	20 - 400

Figura 2.11: Classificação dos níveis de estimativa dos custos de um navio (Adaptado de National Steel & Shipbuilding, 2000).

Outros custos importantes a serem considerados dentro dos custos de aquisição são os do frete de material importado, despesas alfandegárias e os impostos sobre o faturamento do estaleiro que a legislação do país de construção do navio imponha neste tipo de obra. Para obter o preço que se indicaria inicialmente ao armador do navio se adiciona aos custos o lucro que o

²² American National Standars Institute

²³Típicos exemplos deste tipo de gastos incluem aluguel, utilidades, habilitação para operar uma empresa, mão de obra administrativa, luz, água, telefone, etc.

estaleiro terá pela construção do navio. Mediante negociações e considerações de mercado armador e estaleiro chegarão a um possível acordo para fixar um preço contratual.

Projeto de Navios

Outro importante custo que vai ser considerado neste trabalho é o de operação, já que o mesmo tem sua influência nos valores finais ótimos das dimensões principais. O custo de operação pode ser classificado em dois grupos como segue:

- Custos Fixos;
- Custos Variáveis.

Os custos fixos são os decorrentes da manutenção do ativo e não dependem da operação do navio e os custos variáveis correspondem as parcelas do custo associados à operação do ativo. Os custos fixos estão formados pelos seguintes itens:

- Despesas operacionais: materiais, viveres, produtos químicos, lubrificantes, pessoal a bordo, seguros, manutenção e reparos;
- Gastos Financeiros;
- Gastos Administrativos.

Os custos variáveis estão formados pelos seguintes itens:

- Despesas de combustíveis;
- Despesas decorrentes da operação nos portos;
- Serviços terceirizados;
- Despesas decorrentes da travessia de canais.

Para a consideração das despesas de manutenção, Mello (1993) mostra a conhecida curva da banheira (Bath Tub) que ilustra as falhas de grande parte dos equipamentos e sistemas navais em função do tempo. Esta curva tem três fases bem definidas, como pode ser observado na figura a seguir:

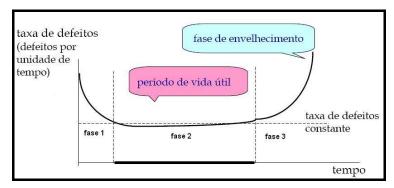


Figura 2.12: Curva de Períodos de Falha

A fase 1 está associada aos defeitos de fabricação que é atribuída ao estaleiro, sendo um período relativamente curto quando comparado ao tempo de vida útil do navio, tendo uma redução na taxa de falhas no decorrer desta fase. A fase seguinte corresponde ao período operacional do sistema que geralmente tem uma taxa de falhas constante, sendo produzida por esforços ou condições extremas no navio. Por último, a fase 3 conhecida como fase de desgaste ou de envelhecimento onde a taxa de falhas incrementa consideravelmente em função do envelhecimento do sistema.

Há muitas variáveis relacionadas nas estimativas dos custos de construção de um navio novo, saindo do escopo deste trabalho a consideração de todas e deste modo obter exatidão nas previsões. Os custos variam de estaleiro a estaleiro e de país a país. Mas um engenheiro que usa estudos de custo como uma base para escolher o projeto ótimo, está interessado nas diferenças de custo entre várias propostas, de modo que uma avaliação qualitativa das tendências é suficiente.

De forma geral, pode-se dizer que as estimativas do custo de construção são baseadas nos custos da mão-de-obra e do material para os itens casco, maquinaria e Outfit. Benford (1956) apresenta uma série de gráficos, usando esta divisão de componentes para estimar os custos de construção de navios petroleiros. A seguinte figura mostra a variação dos custos da maquinaria em função da potência.

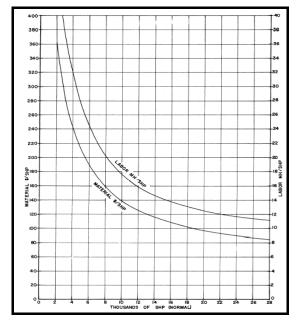


Figura 2.13: Custos aproximados da maguinaria (BENFORD, 1956)

Os HH²⁴ requeridos para executar uma tarefa são as bases de todos os custos diretos referentes à mão de obra, já que os estimando só é necessário conhecer os salários, despesas indiretas e o lucro para chegar ao preço total da mão de obra. Como se pode observar na Figura 2.13, existe uma tendência a diminuir os HH/SHP com o aumento da potência do motor. Parece ser uma lei natural que quando se incrementa o tamanho ou número de unidades a ser produzida, a razão de HH requeridos por unidade, por toneladas ou por metro² diminui. A diminuição não é linear, mas tende a um patamar constante, vide Figura 2.14.

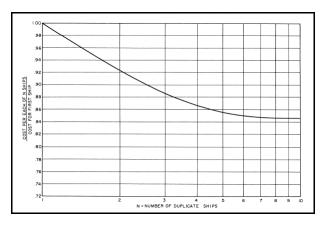


Figura 2.14: Diminuição dos custos pela construção em serie de navios (BENFORD, 1956).

-

²⁴ Homens-Hora

O fato observado na Figura 2.14 mostra a curva de aprendizagem do estaleiro que está produzindo em série um tipo específico de navios. Nos próximos dois itens serão abordados os modelos de custos de construção e operação empregados neste trabalho. Em função da disponibilidade de dados necessários encontrados na literatura para calcular todas as parcelas que compõem o custo de um navio novo, os seguintes custos de construção serão incluídos:

- Estrutura de aço;
- Sistema de Propulsão;
- Outfit;
- Custos de margem;
- Custo não dependentes do peso: Sociedades Classificadoras, consultorias, prova de tanques, modelos a escala, despesas do lançamento, rebocadores, etc.;
- Engenharia.

Para os custos de operação durante a vida útil do navio serão considerados:

- Combustível;
- Manutenção;
- Tripulação a bordo;
- Operação diária.

Em seguida explicam-se os modelos empregados para estimar os custos de construção e operação.

2.15.1. Custos de Construção

A seguir serão comentados de forma sucinta os três modelos- Carreyette (1978), Watson (1998) e PODAC apud Miroyannis (2006)- usados para estimar

cada um no APÊNDICE B.

os custos de construção disponíveis na literatura, ficando o detalhamento de

Carreyette (1978) propõe uma metodologia para estimar o custo de navios mercantes no estágio inicial de projeto. O custo total é dividido em custos da mão de obra mais custos dos materiais, cada qual sendo subdivididos da seguinte maneira:

Custo-Mão-Obra = Custos diretos laborais + Custos indiretos estaleiro + Lucro

Custo Materiais = Custos Fornecedores + Manipulação e desperdicio + Lucro

Observa-se na definição anterior a inclusão do lucro dentro dos custos, consideração que está fora do usualmente utilizado. Os custos de mão-de-obra são dependentes do peso, para a estrutura de aço e Outfit e da potência da máquina principal para o sistema de propulsão, elevado a um expoente menor a 1. O custo do aço correspondente a parcela da mão-de-obra depende de duas variáveis de tamanho (WS [Ton] e LWL [m]) e uma variável de forma (C_B), que afeta a quantidade de trabalho no casco. Isto é, formas com muita curvatura custarão mais para serem produzidas quando comparadas com um de formas cheias e pouca curvatura.

O segundo modelo, apresentado por Watson (1998), foi proposto para fazer estimativas razoáveis do custo de construção de qualquer tipo de navio mercante no ano de 1993. A intenção original foi apresentar dados na mesma forma como é usada tradicionalmente nos estaleiros - índices por Homem Hora - mais custos do material empregado, representando cada item com algum apropriado parâmetro. Contudo, devido a grande diferença na forma como os estaleiros classificam os dados não foi possível ter o enfoque da metodologia tradicional, resultando na consideração do peso como parâmetro independente para as estimativas. É certo que existem itens que são melhor representados por outras variáveis — custo do motor principal - baseado na potência ou potência elétrica baseada nos kilowatts instalados e as tarefas de montagem baseadas nas áreas de acomodação, mas o peso é um parâmetro que pode

representar "bem" a maioria dos itens presentes no navio e, em conseqüência, seu custo.

O terceiro modelo é chamado de PODAC e foi desenvolvido por Carderock Division da NSWC²⁵, em parceria com Avondale Industries, Bath Iron Works, Ingalls Shipbuilding, National Shipbuilding and Steel Company, Newport News Shipbuilding, Universidade de Michigan, Designers & Planners, SPAR Associates e NAVSEA²⁶. Esta metodologia foi concebida como um modelo que emprega PWBS²⁷ e tecnologia de grupo (GT). O PWBS identifica os componentes de construção fundamentais e seus processos de manufatura. O navio e suas partes são organizados numa hierarquia de componentes, começando desde o navio como um todo e depois dividido em secções lógicas ou zonas. Cada zona é subdivida em várias partes e assim sucessivamente. Cada um dos componentes é reconhecido como um pacote de trabalho discreto ou produto interim que é descrito pelo conteúdo de mão-de-obra e material (National Steel & Shipbuilding, 2000). A próxima figura ilustra os diferentes tipos de produtos interinos tidos em conta em um navio, desde o nível mais básico - matéria prima- até o produto final – navio pronto.

-

²⁵ Naval Surface Warfare Center

²⁶ Naval Sea Systems Comands

²⁷ Product Oriented Work Breakdown

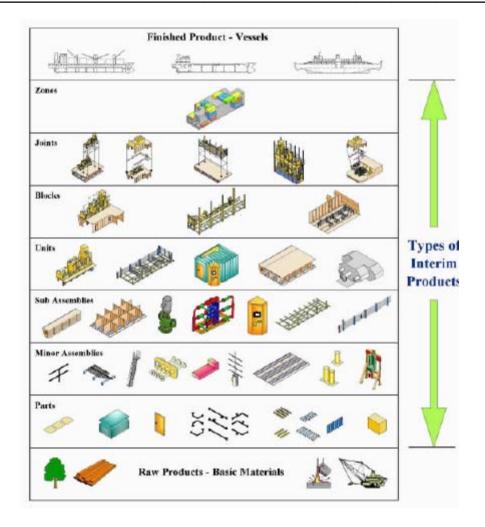


Figura 2.15: Hierarquia de produtos usado no PWBS (National Steel & Shipbuilding, 2000).

Esta metodologia de cálculo considera os processos de produção de cada produto no navio. Relações empíricas da estimativa de custos são propostas pelo PODAC, provendo um modelo para estimar os custos básicos de construção tanto no estágio conceitual quanto no preliminar ou contratual. Uma combinação de estimativas de custo tradicionais baseadas no peso, juntamente com os fatores de complexidade dos processos e produtos, forma a base das estimativas em cada nível de projeto.

Capítulo 2

2.15.2. Comparação dos três modelos de Custo de Construção

Neste item, os resultados obtidos pelos modelos apresentados nos itens anteriores para a estimativa do custo de construção de um navio serão comparados. Na figura seguinte, mostram-se os valores estimados para o custo de construção obtidos com as três metodologias descritas em função do peso morto.

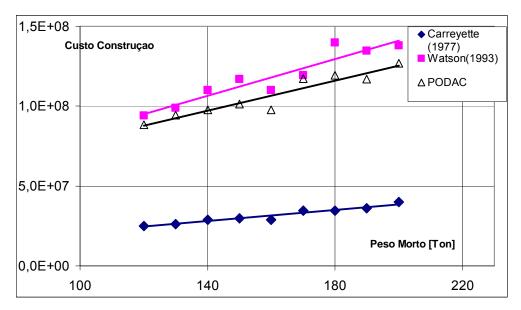


Figura 2.16: Comparação entre custo de construção.

Para a obtenção da figura anterior está sendo considerada as parcelas referentes ao custo da estrutura em aço, sistema de propulsão e Outfit, para permitir uma análise comparativa entre os três modelos. O modelo de Watson e PODAC resulta em US\$, enquanto o modelo de Carreyette em libras esterlinas (£).

Como pode ser visto na figura, existe uma grande semelhança entre os três modelos, em comportamento e tendência, sendo de forma especial as metodologias propostas por Watson e PODAC. Cada ponto da figura anterior foi obtido com o mesmo procedimento de como foram obtidos os pontos da Figura 2.9 que foi explicado antes. No processo de otimização e determinação do navio ótimo há o interesse em identificar a tendência dos custos e sua

influência nas dimensões principais do navio e não os valores precisos para o custo, motivo pelo qual a escolha de um ou outro modelo não interferiria nos resultados finais.

Na análise dos resultados obtidos, apresentada no capítulo 4, constata-se que a escolha do modelo de custo realmente não interfere na identificação do projeto ótimo para a função de mérito considerada no trabalho.

2.15.3. Custos de Operação

Para ter em conta o efeito real dos custos na determinação das dimensões principais ótimas é necessário considerar os custos de operação do navio que está sendo projetado. Para tanto, é preciso utilizar um modelo que estime os custos de operação em função das variáveis de projeto escolhidas. Com este intuito, foram considerados os modelos apresentados em Mish et al. (2000) e Watson (1998) para estimar os custos de operação, sendo uma combinação deles o modelo final empregado.

Para a aplicação do modelo, é necessário que se estabeleça o número de anos de vida útil do projeto, número de dias por ano que operará o navio e uma taxa anual para fazer a análise de valor presente dos custos de operação durante a vida útil do navio. Os seguintes valores são assumidos para estes três parâmetros:

Tabela 9 - Valores assumidos de anos de vida útil, quantidade de dias trabalhados por ano e taxa de juros anual para fazer uma análise de valor presente.

Descrição	Valor
Anos de Vida Útil	30
Dias de operação por ano	312
Taxa de juros anuais	7 %

Além disso, é necessário fixar o custo das provisões por pessoa, o salário anual da tripulação, preço por tonelada de combustível e despesas com manutenção. A tabela a seguir apresenta os valores escolhidos para essas variáveis.

Tabela 10 - Valores unitários de diversos custos de operação (WATSON, 1998; MISH et al., 2000).

Descrição	Valor – Dólares US\$
Alimentos e provisões	7 (US \$) / (pessoa x dia)
Salário	36000 (US \$) / (ano x pessoa)
Combustível	100 \$/ Tonelada Combustível
Manutenção	100000(US \$) x P _{systyp}
	100000(US \$) x N _{CARGO}

O salário da tripulação é um item que pode variar consideravelmente com a nacionalidade dos tripulantes e com os seus membros (capitães até auxiliares), sendo o valor utilizado uma simples tentativa para poder avaliar o impacto desta variável nas dimensões principais dos navios projetados. O custo de combustível é um item muito "volátil", que depende de diversos fatores, chegando a ter variações de um país a outro de até 50.5 %, sendo o valor utilizado um custo referencial escolhido para incluir seu efeito - por meio do motor escolhido e tipo de popa - no processo de projeto em estudo.

A parcela que corresponde a manutenção varia amplamente com cada tipo de navio e com as políticas comercias da empresa, sendo o valor da Tabela 10 uma tentativa proposta por Mish et al. para calcular a quantidade de trabalho necessário a se realizar em navio com muitos tanques versus um com poucos tanques.

Em seguida, mostra-se o critério econômico utilizado neste trabalho para realizar a análise de valor presente para cada navio.

2.15.3.1. Critério Econômico

Existem vários critérios econômicos que podem ser usados para comparar alternativas de investimento. Esses critérios levam em conta o valor do dinheiro no tempo, a vida útil do investimento e fatos econômicos, tais como taxas de juros e impostos. O valor do dinheiro no tempo representa o fato que uma soma de dinheiro disponível agora é de maior valor quando comparada a mesma quantidade em um número NN de anos. A expressão usada para trazer ao valor presente uma série constante de pagamentos ou despesas que ocorrerá no futuro é:

$$CSI = \sum_{j=1}^{NN} \frac{1}{(1+i)^{j}}$$
 (2.41)

onde,

NN: número de anos de vida útil;

i: taxa de juros;

j: índice que varia desde 1 até o número de anos de vida útil (NN);

CSI: fator de valor presente.

Como o fator tempo não está sendo considerados nas expressões que estimam o custo de operação, os mesmos serão ponderados como constantes em cada ano. Portanto, multiplicando o custo anual de operação pelo valor do somatório da equação (2.41) resultará o valor presente dos custos de operação, valor que será somado ao custo de construção calculado em 2.15.1. Resumindo, os custos de operação ficam definidos com as expressões apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Custos de operação em US\$.

Custos da Operação Anual (Fixos)			
Descrição	Valor		
Alimentos e provisões	$CSI \times 7 \times N_{TRIPULAÇAO} \times 312$		
Salário	$CSI \times 3000 \times 12 \times N_{TRIPULAÇAO}$		
Manutenção	$CSI \times 100000 \times \left(P_{systyp} + N_{CARGO}\right)$		
Custos Variáveis Anuais			
Descrição	Valor		
Combustível	$CSI \times 100 \times \left(W_{OC} \times \frac{V_{S}}{E} \times 24\right) \times 312$		
Despesas gerais ²⁸	15% Custos Operação, exceto Manutenção		

O custo por ano do item alimentos e provisões resulta da multiplicação dos 7 dólares diários por tripulante pelo número de dias no ano que operará o navio e pelo número de tripulantes, que multiplicado pelo fator de valor presente resultará no valor presente total do custo de alimentos e provisões durante a vida útil do navio. De forma similar para o item salário o produto de 3000 dólares por mês-tripulante por 12 meses e pelo número de tripulantes dá o custo anual que multiplicando por CSI traz o fluxo de dinheiro durante a vida útil do navio ao presente para poder ser adicionado aos demais custos. Da mesma forma, 100 mil representam os dólares anuais gastos em manutenção, que multiplicado por CSI dá a quantidade de dinheiro no presente.

O valor das despesas anuais em combustível resulta na multiplicação das toneladas de combustível consumidas por dia, expressão $W_{oc} \left[Ton \right] \times \frac{V_s}{E} \times 24 \left[\frac{1}{dia} \right]$, que multiplicado por 312 dias resulta as toneladas por ano, para finalmente multiplicar pelo custo de combustível por tonelada (US\$100) e se obter a despesa anual deste item.

²⁸ Portos, rebocadores, custos de canais, etc.

No item a seguir é apresentada a metodologia de cálculo do vazamento médio óleo proposto pela INTERTANKO.

2.16. Avaliação de Risco de Espalhamento de Óleo.

Nas duas últimas décadas aconteceram acidentes de navios petroleiros, que resultaram em vazamento no mar de grandes quantidades de óleo e derivados, ocasionando danos ao meio ambiente marinho e terrestre de magnitudes imensuráveis. Entre os acidentes catastróficos, pode-se citar o caso do navio Exxon Valdez, que resultou no vazamento de 50 mil ton de petróleo no litoral do Alaska em 1989; o caso do navio Prestige na região da Galicia com o vazamento de 77 mil toneladas de combustível em 2002; e o navio petroleiro Volganeft-139, com o vazamento de 2 mil toneladas de óleo no sul da Rússia em novembro do 2007.

Em resposta a estes acontecimentos, as autoridades marítimas criaram regras mais exigentes para construção de navios destinados ao transporte de óleo e seus derivados procurando minimizar futuros vazamentos. A principal mudança foi a exigência de um duplo casco ou construções cujo desempenho enquanto a segurança ambiental seja "equivalente" aos navios com duplo casco.

Por outro lado, IMO tem adotado guias que descrevem os procedimentos para obter aprovação de alternativas de projeto de navios tanques ao padrão que são os duplos cascos. Elas empregam metodologias probabilísticas rigorosas para o cômputo da expectativa de vazamento de óleo na ocorrência de encalhe ou colisão acidental.

Porém, a IMO incentivou o desenvolvimento de metodologias de análise muito mais simples que a descrita anteriormente. Com esse fim, a INTERTANKO propõe uma metodologia para avaliar o vazamento médio de óleo combustível das embarcações, permitindo uma adaptação da metodologia para determinar, de uma maneira fácil, o vazamento de óleo de navios petroleiros, dada uma

ocorrência de um sinistro (encalhe ou colisão), a influência dos arranjos dos tanques no espaço de carga durante a fase de projeto e determinar os custos associados com cada arranjo.

A metodologia de cálculo proposta pela INTERTANKO à IMO em 2002 (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF INDEPENDENT TANKER OWNERS, 2002) é baseada nas seguintes suposições:

- Ocorreu um evento de colisão ou encalhe;
- O casco externo foi rompido.

Assim sendo, o procedimento proposto avalia apenas a conseqüência; estimativa de vazamento de óleo; em situações de encalhe e deriva com rompimento do casco externo, não abordando a probabilidade de ocorrência do evento acidental (colisão ou encalhe).

A especificação do dano a ser considerado e as correspondentes probabilidades de ocorrência é obtida através de um conjunto de funções densidade de probabilidade para a localização da avaria no casco. Desta forma, são fornecidas probabilidades para:

- Localização longitudinal e vertical, extensão longitudinal e vertical e penetração transversal no costado causado por colisão;
- Localização longitudinal e transversal, extensão longitudinal e transversal e penetração vertical no fundo causado por encalhe.

As funções densidade de probabilidade são baseadas em dados históricos de 52 colisões e 63 encalhes de navios petroleiros com peso morto a partir de 30 mil toneladas, coletados pela Lloyd's Register. Todas as variáveis descrevendo situações de dano são assumidas independentes pela falta de dados adequados para definir a sua dependência. Os parâmetros de vazamento são calculados separadamente para colisão e encalhe, para posteriormente serem combinados em uma razão de 40% para colisão e 60% para encalhe. Para os cálculos o navio é assumido carregado ao calado de projeto, sem banda ou trim. Além disso, os tanques de carga estão a 98% da capacidade.

O vazamento médio de óleo é estimado com um parâmetro adimensional

definido da seguinte maneira:

$$OM = \frac{\left(0.4 \times O_{MS} + 0.6 \times O_{MB}\right)}{\nabla_{carqa}}$$
 (2.42)

Onde,

O_{MS}: estimativa de vazamento médio dado a ocorrência de colisão, [m³];

O_{MB}: estimativa de vazamento médio dado a ocorrência de encalhe, [m³];

 ∇_{carga} : volume total da carga, [m³].

O APÊNDICE C descreve detalhadamente o procedimento para calcular $O_{ exttt{MS}}$ e $O_{ exttt{MB}}.$

O procedimento da INTERTANKO foi implementado, acrescentado o artifício proposto por Mish et al. (2000) para generalizar a obtenção das coordenadas longitudinais a ré (X_a) e a vante (X_f) dos tanques do espaço de carga, como se mostra a seguir, assumindo a presença de uma antepara longitudinal no espaço de carga:

Tanques de Carga:

$$\begin{split} X_{a} &= L_{peak}^{popa} + L_{Escolhido}^{Máquina} + L_{COFFERDAM} + LStk + \frac{\left(2N_{CARGO} - i\right) \times LCtk}{2N_{CARGO}} \\ X_{f} &= L_{peak}^{popa} + L_{Escolhido}^{Máquina} + L_{COFFERDAM} + LStk + \frac{\left(2N_{CARGO} - i + 2\right) \times LCtk}{2N_{CARGO}} \end{split}$$

· Tanques Slop:

$$\begin{split} \boldsymbol{X}_{a} &= \boldsymbol{L}_{peak}^{popa} + \boldsymbol{L}_{Escolhido}^{Máquina} + \boldsymbol{L}_{COFFERDAM} \\ \boldsymbol{X}_{f} &= \boldsymbol{L}_{peak}^{popa} + \boldsymbol{L}_{Escolhido}^{Máquina} + \boldsymbol{L}_{COFFERDAM} + \boldsymbol{LStk} \end{split}$$

O valor de L^{popa}_{peak} representa o espaço estimado do peak da popa, que é sugerido pelas sociedades classificadoras (vide item 2.13). L^{Máquina}_{Escolhido} é o comprimento requerido do espaço para praça de máquinas que será definido detalhadamente no item 4.1. O espaço para o Cofferdam, L_{COFFERDAM}, foi definido em 2.13. LCtk e LStk são, respectivamente, os comprimentos dos tanques de carga e dos tanques de Slop. A variável i é o número do tanque em consideração.

3. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Em seguida serão apresentados, de forma sucinta, alguns dos principais métodos da programação matemática; uma discussão do problema de otimização multiobjetivo, justificando a escolha do algoritmo genético a ser utilizado; a descrição dos princípios do algoritmo genético, campo de aplicação, vantagem e desvantagem, codificação das soluções, operadores genéticos, tratamentos de restrições, além do algoritmo implementado e sua validação.

3.1. Introdução ao Problema de Otimização de Navios

Um navio é uma estrutura autônoma muito complexa. A utilização de um modelo matemático para sua representação necessita de um número grande de variáveis independentes invibializando, até recentemente, a sua utilização. A criação de computadores mais velozes e a possibilidade do processamento em paralelo propiciaram mudanças significativas na forma de formular e processar projetos, permitindo ao engenheiro avaliar espaços de busca complexos e de tamanho considerável.

Todos os projetos de engenharia são de fato problemas de otimização. Os problemas da vida real têm mais de uma solução, sendo que o projetista está interessado em obter a solução ótima entre uma população de possíveis soluções, que cumpram certos critérios especificados. A solução ótima é escolhida em função de uma medida de mérito que avalia cada opção no processo de busca. Porém, a procura muitas vezes é realizada basicamente em função da experiência do projetista — processo de busca exaustiva — não garantindo a obtenção da melhor solução. A utilização de uma busca dirigida, utilizando um método de otimização, objetiva resolver esta questão.

É comum na programação matemática empregar certa nomenclatura clássica para definir um problema de otimização, que é apresentada a seguir:

Problema Clássico de Otimização:

$$\begin{array}{l} \text{Max (Min) a função objetivo} \\ & f\left(x_{1}, x_{2}, x_{3}, ..., x_{N}\right) \\ \text{onde} \\ & x_{k}^{\text{min}} \leq x_{k} \leq x_{k}^{\text{max}} \quad k = 1, 2, 3, ..., N \\ \text{sujeito a} \\ & g_{i}\left(X\right) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, ..., M \\ & h_{j}\left(X\right) = 0 \quad j = 1, 2, 3, ..., J \\ & X = \begin{bmatrix} x_{1} & x_{2} & x_{3} & ... & x_{N} \end{bmatrix} \end{array} \tag{3.1}$$

Na definição anterior X é o vetor das variáveis de projeto, N o número de variáveis independentes, M número de restrições de desigualdade e J o número de restrições de igualdade. As variáveis independentes são as variáveis manipuladas pelo processo de otimização e são limitadas a certa faixa de valores, definindo assim um espaço de busca chamado de S. Além disso, elas podem ser contínuas, inteiras ou discretas. As restrições de comportamento estão definidas por g_i e h_i .

Mesmo assim, quando um determinado método é capaz de obter a melhor ou melhores opções para um determinado projeto, é responsabilidade total do projetista a interpretação correta dos resultados, o julgamento de alguma possível inconsistência e a escolha da opção que será levada a uma instância maior do projeto, sendo que a experiência tem um papel relevante nestas decisões.

3.2. Técnicas de Otimização

Existem inúmeras técnicas propostas para resolução de problemas de otimização. Neste sub-capítulo será exposto brevemente uma perspectiva

resumida das principais classes de algoritmos. Para um estudo mais detalhado dos algoritmos de otimização sugere-se Bazarar et al (2000) ou Rao (1996).

A programação matemática consiste em técnicas iterativas para procurar a melhor solução para um problema, que deve ser formulado a partir de suas variáveis independentes, avaliado com uma função objetivo e limitado por um conjunto de restrições. Os algoritmos de otimização propostos na programação matemática fazem duas operações fundamentais, que são: cálculo de uma direção de pesquisa (d_K) e de um passo escalar (α_k) para encontrar o novo ponto solução (X_{k+1}), conhecendo ou assumindo um ponto de partida (X_k), como segue:

$$X_{k+1} = X_k + \alpha_k \times d_k \tag{3.2}$$

O subscrito k refere-se ao número da iteração e varia, a partir de um (1), até satisfazer algum critério de parada ou atingir o limite máximo de iterações estabelecido. Os diferentes métodos propostos diferem pela forma de escolher d_K e α_k .

Os algoritmos desenvolvidos na programação matemática podem ser classificados como indiretos ou diretos. Os métodos indiretos, também chamados de gradiente ou descendentes, não fazem uma comparação direta dos valores numéricos da função de mérito calculada nos pontos de avaliação, mas fazem uso de condições necessárias para que um ponto seja um mínimo ou máximo (Brito 1996). Os métodos indiretos que usam derivadas de primeira e segunda ordem são chamados também métodos de primeira e segunda ordem, respectivamente, devido a que usam derivadas de primeira e segunda ordem da função. Os métodos diretos ou de busca usam diversos pontos no espaço de busca e fazem uma comparação direta dos valores da função objetivo para definir a melhor opção. Estes métodos são chamados também métodos de ordem zero, pois usam derivadas de ordem zero da função.

Os algoritmos de otimização estão claramente definidos para dois tipos de problemas: unidimensional e multidimensional. Em cada caso há métodos diretos e indiretos. Na tabela abaixo se resumem os principais algoritmos:

Tabela 12 - Algoritmos de Otimização Numéricos (RAO, 1996).

	Métodos que não	Dicotomia
	Utilizam Derivadas	Fibonacci
Busca	(Diretos)	Golden Section
Unidimensional		Newton
Gridinensional	Métodos que Utilizam	Quase - Newton
	Derivadas (Indiretos)	Secante
		Ajuste Quadrático por 3 Pontos
		Minimização Cíclica na Direção
	Métodos que não Utilizam Derivadas (Diretos)	dos Eixos de Coordenadas
		Simples
		Hooke e Jeeves
Busca	(5110100)	Rosembrock
		Powell
Multidimensional		Newton e Quase Newton
	Métodos que não	Gradiente
	Utilizam Derivadas	Gradientes Conjugados
	(Indiretos)	Fletcher - Reeves
		Davidon, Fletcher e Powell

Os métodos diretos são mais apropriados para problemas simples, envolvendo relativamente "poucas" variáveis. Os métodos diretos são, em geral, menos eficientes que os métodos indiretos, já que estes últimos usam mais informação da função a ser otimizada (através das derivadas). Porém, para problemas da vida real são poucas vezes que se conhece em forma explicita a função objetivo e mais ainda as suas derivadas, motivo pelo qual a maioria de trabalhos ou publicações técnicas nesta área emprega os métodos diretos como algoritmo de otimização.

Quanto à convergência dos métodos unidimensionais e multidimensionais, diferentes condições das funções analisadas devem ser assumidas para garantir a convergência global. Os métodos unidimensionais admitem que as funções são unimodais (presença de só um ótimo no intervalo de procura) para formular as seqüências de busca e a hipótese de função convexa deve ser feita para garantir a convergência destes métodos. A convergência global para problemas multidimensionais fica condicionada para certas características da função objetivo e do espaço de busca. Por exemplo, para os métodos de Davidon, Fletcher e Powell, Gradiente, Gradientes Conjugados e Fletcher-Reeves é garantida a convergência global para funções quadráticas.

Quanto à eficiência, entre os métodos unimodais, Fibonacci tem mostrado ser mais eficiente método direto em procurar o mínimo (máximo) de uma função onde é conhecido o intervalo inicial de busca. Na carência de um intervalo inicial, espera-se que o ajuste quadrático ou Quase - Newton seja mais eficiente quando as derivadas das funções não são conhecidas. Espera-se que, quando a primeira derivada da função a ser otimizada esteja disponível, o método da secante seja mais eficiente. Por outro lado, se a primeira e segunda derivada estão disponíveis, o método de Newton será o mais eficiente em encontrar o ótimo (RAO, 1996).

O método de Hooke e Jeeves tem sido utilizado na Engenharia Naval com bons resultados por Nowacki e Swift (1970) e Brito (1996). Este método utiliza buscas exploratórias em cada uma das direções dos eixos coordenados seguida de uma busca direcional — uma movimentação acelerada na direção do mínimo da função de mérito. Brito conclui que o algoritmo de Hooke e Jeeves pode ser conveniente em situações onde já se tem o projeto ótimo e por alguma razão esse deverá sofrer pequenas alterações. Assim sendo, o algoritmo é muito eficiente se o ponto de partida estiver próximo ao ponto ótimo e o passo escalar, a ser utilizado na busca unidirecional, possuir valores suficientemente pequenos para não se afastar muito desse ponto ótimo.

Os métodos apresentados são propostos para problemas sem nenhum tipo de restrição. As técnicas para abordar problemas com restrições serão explicadas mais a frente deste capítulo (item 3.4.6).

3.3. Problemas de Otimização com Múltiplos Objetivos²⁹

A maioria dos problemas do mundo real envolve otimizar várias funções objetivo, que usualmente são conflitantes³⁰. Isto é, a tomada de decisão não está baseada em critérios isolados ou independentes. Qualquer seleção entre alternativas envolve minimizar ou maximizar todos os critérios ao mesmo tempo, mas isso nem sempre é possível. Há circunstâncias onde um critério domina os demais facilitando a tomada de decisão, porém esta não é a situação usualmente encontrada no campo das engenharias.

Em situações onde a decisão não é "trivial" pode ser realmente complexa a definição de uma relação direta entre os objetivos envolvidos. A definição do ótimo em situações complexas com objetivos conflitantes é objeto de estudo da otimização multi-critério. Assim, para a definição da solução é requerida uma forma de se diferenciar candidatos superiores e inferiores durante a busca.

Para problemas com um único objetivo é fácil definir a melhor opção entre dois candidatos, entretanto tal definição do "melhor" não é apropriada na presença de vários objetivos. Para tal surge o conceito de dominância.

Segundo Camponogara e Talukdar (1997), o conceito de dominância pode ser apresentado como: sejam X_1 e X_2 duas soluções viáveis de um problema de otimização multidimensional com N objetivos. Uma solução X_1 é fortemente

²⁹ O termo múltiplos objetivos, múltiplos critérios são entendidos como sinônimos

³⁰Um típico problema em engenharia com objetivos conflitantes é minimizar o peso e maximizar as freqüências naturais de uma estrutura, porém a medida que se reduz o peso se reduzem também as freqüências naturais.

não-dominada por uma solução X2 se, e só se, as seguintes condições são

atendidas:

- 1. $\forall i \in (1,...,N): f_i(X_1) \leq f_i(X_2)$
- 2. $\exists i \in (1,...,N): f_i(X_1) < f_i(X_2)$

A condição dois anterior resolve os casos de uma possível igualdade de um ou vários objetivos. A seguir define-se o conceito de ótimo de Pareto apresentado por Vilfredo Pareto em 1896 e que constitui a origem da otimização multiobjetivo.

Definição: Diz-se que uma solução **x** é um ótimo de Pareto se, e só se, não exista uma solução y que cumpra as duas condições de dominância descritas anteriormente.

Em outras palavras, a definição anterior diz que uma solução é ótima de Pareto se não existe outra solução viável que melhore todos os objetivos simultaneamente, ou seja, a melhora de um objetivo provoca uma degradação simultânea em pelo menos um outro objetivo. Assim, todas as soluções nãodominadas do espaço de busca S formam o conjunto ótimo de soluções que definem a fronteira de Pareto no espaço definido pelas funções objetivo. A fronteira ótima de Pareto pode ser convexa, não convexa, contínua ou descontinua. Na figura seguinte há um exemplo da fronteira de Pareto para um caso bidimensional.

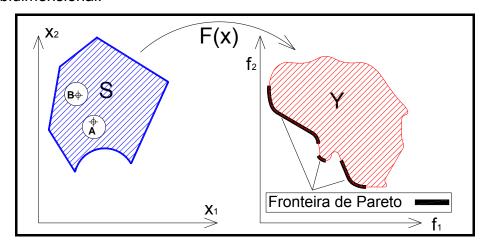


Figura 3.1: Fronteira de Pareto para um problema 2D.

Métodos de Otimização

Assim um ponto **A** é uma solução não-dominada e pertence à fronteira de Pareto se não existir nenhum outro ponto **B**, tal que **B** domine **A**. Em geral, para cada região viável S existe um subconjunto de S que têm soluções não-dominadas, conhecidas como ótimos de Pareto.

Um exemplo simples de otimização multiobjetivo proposto por Shaffer (1824) é apresentado para ilustrar as definições anteriores. O problema é formado por funções a serem minimizadas:

Minimizar
$$f_1(x)=x^2 \qquad \& \qquad f_2(x)=\left(x-2\right)^2$$
 onde
$$x\in S$$

$$S=\left\{x/-\infty \leq x \leq \infty\right\}$$

A Figura 3.2 apresenta o gráfico das funções f_1 e f_2 . Observa-se nesta figura que as soluções ótimas de Pareto ficam no intervalo $0 \le x \le 2$, já que fora desta região -x>2 x<0 - as duas funções aumentam rapidamente de valor.

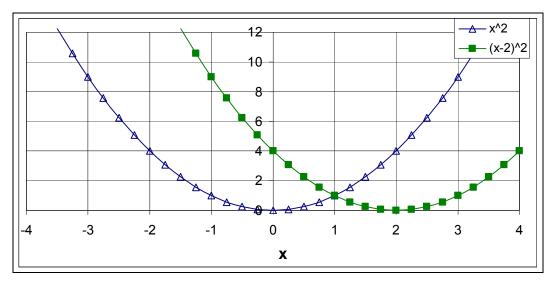


Figura 3.2: Funções teste do problema proposto por Shaffer.

No intervalo $0 \le x \le 2$ pode ser observado que as funções se compensam uma a outra: quando uma diminui a outra aumenta. Geralmente, usa-se um gráfico

definido pelas funções objetivo para identificar com facilidade a fronteira de Pareto (vide Figura 3.3).

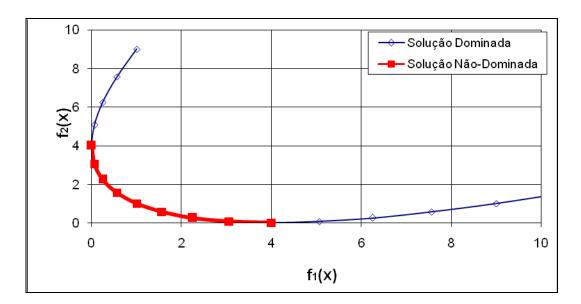


Figura 3.3: Fronteira de Pareto diferenciada.

Como pode ser observada na figura anterior, a curva de traço grosso é a fronteira de Pareto do problema, sendo esta região onde se define claramente o conceito de dominância, ou seja, não existem soluções que melhorem (diminuam) todos os objetivos simultaneamente.

Nem sempre é tão fácil identificar o conjunto ótimo de Pareto e sua fronteira. Para tanto existem técnicas computacionais desenvolvidas para obter a resposta de problemas muito complexos, sendo uma delas descrita no próximo item.

3.4. Algoritmos Genéticos e Estratégias Evolutivas

Os algoritmos genéticos (AGs) e as estratégias evolutivas (EE's) podem ser classificados como subáreas da computação evolucionária, sendo esta última um ramo da inteligência computacional que busca criar sistemas inteligentes que simulem certas características do homem, por exemplo, o aprendizado ou

a adaptação. Ambos têm fundamento estocástico, inspiradas nos mecanismos de evolução e da genética. Geralmente, um algoritmo genético usa uma representação binária das variáveis independentes e uma estratégia evolutiva emprega números reais. Michalewicz³¹ apud Shahak (1998) define os algoritmos ou estratégias evolutivas como uma generalização dos algoritmos genéticos.

Por outro lado Whitley (1994) define o algoritmo genético como um modelo baseado na população, que usa operadores de seleção e recombinação para gerar um novo conjunto de pontos no espaço de busca. Além disso, de maneira rigorosa, o termo algoritmo genético refere-se ao modelo introduzido por John Holland (1975). Muitos modelos de algoritmos genéticos têm sido introduzidos pesquisadores, aportando muito trabalho com uma perspectiva experimental, onde seu interesse é utilizar o AG como uma ferramenta de otimização. Shahak (1998) usou indistintamente a nomenclatura de algoritmo genético ou algoritmo evolutivo, consideração que será seguida nesta pesquisa de maneira similar.

Não é o objetivo deste trabalho fazer uma análise profunda e rigorosa da técnica dos algoritmos evolutivos ou estratégias evolucionárias, mas apresentar as idéias básicas desta metodologia, mostrar suas vantagens e facilidades para a resolução de problemas multidimensionais não lineares, com múltiplos objetivos e restrições de qualquer forma. São recomendados os livros de autoria de Goldberg (1989) ou de Gen e Cheng (1997) para iniciantes nesta área e as dissertações de Shahak (1998) e Thomas (1998), apresentadas no MIT³² para aplicações navais dos algoritmos genéticos para problemas com um objetivo e vários objetivos, respectivamente. Assim também, recomenda-se o trabalho de doutorado de Gammon (2004) da Universidade Técnica de Yildiz de Istanbul-Turkia, onde é utilizado um algoritmo evolucionário para otimizar as formas do casco empregando atributos hidrodinâmicos para avaliar a performance de cada navio.

³¹ Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1992.
 ³² Massachusetts Institute of Technology

Nos próximos itens 3.4.1 até 3.4.6 serão descritos os algoritmos genéticos, apresentando seus fundamentos, campo de aplicação, vantagens e desvantagens, a representação do cromossomo assim como o espaço solução, os operadores genéticos e o método de tratamento das restrições.

3.4.1. Idéia Básica dos AGs

A idéia básica dos algoritmos genéticos é explorar uma população inicial de indivíduos para, baseado no princípio de sobrevivência do mais apto, selecionar as melhores soluções e evoluí-las pela aplicação de operações genéticas, tais como cruzamento e mutação. Para uma boa compressão do texto que segue é necessário definir os seguintes termos, que são comumente empregados nos AGs:

- Cromossomo: cadeia de valores representando as variáveis de projeto e, portanto, uma solução do problema. Ocasionalmente o cromossomo é chamado indivíduo;
- Gene: é a unidade básica do cromossomo e, portanto descreve certa variável do problema, isto é, representa e controla certa característica do problema;
- População: conjunto de cromossomos de tamanho finito;
- Gerações: número total de iterações a serem executadas;
- Operadores Genéticos: operações aplicadas ao cromossomo;
- Função Aptidão: provê uma medida da performance de cada cromossomo.

As operações básicas de um algoritmo genético e sua seqüência lógica de processamento são mostradas no seguinte fluxograma:

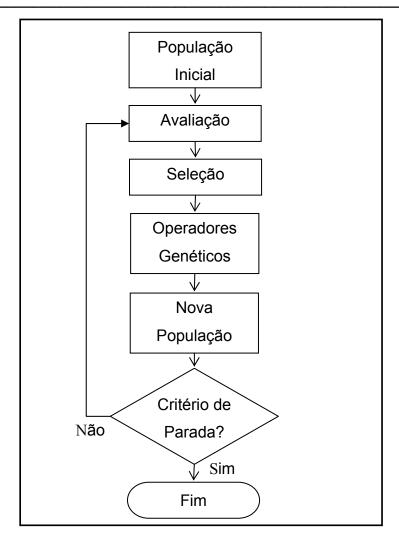


Figura 3.4: Sequência lógica de processamento em um AGs.

O processo começa com uma população de tamanho finito (N_{POP}) , a seguir cada cromossomo é avaliado através do modelo matemático do problema para determinar seu respectivo desempenho. Neste trabalho, o modelo matemático mencionado acima constitui o modelo paramétrico descrito no capítulo 2 que se resume no cálculo do custo e vazamento médio de óleo como meio de avaliar a performance de cada cromossomo. Estas duas medidas dirão quão bom ou ruim é um cromossomo.

Depois de ter avaliado a população é aplicado um procedimento para selecionar os indivíduos que formarão a nova população. O esquema de seleção é probabilístico, isto é, não escolhe o melhor, mas dá melhores chances aos cromossomos com boa performance para sobreviver. Os indivíduos com melhores aptidões são selecionados para ir a uma etapa

posterior do processo de otimização, enquanto indivíduos com aptidões ruins possivelmente morrerão. Este esquema de seleção permite manter na próxima geração certa informação importante que pode estar presente em algum cromossomo relativamente ruim. O esquema de seleção assim definido, pode escolher mais de uma vez um cromossomo. Desta maneira, a próxima geração deve ser melhor, em média, de acordo com o esquema de seleção.

Com a finalidade de explorar o espaço de busca são aplicados operadores genéticos de cruzamento e mutação nos indivíduos que foram selecionados e que formaram a nova população. Esses operadores são uma imitação artificial da reprodução. Recombinação é o processo de criar novos indivíduos – filhos – mediante a mistura de genes de dois cromossomos diferentes – pais – e alguma pequena probabilidade de mutação. Os filhos colocados na população e são avaliados. Estas operações são repetidas até que um critério de parada seja obtido, tal como um número de gerações sem melhora ou um objetivo prédefinido.

Está teoricamente e experimentalmente comprovado que AGs provêem uma busca robusta num espaço complexo (WHITLEY, 1994). A robustez dos algoritmos genéticos é avaliada através do balanço entre sua eficácia e eficiência. A robustez de um algoritmo genético pode ser quantificada por suas qualidades exploratórias e de eficiência. Exploração se refere a sua capacidade para analisar o espaço de busca e encontrar o ótimo global. A eficiência se refere ao esforço requerido para identificar o ótimo global. Um balanço adequado entre essas qualidades define um algoritmo robusto, sendo ela uma característica dos algoritmos genéticos

Em um algoritmo genético deve-se obter um balanço entre exploração e prospecção. A exploração refere-se a buscar pontos inteiramente novos no espaço viável, enquanto a prospecção refere-se a utilizar informação de pontos anteriormente visitados a fim de encontrar melhores pontos, isto é, o algoritmo deveria explorar os melhores indivíduos para chegar a uma solução ótima. Os AGs combinam prospecção e exploração simultâneamente com as operações de "seleção" e "cruzamento e mutação", respectivamente.

A diversidade da população é uma variação das características de exploração. Quanto maior o tamanho da população envolvida, maior será a informação genética processada e, portanto, menores as chances de se perder informação genética importante no início do algoritmo. A exploração do espaço de busca é mais eficiente, pois conta com a presença de dados para aprender e manter uma melhor visão do espaço solução.

Uma característica importante que define o comportamento dos AGs é a pressão de seleção implícita em cada metodologia de seleção, o que as caracteriza e difere. O termo pressão de seleção indica a força com que se está selecionando os indivíduos que formarão a próxima população dentro do processo de otimização. Para uma extensa exploração do espaço de busca a pressão de seleção deve ser incrementada e para se concentrar em poucos indivíduos a pressão é diminuída. A definição formal da pressão de seleção empregada em genética é a variação na aptidão média da população induzida pelo método de seleção (CAVALCANTI, 1999). A expressão da pressão de seleção (PS) é dada por:

$$P_{S} = \frac{\overline{F} - F}{\sigma} \tag{3.3}$$

Sendo,

F: aptidão média da população;

F: valor esperado da aptidão média após a seleção;

σ: desvio padrão dos valores de aptidão da população antes da seleção.

A pressão de seleção pode ser regulada com a metodologia empregada para escolher os indivíduos da próxima geração. As diferentes formas de seleção serão analisadas no item 3.4.5.1.

3.4.2. Campo de Aplicação dos AGs

Os algoritmos genéticos têm sido aplicados em uma vasta gama de áreas, tais como Economia, Computação, Engenharia, Biologia, Ciências Sociais, Ecologia. Goldberg (1989) apresenta uma tabela resumindo os principais e mais relevantes trabalhos que usam AGs, destacando área de pesquisa, ano, autor e breve descrição do trabalho.

Graças ao sucesso daquelas áreas, viabilizou-se o desenvolvimento dos AGs, chegando a ser um campo de grande relevância na investigação. A possibilidade dos AGs fazerem uso da computação paralela, que se apresenta como alternativa para a resolução de problemas que envolvem tarefas grandes e complexas, aumenta significativamente o campo de aplicação dos AGs.

A principal meta ao usar uma abordagem paralela para um algoritmo é melhorar o tempo de computação reduzindo o tempo de processamento global. Segundo Barbosa e Lage (2007) há duas formas de escrever um algoritmo paralelo:

- Paralelismo de dados: uma mesma tarefa é alocada aos diversos processadores, dividendo o espaço de busca de uma solução conforme a disponibilidade de processadores;
- Paralelismo funcional: tarefas diferentes são alocadas aos processadores, podendo existir um grupo de processadores responsável por certa tarefa. Torna-se requisito a sincronização da comunicação entre os processadores para que suas interações produzam o resultado da computação.

No contexto dos AGs é possível implementar os dois tipos de paralelismos, sendo todas as tarefas (avaliação da função objetivo, seleção, cruzamento e mutação) plausíveis de paralelizar. Esta possibilidade – paralelismo – faz dos AGs uma ferramenta muito mais poderosa na resolução de uma grande

quantidade de problemas do mundo real, tornando seu campo de aplicação bastante extenso.

3.4.3. Vantagens e Desvantagens dos AGs

Os algoritmos genéticos não são necessariamente mais precisos que outros métodos. É importante conhecer suas vantagens e limitações, além do seu desempenho quando comparado a outros métodos para fundamentar a sua utilização. Logo, são descritas as principais vantagens e desvantagens dos algoritmos genéticos:

Vantagens

- Não são necessários conhecimentos específicos do problema a ser resolvido. Por este motivo, diz-se que os AGs são cegos;
- São capazes de otimizar funções descontínuas e fortemente não lineares em grandes espaços de busca, complexos e pouco entendidos;
- São aplicáveis a uma grande variedade de problemas apresentando um bom desempenho;
- Apresentam convergência pouco sensível à população inicial;
- São globalmente convergentes, isto é, resistentes a se prenderem a ótimos locais:
- São robustos, apresentando balanço eficiente entre exploração do espaço de busca e prospecção das melhores soluções para direcionar o processo na obtenção do ótimo;
- São de fácil implementação e proporcionam maior flexibilidade no tratamento do problema.

Desvantagens

 São necessárias muitas avaliações da função aptidão o que pode exigir grande esforço computacional;

- Se não são considerados operadores adicionais, que serão explicados mais adiante neste capítulo, é possível ocorrer uma convergência prematura, devido ao excessivo número de filhos de um mesmo indivíduo (super-indivíduo), trazendo uma perda de diversidade.
- Deriva genética por desaparecimento de genes na população devido ao acaso, principalmente para pequenas populações.
- Não possuem uma alta precisão para encontrar os valores ótimos, sendo necessária a utilização de algoritmos híbridos, utilizando outras técnicas de busca locais para chegar a respostas mais exatas;
- Muitas possíveis configurações dos parâmetros que definem um AGs.

Com o exposto até aqui os AGs são recomendados para o trabalho em desenvolvimento, tendo os cuidados de considerar todos operadores necessários para garantir que se obterá a resposta procurada, que para esta pesquisa é encontrar a fronteira ótima de Pareto que defina todas as soluções viáveis ótimas, chegando desta maneira a conhecer as dimensões principais para um navio petroleiro.

3.4.4. Representação do Cromossomo e do Espaço Solução

Um componente que é dependente do problema em um AGs é a codificação das variáveis de projeto, isto é, cada problema terá sua melhor forma de representar as variáveis independentes.

Existem várias formas de representar as variáveis em um AGs. Por exemplo, é comum usar uma representação binária dos parâmetros, isto é, uma cadeia de "0" e "1" forma o vetor de projeto. Outra possível representação é usar números reais.

A representação binária é historicamente importante por ter sido empregada nos trabalhos pioneiros feitos por Holland em 1975. Esta representação é fácil

de usar, manipular e simples de analisar teoricamente. Goldberg apud Beasley; Bull e Martin (1993) argumentam que, teoricamente, uma representação binária dá o maior número de esquemas³³ e assim provém o maior grau de paralelismo implícito, característica vital nos AGs.

Contudo, a representação binária sofre certas desvantagens quando é utilizada em modelos de alta precisão multidimensional, onde são necessários cromossomos muitos compridos para representar todas as variáveis de projeto com a precisão requerida. Portanto, para esses problemas usa-se uma representação com número flutuante ou de número real. O cromossomo toma a forma de um vetor, cujos membros são os genes. O comprimento é muito menor que na forma binária. Representação com número flutuante oferece exatidão sem nenhum custo computacional adicional. A exploração com esta representação é contínua porque os genes podem ter qualquer valor dentro de seus limites.

Utilizando a representação com número flutuante, cada faixa definida para as variáveis independentes³⁴ é divida em partes igualmente espaçadas segundo a seguinte expressão:

$$N^{i} = \left(X_{\text{max}}^{i} - X_{\text{min}}^{i}\right) \times 10^{k} \tag{3.4}$$

Onde:

X_{max}: limite superior do parâmetro i;

X_{min}: limite inferior do parâmetro i;

k: quantidade de casa decimal requeridas para o parâmetro i;

N¹: número de divisões adotado para cada gene.

Por exemplo, se for definida uma precisão de três dígitos decimais, k=3, para o coeficiente bloco, cuja faixa escolhida foi de 0.7 até 0.9, a equação anterior

31.1.

³³Um esquema é um padrão de valores representando similaridades entre a população de cromossomas. Eles são usados para analisar os efeitos das transformações do material genético realizado pelos oparadores nos indivíduos da população ³⁴As variáveis independentes para o problema objeto deste trabalho foram apresentados no

³⁴As variáveis independentes para o problema objeto deste trabalho foram apresentados no capitulo 2.

resultará em 200 divisões, uma vez que o parâmetro C_B permitiria os valores 0.700, 0.701, 0.702,..., 0.899, 0.900.

Para cada um dos parâmetros escolhidos para representar o navio deve-se definir o número de posições decimais requeridas. Como dito anteriormente, a representação com números reais é contínua, mas existe restrição com respeito ao tempo de execução. Ao especificar a precisão dos cromossomos se reduz o número de soluções possíveis, diminuindo o tempo de execução do algoritmo. Portanto, pela inviabilidade de fazer uma busca exaustiva no espaço todo, por causa do tempo relacionado ao tal tipo de busca, é necessário estabelecer um espaço discreto para os parâmetros de projeto escolhidos. Na Tabela 13, mostram-se os valores de N adotados nesta pesquisa.

Tabela 13 - Limites do espaço de busca e número de divisões adotadas para cada gene.

Gene	Valor Mínimo	Valor Máximo	Divisões
	(a)	(b)	(N)
C _{LB}	5	7	20
C _{BT}	2	4	20
C _B	0.7	0.9	200
h _{db}	1	4	30
W	1	4	30
N _{CARGO}	4	8	4
P _{systyp}	1	2	1
N _{POPA}	1	2	1
ManFac	0.5	1.0	50
H _{DK}	2	3	10

Pode ser observado que o parâmetro N_{CARGO} está limitado a valores inteiros discretos (4,5,6,7,8), enquanto as variáveis P_{systyp} e N_{POPA} podem ter dois valores (1 ou 2). Assim, a população inicial e a de cada geração estão definidas pelos valores limites de cada variável independente e o número de divisões (N)

adotado para cada gene. Os valores dos parâmetros durante o processo de otimização são obtidos com a seguinte expressão:

$$X^{i} = X_{min}^{i} + RANDON(\#) \times \frac{\left(X_{max}^{i} - X_{min}^{i}\right)}{N^{i}}$$
(3.5)

Onde,

RANDON (#): número aleatório inteiro com uma distribuição uniforme no domínio [0,Nⁱ]

i: índice que identifica a variável de projeto considerada.

Para obter o número aleatório inteiro definido acima se usa o número aleatório gerado pelo computador, que está no intervalo [0,1], e se multiplica pelo valor de Nⁱ de cada parâmetro e por último deve se usar uma função de arredondar ao interior mais próximo. Portanto, os genes de cada cromossomo estão definidos na população inicial por um número aleatório distribuído normalmente no intervalo [0,1]. A figura seguinte mostra uma simulação de possíveis valores iniciais aleatórios para o vetor de projeto e emprega a equação (3.5) e os valores da Tabela 13, resultando nos valores finais das variáveis de projeto.

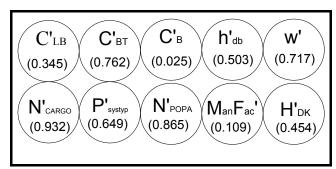


Figura 3.5: Simulação dos valores Iniciais aleatórios do vetor de projeto para um indivíduo.

Finalizando, o processo modifica em cada iteração – por meio dos operadores genéticos a serem descritos no próximo item – o valor desses genes escolhidos aleatoriamente ao início do processo em busca da melhor região e obter a combinação que gere os valores ótimos de Pareto do problema em estudo.

3.4.5. Operadores Genéticos

O algoritmo genético desenvolvido por Holland em 1975 usa um operador básico para criar novas soluções e explorar eficientemente o espaço de busca e um operador adicional para selecionar os melhores indivíduos que formarão a próxima geração, explorando assim a informação contida nessas soluções. A seguir é feita uma análise descritiva das versões mais relevantes dos operadores propostos nos AGs.

É importante mencionar neste ponto a diferença conceitual entre função aptidão e função objetivo. A função objetivo está definida pelas funções do problema multiobjetivo que está sendo resolvido, enquanto a função aptidão é uma métrica criada para avaliar a performance de cada indivíduo da população. Portanto, problema com uma função objetivo se associa a aptidão de uma solução ao valor da função objetivo. Enquanto para problemas com múltiplos critérios torna-se necessário definir um índice dependente das funções de mérito para avaliar o desempenho de cada solução.

3.4.5.1. Operador de Seleção

O esquema de seleção baseia-se no princípio da evolução, isto é, sobrevivência dos melhores indivíduos ou dos mais aptos a um determinado meio. Há diversos esquemas propostos para escolher os indivíduos que formarão a próxima geração em um AG. Na seqüência, alguns dos esquemas de seleção mais empregados serão analisados.

O primeiro esquema a ser analisado é a seleção proporcional à aptidão usando uma roleta para escolher os indivíduos que formarão a próxima população. A roleta tem um número de divisões igual ao tamanho da população, uma divisão por cada indivíduo. A probabilidade de sobrevivência de cada indivíduo (P_i) é

representada pela área de cada divisão, cujo tamanho é função do valor da função aptidão de cada indivíduo, como segue:

$$P_{i} = \frac{Aptidao(X_{i})}{\sum_{i=1}^{N_{POP}} Aptidao(X_{i})}$$
(3.6)

Desta forma, a probabilidade é diretamente proporcional ao valor da função aptidão. Uma roleta com os valores de probabilidades de sobrevivência para uma população de 10 indivíduos é ilustrada na figura que segue:

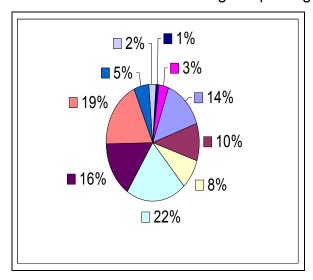


Figura 3.6: Exemplo de distribuição de probabilidades usando uma roleta.

A roleta é girada um número de vezes igual ao tamanho da população e em cada giro um cromossomo é selecionado para formar a próxima geração. O processo é implementado artificialmente usando a definição da função acumulada de probabilidade:

$$q_i = \sum_{j=1}^{N} P_j \tag{3.7}$$

Está função dá a cada indivíduo uma faixa de valores cuja largura é a probabilidade de seleção. A probabilidade acumulada varia entre os valores de P_j do primeiro indivíduo até 1. Os limites de cada faixa são q_{i-1} e q_i e a largura da faixa i é q_i-q_{i-1}. Simulando a roleta, o computador gera um número aleatório distribuído uniformemente entre 0 e 1 e o cromossomo para o qual o número gerado cai em sua faixa é selecionado para reprodução. O processo é repetido até obter o tamanho da população.

O procedimento descrito anteriormente apresenta certos problemas de estagnação quando o processo está avançado, diminuindo a pressão de seleção entre aptidões similares. A desvantagem anterior é produto da alta variância do método, podendo levar a um grande número de cópias de um bom cromossomo, sem necessidade de ser o ótimo global, diminuindo a diversidade da população. O modelo é fortemente dependente da escala da função aptidão, isto é, se a diferença entre os valores da função de aptidão dos indivíduos menos aptos quando comparados aos mais aptos não é significativa, cromossomos ruins terão grandes probabilidades de sobreviver ao processo de seleção. Isto é um típico caso de pobre prospecção dos melhores indivíduos. Ao invés de usar a boa informação genética, o processo lhe ignora, e realmente conduz uma busca randômica através do espaço de busca.

Em terminologia dos AGs, o problema é referido como "problema de escalonamento". Em função disso, certas técnicas de escalonamento foram desenvolvidas para melhorar o processo descrito anteriormente. Goldberg (1989) propõe um escalonamento linear como segue:

$$f' = a \times f + b \tag{3.8}$$

Onde,

f': valor da função aptidão escalonada;

f: valor da função aptidão original;

a,b: coeficientes dependentes do problema.

Um procedimento diferente é designar uma probabilidade de sobrevivência que segue uma distribuição geométrica. O processo ordena os cromossomos em uma ordem descendente de acordo com a sua aptidão e associa a cada indivíduo uma probabilidade de sobrevivência baseado na sua posição. O melhor cromossomo recebe a primeira posição e o pior a última. Assim, o processo de seleção é baseado na ordem. A probabilidade de seleção de cada indivíduo (P_i) é dada pela seguinte equação:

$$P_{i} = A_{1} \times P_{S}^{i-1} \tag{3.9}$$

Onde,

i: índice que representa cada indivíduo;

Ps: pressão de seleção;

A₁: variável dependente do problema.

Desta maneira, a função probabilidade de seleção é uma série geométrica decrescente e para que seja convergente o valor de P_s deve estar no intervalo [0,1]. A soma de todas as probabilidades deve ser igual a um. Assim, A_1 é uma variável dependente obtida da seguinte maneira:

$$A_1 = \frac{1 - P_s}{1 - P_s^{N_{POP}}}$$
 (3.10)

onde N_{POP} é o tamanho da população.

Quanto mais próximo de 1 é o valor de P_s , mais uniforme é a probabilidade. No limite, P_s =1, todos os indivíduos recebem o mesmo valor de probabilidade e a seleção é totalmente randômica. Quando P_s se aproxima a zero, A_1 tende a 1, enquanto o processo se focaliza em poucos elementos (aumento da prospecção). A seguir mostra-se a variação de A_1 com P_s e com o tamanho da população.

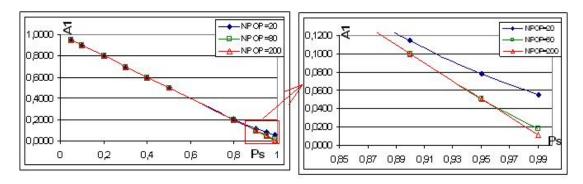


Figura 3.7: Variação de A1 com a pressão de seleção.

A pressão de seleção (P_s) controla a seleção, quanto mais próxima for de zero, mais elitista será a seleção; quanto mais próxima for de um, mais randômica será a seleção. A Figura 3.8 mostra a probabilidade de sobrevivência em função da posição, sendo que a posição um representa o cromossomo que tem a melhor aptidão e para diversos valores de pressão de seleção. Uma pressão de 0.80 é muito elitista, isto é, a probabilidade de mais da metade dos

indivíduos da população é quase nula e só poucos cromossomos sobrevirão com este valor de $P_{\text{\tiny S}}$

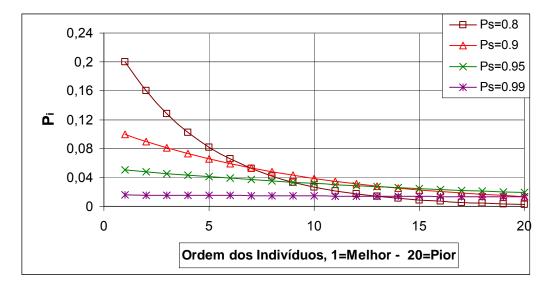


Figura 3.8: Probabilidade de sobrevivência para diferentes pressões de seleção.

No outro extremo, P_s = 0.99, a curva é praticamente um valor quase constante de probabilidade de sobrevivência para todos os elementos, sem considerar os respectivos valores da função aptidão.

Shahak (1998) sugere usar uma pressão de seleção não constante, como meio de impor maior pressão de seleção ao final do processo quando o processo está convergindo e menor pressão de seleção ao início do processo quando a exploração do espaço de busca deve ser mais agressiva. Com este intuito, o autor sugere:

$$P_{S} = -0.06 \times \frac{Ger}{N_{GER}} + 0.98 \tag{3.11}$$

onde:

Ger: geração atual;

N_{GER}: número máximo de gerações.

O seguinte modelo de seleção a ser analisado é o proposto por Baker (1987). Toda a população é explorada coletando variada informação genética desta maneira. O modelo também faz uso de uma roleta, mas com divisões alocadas de acordo a aptidão incorporando N_{POP} marcadores separados igualmente e só

uma rodada da roleta. Os numerosos marcadores uniformemente distribuídos garantem diversidade na seleção – ainda dependente da área da divisão, isto é, indivíduos com boa aptidão têm maiores chances de obter mais cópias.

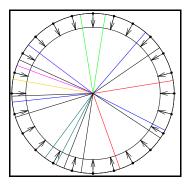


Figura 3.9: Roleta usada por Barker com N_{POP} marcadores igualmente separados.

Este método é conhecido como "Stochastic Universal Sampling" ou Amostragem Universal Estocástica. Esta metodologia foi adotada por muitos pesquisadores como um padrão. Shahak (1987) fez uma simulação desta metodologia de seleção, obtendo os resultados apresentados na figura a seguir.

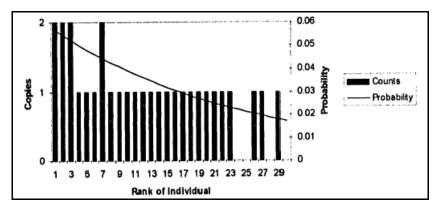


Figura 3.10: Seleção experimental de acordo ao algoritmo de Baker (Shahak 1998).

Exceto por dois cromossomos ruins, todos eles têm sido seletos: os três primeiros (mais o sétimo) indivíduos foram escolhido duas vezes para refletir a sua superioridade quando comparada aos demais indivíduos. Desta maneira, mostra-se que o processo de seleção de Baker segue o esquema de seleção da roleta, bons indivíduos obtêm mais chances de viver e se reproduzir (dependente da largura da faixa), mas explora eficientemente a informação genética armazenada em toda a população.

O quarto modelo de seleção a ser analisado é o do Torneio. É um dois mais simples para ser implementado em um programa de computador e apresenta bons resultados. O modelo consiste em realizar um torneio entre um grupo de mais de um indivíduo (N_{TORNEIO}) escolhido aleatoriamente na população, sendo que cada indivíduo pode participar de mais de um torneio. O cromossomo com melhor desempenho no grupo é selecionado. Assim o processo se repete até encher o grupo de reprodução. As vantagens desta metodologia são:

- Não é preciso estabelecer uma função de probabilidades;
- Não provoca convergência prematura;
- Combate a estagnação;
- Nenhum esforço computacional adicional, tipo ordenamento, é necessário;
- Controla a diversidade da população por meio de uma menor pressão de seleção.

O último modelo de seleção analisado é o modelo Elitista. O modelo copia os melhores indivíduos da população corrente para a próxima geração, conservando os melhores indivíduos e sua informação genética. O número de indivíduos a serem copiados é um parâmetro pré-determinado, sendo assim um dado de entrada do problema. O modelo é combinado com outros métodos de seleção na tentativa de aumentar a velocidade de convergência.

A principal vantagem é garantir que não se perca o melhor indivíduo ou os melhores indivíduos durante o processo de evolução. A desvantagem é que pode gerar uma possível convergência prematura pela presença de um superindivíduo que sature a população.

3.4.5.2. Operador de Cruzamento ou Recombinação

O operador de recombinação cruza dois cromossomos, chamados de pais, selecionados aleatoriamente entre aqueles que passaram pelo filtro de seleção. A decisão se dois cromossomos vão ser pais ou não depende da probabilidade de cruzamento (Pc). Este parâmetro predefinido determina o valor médio esperado de cromossomos que irão sofrer uma recombinação. Um casal é escolhido se um número aleatório uniformemente distribuído no domínio [0,1] é menor ou igual a probabilidade de cruzamento. Quanto maior probabilidade de cruzamento mais casais serão recombinados para produzir cromossomos (filhos) em busca de melhores soluções. Casso o número aleatório for superior a P_c não ocorre o cruzamento e os indivíduos passam a compor a nova geração sem aliteração em seu genes.

Existem diferentes formas de realizar a troca de informação entre dois cromossomos. Na sua forma mais simples, conhecida como cruzamento de um ponto, os pais tem seus cromossomos cortados em posição aleatória, gerando duas caudas e duas cabeças que são recombinadas (vide Figura 3.11).

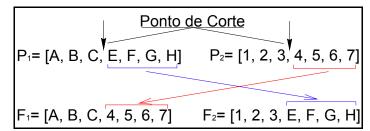


Figura 3.11: Ilustração do processo de cruzamento com um ponto.

O número aleatório deve estar na faixa de 1 até o comprimento do vetor das variáveis de projeto menos 1. Um processo similar ao anterior pode ser realizado usando mais de um ponto de corte. Este último é uma generalização do cruzamento de um ponto.

Outra possível metodologia de fazer a troca de informação genética é usando uma recombinação uniforme. Nela, cada gene dos filhos é criado copiando o

gene correspondente de um dos pais, de acordo com uma máscara gerada aleatoriamente composta por números zeros e um. Onde houver um 1 o gene é copiado do pai 1, e onde houver 0 o gene é copiado do pai 2. Para gerar o segundo filho os pais são trocados de posição.

3.4.5.3. Operador de Mutação

A mutação muda de forma randômica genes da população que sobreviveu à seleção e também de cromossomos que sofreram recombinação. A mutação é feita usando um parâmetro chamado de Probabilidade de Mutação (P_m). Um número aleatório no domínio [0,1] é produzido. Se ele for menor ou igual a P_m , um gene será substituído por um número aleatório no domínio do gene. Este processo deve ser feito para cada gene. O processo de mutação é ilustrado na figura abaixo, mostrando a mudança de um gene para o individuo P_1 .

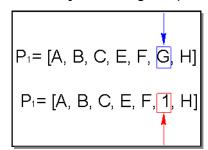


Figura 3.12: Exemplo de aplicação do operador de mutação.

O operador de mutação é empregado para realizar buscas nas vizinhanças do cromossomo, fornecendo meios para explorar melhor o espaço de busca. Shahak (1998) analisa a diferença do impacto do esquema de mutação para uma representação binária e uma de ponto flutuante e introduz o conceito de probabilidade de atualização (P_{UPDATE}), para usar valores comparáveis de mutação para uma representação binária ou uma com números reais. Ela expressa as chances que um indivíduo sofra mutação em pelo menos um bit para uma representação binária ou um gene para representação com números

reais. Assim, $1-P_m$ é a probabilidade que um gene não sofra mutação. Considerando o comprimento do vetor de projeto (N), P_{UPDATE} é igual a:

$$P_{UPDATE} = 1 - (1 - P_m)^N$$
 (3.12)

Por exemplo, um cromossomo com três genes e uma desejada probabilidade de atualização de 0.3, aplicando a equação anterior se tem 0.11 como valor de probabilidade de mutação. Este esquema de mutação é o adotado nesta pesquisa.

3.4.6. Métodos de Tratamento das Restrições usando AGs

Na literatura da computação evolucionária existem vários trabalhos que analisam os métodos para tratar os problemas de otimização com restrições. Michalewicz (1995) faz um excelente resumo dos principais métodos empregados para manipular as restrições, ressaltando vantagens e desvantagens de cada um. A seguir é apresentada a idéia de espaço viável, soluções viáveis e inviáveis e são abordados as técnicas de penalizações mais empregadas nos algoritmos genéticos.

De forma geral, um espaço de busca **S** consiste de dois subconjuntos, viável e inviável, que não se interceptam. Assim também não é preciso nenhuma suposição desses dois subconjuntos, isto é, não precisam ser convexos³⁵ ou conectados (vide figura seguinte).

 $^{^{35} \}text{ Um conjunto } \textbf{S} \text{ \'e convexo se: } \forall \ x_{1}, x_{2} \in S \rightarrow \lambda x_{1} + \left(1 - \lambda\right)x_{2} \in S, \lambda \in \left[0, 1\right]$

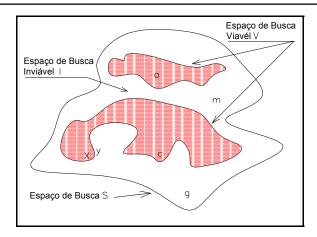


Figura 3.13: Espaço de busca viável, inviável e pontos factíveis.

Na figura anterior se ilustra o espaço de busca de um problema de otimização. Em uma etapa do processo evolutivo a população pode estar formada por soluções viáveis (x,c,a) e soluções inviáveis (y,g,m), enquanto a solução ótima é "x". O problema em lidar com indivíduos inviáveis não é trivial, já que surgem diferentes questões quanto ao tratamento dessas soluções.

A primeira questão é como comparar soluções inviáveis entre si, tais como a solução y que está muito perto do ótimo e a solução m ou g. Vendo a figura anterior surge uma nova questão: soluções viáveis, por exemplo, c, serão sempre melhor avaliadas que as soluções inviáveis, tipo y?

Outra questão que surge é se as soluções inviáveis devem ser rejeitadas ou empregadas para ajudar a população a cruzar da região inviável à região viável? As últimas questões a serem mencionadas e que têm relações diretas com a anterior é qual estratégia deve se usar para tratar as soluções se elas não vão ser rejeitadas? Pode-se reparar ou penalizar as soluções inviáveis? No caso de repará-las, quais são as estratégias para fazê-lo? No caso de penalização, quais são os valores e metodologia para penalizar uma solução?

As respostas às perguntas anteriores originaram os métodos atuais para manipular as restrições nos problemas de otimização. A maioria dos métodos está baseada em funções de penalidades, sendo a principal diferença a maneira de impô-las. Pela dificuldade de conhecer a priori o valor ótimo do

problema que está sendo resolvido, os métodos impõem a restrição que qualquer solução viável é melhor que uma solução inviável.

De forma geral, dois tipos de restrições são impostas aos problemas de otimização: restrições de igualdade (h=0) e restrições de desigualdade ($g \le 0$). Um ponto é viável quando satisfaz todas as restrições impostas. Diz-se que as restrições de desigualdade estão ativas quando "g=0" ou inativas se g<0".

A seguir será analisada a técnica de Penalidade, sendo ela a mais emprega para lidar com os problemas de otimização com restrições usando algoritmos genéticos.

No método de Penalidades, define-se uma função de penalização ou auxiliar que converte o problema com restrições em outro sem restrições.

$$\varphi(X,r) = f_o(X) + \theta(r,g(X),h(X))$$
 (3.13)

Sendo f_o a função objetivo original do problema, $\theta(r,g(X))$ a função de penalização e r uma variável escalar positiva. A variável r é usualmente denominada de fator de resposta ou parâmetro de penalidade e a superfície representativa da função $\phi(X,r)$ é chamada de superfície de resposta (BRITO, 1996). A função θ deve ser igual a zero para toda solução viável e igual a um valor "grande" para pontos fora da região viável. Se a minimização sem restrições da função ϕ é repetida para uma seqüência de valores do parâmetro de penalidade, r, a solução poderia ser trazida para convergir ao problema original. Isso explica porque o método de penalidade é conhecido como SUMT do inglês (Sequential Unconstrained Minimization Techniques).

Existem algumas formas de definir a função de penalização e a escolha, por uma ou outra, afetará a maneira de como o fator de resposta deve ser seqüencialmente avaliado, sendo as mais empregadas:

$$\theta(\lambda, g(X)) = \lambda \sum_{i=1}^{M} \max[0, g_i(X)]$$
 (3.14)

$$\theta(\lambda, g(X)) = \lambda \sum_{i=1}^{M} \max[0, g_i(X)]^2$$
 (3.15)

$$\theta(\lambda, g(X)) = -\lambda \sum_{i=1}^{M} \frac{1}{g_i(X)}$$
(3.16)

$$\theta(\lambda, g(X)) = \lambda \sum_{i=1}^{M} Ln[-g_i(X)]$$
(3.17)

As equações (3.16) e , são chamadas funções de penalização interior, já que partindo de um ponto de um ponto viável elas não permitem que o ponto de mínimo da função $\phi(X,r)$ se posicione fora da região viável. Para essas funções, a busca deve ser feita com valores de r decrescentes (0.1, 0.01, 0.001, etc.). As funções representadas pelas equações (3.14) e (3.15) são classificadas de funções de penalização exterior já que elas permitem que o ponto de mínimo se posicione fora da região viável, tornando-as atrativas, pois livram da tarefa de obter um ponto de partida viável. Nestes casos, os valores de λ devem ser crescentes, ou seja, 1, 10, 100,1000, etc.

Finalmente, escolhe-se o método de penalização exterior para tratar as restrições impostas neste trabalho pela vantagem de não precisar conhecer uma solução viável. Das duas alternativas apresentadas, equação (3.14) e (3.15), é escolhida a função de penalização quadrática. Uma vez definida a função de penalização, o problema de otimização se reescreve da seguinte maneira:

$$Minimizar: f_{O}(X) + \lambda \left[\sum_{j=1}^{J} \left[h_{j}(X) \right]^{2} + \sum_{i=1}^{M} \left[max(0, g_{i}(X)) \right]^{2} \right]$$
(3.18)

Onde,

f_o: função objetivo ou de mérito do problema;

J e M: número de restrições de igualdade e desigualdade, respectivamente; max: função que escolhe o maior valor entre duas alternativas.

Com a representação anterior o problema com restrições passa a ser um problema sem restrições, sendo possível obter todas as soluções viáveis que satisfaçam as restrições impostas no problema.

3.5. Descrição do Algoritmo Genético Implementado

Neste capítulo são apresentadas as características finais do algoritmo genético desenvolvido, que foi batizado com o acrônimo de **PATANGA** (**PA**reto **TAN**quer **G**enetic **A**lgorithm). Serão comentados os valores escolhidos para os parâmetros relacionados ao algoritmo. Os resultados finais foram obtidos a partir de uma quantidade grande de testes, que contribuíram para um processo de aprendizagem de como o algoritmo se comporta com a variação do tamanho da população (N_{POP}), Probabilidade de Cruzamento (P_C), taxa ou probabilidade mutação (P_m), número de gerações (N_{GER}), metodologia de seleção e etc.

Existem duas metas que devem ser atendidas em um algoritmo genético com múltiplos objetivos:

- Convergência ao conjunto ótimo de Pareto;
- Manter a diversidade entre as soluções do conjunto ótimo de Pareto.

Muitos dos vários parâmetros que são usados para ajustar a busca genética são meios indiretos de afetar a pressão de seleção e a diversidade da população. Uma elevada pressão de seleção aumenta a velocidade de convergência, porém aumenta também a probabilidade da convergência ocorrer para um mínimo local ao invés de um mínimo global, devido ao empobrecimento da diversidade genética. Para impedir a perda da diversidade e aumentar a velocidade de convergência do algoritmo foram implementados dois operadores que ajudarão no atendimento das duas metas mencionadas anteriormente. Estes operadores são:

- Filtro de Pareto (aumento da pressão de seleção);
- Estratégia de Nicho (aumento da diversidade genética).

O filtro consiste em guardar as melhores soluções do processo evolutivo, garantindo desta maneira a presença durante o processo de otimização de

todas as soluções não dominadas. Em cada iteração, as soluções não dominadas da população são colocadas no filtro. O tamanho do filtro (N_{FILTRO}) é um parâmetro predefinido e pode ser igual à certa porcentagem razoável (10 – 30%) do tamanho da população. Quando a capacidade do filtro é excedida, indivíduos semelhantes são removidos para manter uma distribuição uniforme de indivíduos dentro do filtro. A semelhança é avaliada no espaço solução das funções objetivos, mediante as proximidades dos indivíduos, geralmente ponderada pela distância euclidiana das soluções.

O operador de nicho é criado para manter a diversidade de informação genética na população. Devido ao tamanho finito da população artificial erros estocásticos associados aos operadores genéticos ocorrem, causando uma convergência prematura do processo evolutivo. O fenômeno conhecido como deriva genética (genetic drift) causa o desaparecimento de genes na população devido ao acaso. Assim também, excessivos números de filhos de um mesmo indivíduo (super indivíduo) causam uma convergência prematura do processo. Portanto, a idéia do nicho é espalhar as soluções ao longo do espaço de busca, querendo desta maneira incluir todas as possíveis soluções não dominadas no processo.

Finalmente, a Figura 3.14 mostra o fluxograma do algoritmo final implementado, sendo a características principais de cada operação explicadas em seguida.

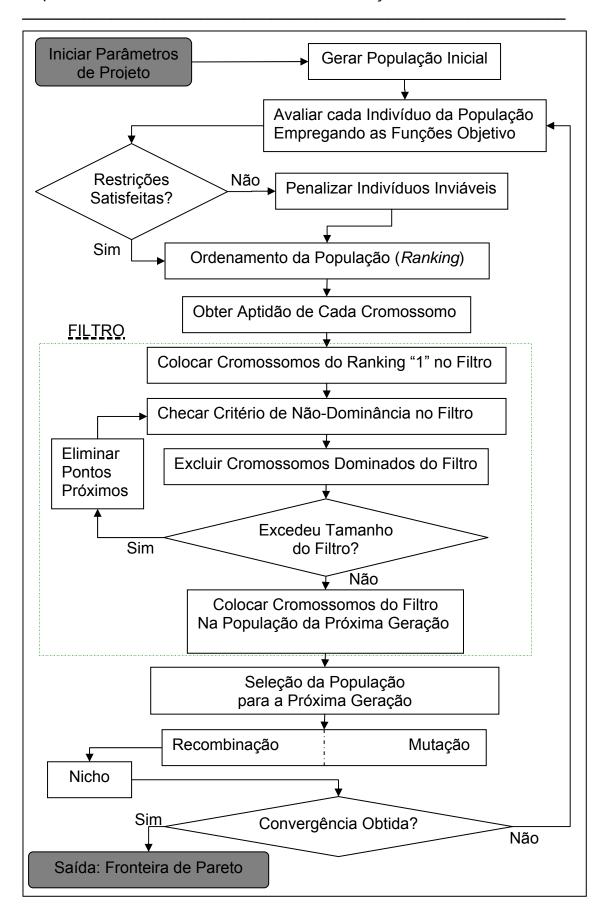


Figura 3.14: Fluxograma do Algoritmo de Otimização Multiobjetivo Implementado.

Iniciar Parâmetros de Projeto: A cada vetor de projeto são atribuídos valores randômicos, isto é, com uma população de tamanho N_{POP} e 10 genes por cromossomo é gerada uma matriz de números aleatórios de N_{POP} linhas por 10 colunas.

Gerar População Inicial: Emprega-se a equação (3.5) para gerar a população inicial do problema.

Avaliar cada Indivíduo da População Empregando as Funções Objetivos: Usam-se os modelos de custo e de vazamento médio descritos nos itens 2.15 e 2.16 para avaliar cada indivíduo da população.

Restrições Satisfeitas: Avaliam-se as restrições impostas para cada indivíduo da população com a finalidade de impor ou não as penalidades as soluções inviáveis.

Penalizar Indivíduos Inviáveis: As soluções inviáveis são penalizadas de acordo com a metodologia explicada no item 3.4.6, explicitamente com a equação (3.18).

Ordenamento da População: O ordenamento da população é um processo contínuo de marcar os indivíduos da população. Em cada geração, cromossomos não-dominados são selecionados para o ranking um (1). Da população remanescente cromossomos não-dominados são identificados selecionados para o ranking 2. Este processo continua para o ranking 3, 4 e assim sucessivamente até que todos os indivíduos da população sejam classificados para um ranking específico.

Obter Aptidão (Fitness) de Cada Cromossomo: Utiliza-se a expressão proposta por Cheng e Li (1997) para determinar a aptidão (F_i) de cada indivíduo dentro da população total. Assim, considerou-se:

$$F_{i} = \frac{N_{POP} (N_{r} - i + 1)}{\sum_{i=1}^{N_{r}} (N_{r} - i + 1) P_{si}}$$
(3.19)

Onde.

N_{POP}: Tamanho total da população;

N_r: Ranking maior da população (número total de rankings);

P_{si}: Tamanho da população no ranking i.

A definição anterior dá a mesma chance de sobrevivência a cromossomos (soluções) colocados no mesmo ranking.

Filtro: Para formar o filtro, em cada geração são colocados os cromossomos do ranking 1 - que consiste em aplicar o conceito apresentado de soluções não dominadas — para identificar os indivíduos que formam a fronteira de Pareto, onde cada ponto não-dominado é igualmente importante e considerado um ótimo. Em cada geração, pontos não-dominados (ranking 1) são colocados no filtro tornando necessário um novo teste de dominância entre os indivíduos presentes no filtro a cada nova iteração do processo de otimização, eliminando indivíduos dominados. Por último, os indivíduos do filtro são adicionados na população da próxima geração. Quando o tamanho do filtro é ultrapassado soluções próximas entre si devem ser eliminadas. Castro (2001) propôs uma métrica para avaliar as distâncias entre indivíduos, como segue:

$$d_{j,k} = \sum_{i=1}^{Nf_i} \frac{100 \times \left| f_i(j) - f_i(k) \right|}{\left[f_i(j) + f_i(k) \right]}$$
(3.20)

onde:

j e k: dois indivíduos do filtro;

i: índice para o número de funções objetivos;

fi: função objetivo i;

Nfi: número de funções objetivo do problema em estudo.

A métrica resulta de um processo de soma das porcentagens das diferenças percentuais das funções objetivos entre as duas soluções ou indivíduos j e k avaliadas. O intuito de eliminar as soluções "semelhantes" é propiciar uma melhor distribuição das soluções ao longo da fronteira de Pareto.

Seleção da População para a Próxima geração: O esquema de seleção que finalmente se escolheu foi o de torneio, devido a seu excelente desempenho, facilidade de implementação e sua vantagem de controlar a diversidade da população por meio de uma menor pressão de seleção.

Recombinação: A única opção analisada foi o operador de recombinação de um ponto pela facilidade de implementação e seus bons resultados obtidos em outras pesquisas (Shahak 1998).

Mutação: O operador de mutação empregado foi o exposto no item 3.4.5.3, levando em conta a proposta feita por Shakak da probabilidade de atualização.

Nicho: A metodologia de nicho empregada neste trabalho é a proposta por Cavicchio³⁶ em 1970. Cavicchio apud Goldberg (1989) indica que um indivíduo (filho) substitui outro indivíduo (pai) se a aptidão dele (filho) é maior ou igual que do outro indivíduo (pai). Desta maneira, a diversidade é mantida porque cromossomos tendem a substituir cromossomos similares ou piores a eles mesmos. A Figura 3.15 mostra o esquema empregado de nicho utilizando a idéia anterior, proposto por Cheng e Li.

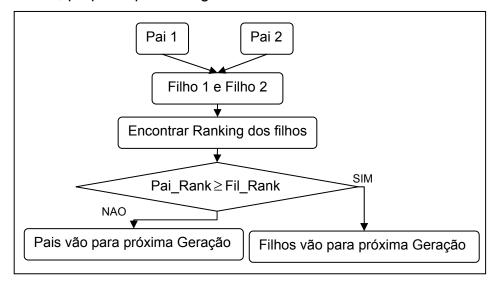


Figura 3.15: Operações realizadas para determinar quais serão os novos membros da população (CHENG E LI, 1997).

³⁶Adaptive Search Using Simulated Evolution, Doctoral dissertation, University of Michigan, Ann Arbor.

O ranking dos filhos é avaliado considerando que ambos participam da mesma população que os pais. Desta forma, definindo Pai_Rank como sendo igual ao ranking mínimo entre os dois pais e Fil_Rank o mínimo ranking dos filhos duas alternativas podem acontecer: se Pai_Rank é menor que Fil_Rank então os pais são enviados a formar a nova população. Caso contrário, os filhos são colocados na nova população. O processo descrito é feito para cada casal de indivíduos que foram selecionados para serem pais.

3.5.1. Restrições Impostas

Para identificar se um navio (cromossomo) é viável ou não foram consideradas as seguintes restrições:

- Quantidade de lastro mínimo, obtido com (2.33), para satisfazer os requisitos de MARPOL 73/78 calculado com (2.6).
- Estabilidade inicial mínima (GM/B) na condição carregada e em lastro deve ser maior que 0.08 (BROWN, 2000);
- Velocidade obtida com o sistema propulsor escolhido deve ser igual ou maior que a velocidade requerida (Vs≥V).
- Borda Livre mínima (F_{MIN}) exigida pelo convênio internacional de carga de 1966³⁷.

A estratégia adotada para tratar as restrições foi a de Penalidades, em função de não ser necessário conhecer uma solução inicial viável a priori, como foi indicado anteriormente.

O parâmetro fator de penalização, λ, inicialmente tem o valor de 1, para posteriormente ser multiplicado por 10, consecutivamente nas iterações cujo número são iguais a 25, 50 e 75 % do número total de iterações estabelecidos como limite máximo.

_

³⁷ Ver apêndice C para detalhes do procedimento de cálculo da borda livre.

3.6. Validação do Algoritmo Genético Implementado

A versão final do algoritmo comentada no item anterior é o resultado de inúmeros testes e conseqüentes provas dos operadores genéticos. Inicialmente, foi criada uma versão do algoritmo para resolver problemas com um único objetivo e entender a influência dos operadores básicos – seleção, cruzamento e mutação – para depois acrescentar um segundo objetivo e os operadores multiobjetivo necessários (Filtro e Nicho) para obter a fronteira nãodominada.

Desta forma, os problemas encontrados, com níveis de complexidade crescentes, foram resolvidos passo a passo para se obter o algoritmo robusto necessário para resolver o problema desta pesquisa.

Nesta seção são mostrados apenas os resultados obtidos ao testar o algoritmo (PATANGA) com quatro problemas multiobjetivo, propostos por Zitzler (1999), que compõem um diversificado pacote de funções teste para avaliação e comparação de algoritmos que objetivam a identificação do conjunto ótimo de Pareto.

As funções teste utilizadas cobrem as diferentes e complexas características dos problemas multiobjetivo. Isto é espaço convexo e não convexo, fronteira descontínua e multimodal³⁸. Cada uma das funções compreende um problema de minimização com dois objetivos e são estruturados de uma forma única:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar: } \phi(X) = \ \left[f_1(x_1), f_2(X) \right] \\ & \text{Sendo:} \quad f_1(x_1) = x_1 \\ & \quad f_2(X) = g(x_2, x_3, ..., x_N) \times h \big(f_1(x_1), g(x_2, x_3, ..., x_N) \big) \\ & \text{Onde:} \quad X = \big(x_1, x_2, ..., x_N \big) \end{aligned}$$

³⁸Problemas que possuem mais de um ótimo no espaço de busca.

_

Como pôde ser visto, a função f_1 depende apenas da primeira variável do vetor de projeto, enquanto f_2 é igual ao produto de duas funções g e h. A função g depende das (N-1) variáveis e h depende dos valores de f_1 e g. As funções testes são diferenciadas pelo domínio das variáveis do vetor de projeto, pelo número de variáveis e pela forma das funções g e h.

3.6.1. Função Teste 1

A função de teste φ_1 está definida da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \min[f_1, f_2] \\ f_1(x_1) &= x_1 \\ f_2(X) &= g \times h \\ g(x_2, x_3, ..., x_N) &= 1 + 9 \sum_{i=2}^{N} \frac{x_i}{N - 1} \\ h(f_1, g) &= 1 - \left(\frac{f_1}{g}\right)^{0.5} \end{aligned}$$
(3.21)

onde N=30 e $x_i \in [0,1]$. A fronteira ótima de Pareto é convexa para este problema e é formada com g(X) = 1 como foi constatado.

O problema foi implementado e resolvido com o PATANGA, realizando duas execuções aleatórias, ou seja, a partir da geração aleatória de dois vetores diferentes para o vetor de projeto (X). Os parâmetros empregados para configurar o algoritmo foram:

- Tamanho da população (N_{POP}): 800 indivíduos;
- Número de gerações (N_{GER}): 200 gerações;
- Probabilidade de Cruzamento (P_C): 0.85;
- Probabilidade de Mutação (P_m): 0.01;

- Número de Indivíduos no Torneio: 10;
- Tamanho do Filtro: 50 indivíduos.

A Figura 3.16 mostra os resultados obtidos, sendo similares aos apresentados por Castro (2001) e Zitzler (1999). Na Figura 3.17 são apresentados os resultados obtidos empregando-se os algoritmos propostos por Zitzler (1999) (SPEA) e Castro (2001) (PMOGA), sendo o PMOGA mostrado resultante de cinco execuções aleatórias e o SPEA corresponde à união das fronteiras de cinco execuções, depois de retiradas as soluções dominadas. Os parâmetros utilizados pelos dois algoritmos foram:

- Tamanho da população (N_{POP}): 100 indivíduos;
- Número de gerações (N_{GER}): 250 gerações;
- Probabilidade de Cruzamento (P_C): 0.8;
- Probabilidade de Mutação (P_m): 0.01;
- Tamanho do Filtro: 20 indivíduos.

Analisando as fronteiras ótimas de Pareto apresentadas na Figura 3.16 e Figura 3.16, conclui-se que existe um comportamento qualitativo (forma) e quantitativo (valores) aceitável entre o algoritmo desenvolvido quando comparado aos de Castro (2001) e Zitzler (1999).

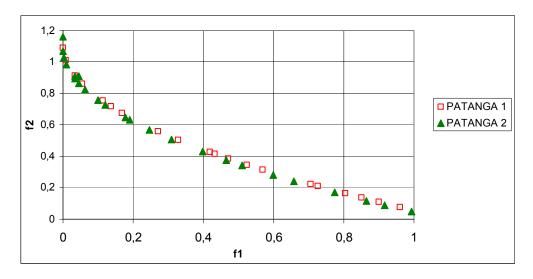


Figura 3.16: Fronteira de Pareto da função de teste $\, \varphi_{_{\! 1}} \,$ obtida com PATANGA.

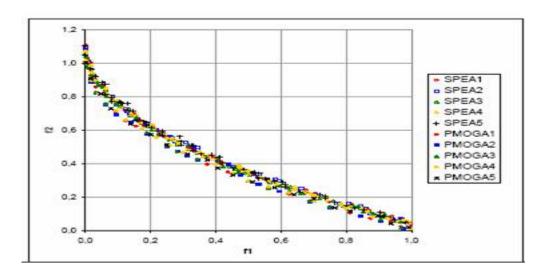


Figura 3.17: Resultados obtidos de 5 execuções do problema $\varphi_{\rm l}$,(CASTRO, 2001).

3.6.2. Função Teste 2

A função de teste $\,\phi_2\,\acute{e}$ definida da seguinte forma:

$$\phi_{2} = \min[f_{1}, f_{2}]$$

$$f_{1}(x_{1}) = x_{1}$$

$$f_{2}(X) = g \times h$$

$$g(x_{2}, x_{3}, ..., x_{N}) = 1 + 9 \sum_{i=2}^{N} \frac{x_{i}}{N - 1}$$

$$h(f_{1}, g) = 1 - \left(\frac{f_{1}}{g}\right)^{2}$$
(3.22)

onde N=30 e $x_i \in [0,1]$. A fronteira ótima de Pareto é não-convexa para este problema e é formada com g(X) = 1 como foi constatado. Nota-se que a diferença com o problema anterior está na definição da função h, especificamente no expoente da expressão (f_1/g) .

Os parâmetros empregados para configurar o algoritmo para este problema foram:

- Tamanho da população (N_{POP}): 800 indivíduos;
- Número de gerações (N_{GER}): 250 gerações;
- Probabilidade de Cruzamento (Pc): 0.85;
- Probabilidade de Mutação (P_m): 0.01;
- Número de Indivíduos no Torneio: 10;
- Tamanho do Filtro: 50 indivíduos.

As soluções obtidas empregado PATANGA são mostradas na Figura 3.18. De forma análoga são mostradas na Figura 3.19 as soluções obtidas com os algoritmos SPEA e PMOGA, Zitzler (1999) e Castro (2001), respectivamente, sendo a configuração deles igual ao problema teste 1.

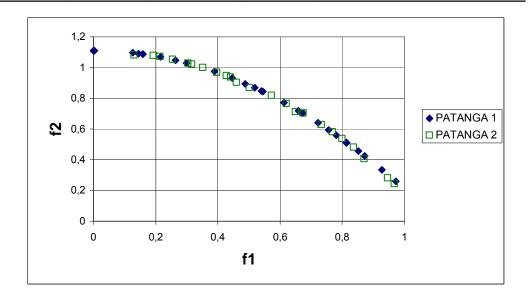


Figura 3.18: Resultados obtidos de 2 execuções empregando o algoritmo desenvolvido para o problema $\,\phi_2\,$

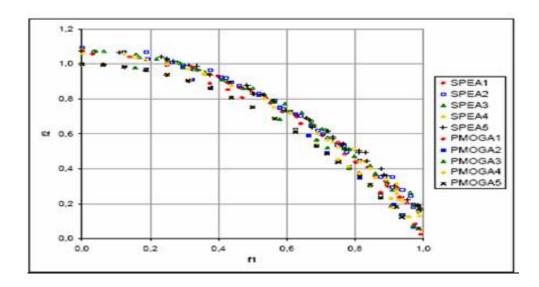


Figura 3.19: Resultados obtidos de 5 execuções do problema ϕ_2 (CASTRO, 2001).

Embora exista uma similaridade aceitável da forma das fronteiras de Pareto apresentadas na Figura 3.18 e Figura 3.19, observa-se uma pequena dispersão dos valores obtidos com PATANGA, ficando levemente acima das curvas obtidas pelos algoritmos SPEA e PMOGA. O algoritmo PMOGA mostrou-se mais efetivo na determinação dos valores não-dominados para este tipo de problemas (não-convexo).

3.6.3. Função Teste 3

A função de teste φ_3 é definida da seguinte forma:

$$\begin{split} \phi_3 &= min\big[f_1, f_2\big] \\ f_1\big(x_1\big) &= x_1 \\ f_2\big(X\big) &= g \times h \\ g\big(x_2, x_3, ..., x_N\big) = 1 + 9 \sum_{i=2}^N \bigg(\frac{x_i}{N-1}\bigg) \\ h\big(f_1, g\big) &= 1 - \bigg(\frac{f_1}{g}\bigg)^{0.5} - \bigg(\frac{f_1}{g}\bigg) sen\big(10\pi \times f_1\big) \end{split}$$

onde N=30 e $x_i \in [0,1]$. A fronteira ótima de Pareto é discreta para este problema e é formada com g(X) = 1, como foi constatado.

A introdução da função *sen* provoca a descontinuidade na fronteira de Pareto. Os parâmetros empregados para configurar o algoritmo na busca para este problema foram iguais aos empregados na resolução do problema anterior.

Foram realizadas 3 execuções empregando o PATANGA e os resultados são mostrados na Figura 3.20. Na Figura 3.21são mostrados os resultados obtidos com os algoritmos SPEA e PMOGA. A configuração dos parâmetros de SPEA e PMOGA empregada na execução foi a mesma que a empregada no problema de teste 1.

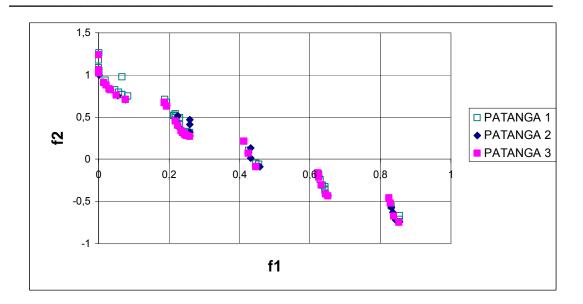


Figura 3.20: Resultados obtidos para o problema $\phi_3\,$ a partir de 3 execuções do algoritmo desenvolvido.

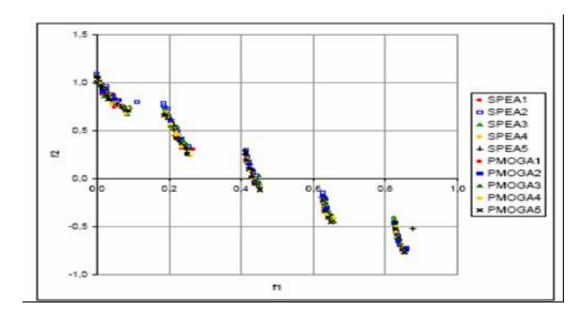


Figura 3.21: Resultados obtidos de 5 execuções do problema ϕ_3 (CASTRO, 2001).

Pode-se constatar a boa correlação da fronteira de Pareto apresentada nas duas figuras anteriores, concluindo o bom desempenho do algoritmo para este problema.

3.6.4. Caso Real: Viga Soldada

Deb (1998) estuda o problema de uma viga que precisa ser soldada a outra viga e deve suportar certa carga **F**. Esse problema, no contexto de um problema de projeto com um objetivo, está enfocado na minimização do custo da viga, tendo 4 parâmetros de projeto - espessura da solda (h), largura da viga (b), espessura da viga (t) e comprimento da solda (l) – (Vide Figura 3.22). Como o peso está ligado ao custo, é desejado que as 4 variáveis apresentem os menores valores possíveis. No entanto, isto acarretará, provavelmente, grandes deflexões no extremo livre da viga. Assim, soluções com mínimo custo e mínimas deflexões são conflitantes entre si, sendo possível definir um problema de otimização multiobjetivo.

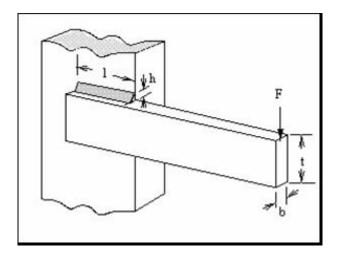


Figura 3.22: Viga soldada num extremo (DEB, 1998).

Cinco restrições são impostas. As duas primeiras garantem que a tensão de cisalhamento e a tensão normal sejam menores que os valores permissíveis do material. A terceira garante que a espessura da viga não seja menor que a espessura da soldadura. A quarta restrição é um limite para o deslocamento máximo da extremidade da viga. A última restrição a ser imposta garantirá que a carga máxima permissível de flambagem (ao longo da direção de t) não seja alcançada.

A definição matemática do problema está definida por Deb (1998) e é reproduzida na tabela seguinte:

Tabela 14 - Formulação do problema da viga soldada (DEB, 1998).

Funções objetivo	$f_1(X) = 1.010471 \times h^2 \times l + 0.04811 \times t \times b(14+l)$ $f_2(X) = \frac{2.1952}{t^3 \times h}$
Restrições	$g_{1}(X) = \tau(X) - \tau_{MAX} \le 0$ $g_{2}(X) = \sigma(X) - \sigma_{YIELD} \le 0$ $g_{3}(X) = h - b \le 0$ $g_{4}(X) = \frac{2.1952}{t^{3} \times b} - u_{MAX} \le 0$ $g_{5}(X) = F - P_{C} \le 0$ $0.125 \le h, b \le 5.0$ $0.1 \le l, t \le 10.0$
Definições	$\tau(X) = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2 + \frac{1 \times \tau' \times \tau''}{\sqrt{0.25 \left[1^2 + (h+t)^2\right]}}}$ $\tau' = \frac{6000}{\sqrt{2}h \times l} \tau'' = \frac{6000 (14 + 0.51) \sqrt{0.25 \left[1^2 + (h+t)^2\right]}}{2 \left\{0.707h \times l \left[\frac{l^2}{12} + 0.25 (h+t)^2\right]\right\}}$ $\sigma(X) = \frac{504000}{t^2 \times b}$ $P_c = 64746.022 (1 - 0.0282346 \times t) \times t \times b^3$

Castro (2001) adotou os seguintes dados para resolver o problema:

$$F = 6000 \text{ lb} \qquad \qquad \tau_{\text{MAX}} = 13600 \text{ psi}$$

$$E = 30 \times 10^6 \text{ psi} \qquad \qquad \sigma_{\text{MAX}} = 30000 \text{ psi}$$

$$L = 14 \text{ in} \qquad \qquad u_{\text{MAX}} = 0.25 \text{ in (deflexão)}$$

As configurações do algoritmo utilizado são as mesmas que as empregadas na resolução do problema $\varphi_{\rm l}$

Na Figura 3.23 são mostrados os resultados obtidos após de fazer três execuções com o programa PATANGA.

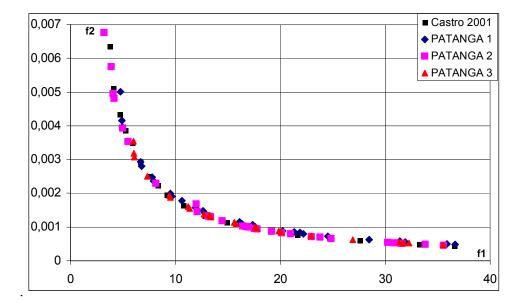


Figura 3.23: Fronteira ótima de Pareto para o problema da viga soldada.

Neste problema, os resultados obtidos são equivalentes ao apresentado por Castro (2001) e melhores aos apresentados no trabalho de Deb (1998). Portanto, a robustez do algoritmo é comprovada desta maneira, sendo o algoritmo considerado validado e apresentando as condições para ser aplicado ao problema de otimização desta pesquisa.

4. Projeto Otimizado

Em seguida é apresentado detalhadamente o modelo de síntese desenvolvido, sendo este processo capaz de gerar navios balanceados em peso e volume de carga. O atendimento aos critérios de convergência no processo de balanceamento para diferentes parâmetros de projeto escolhidos de forma aleatória é mostrado usando quatro navios como exemplo. Um fluxograma resume o procedimento elaborado para o balanceamento das alternativas de projeto. Depois, são definidas as funções de mérito que serão usadas no processo de otimização. Escolhe-se entre os diferentes modelos de pesos do casco e do custo de construção os que apresentam melhor resultado. Finalmente, são mostrados os casos de estudo realizados para validar o procedimento proposto para o projeto preliminar de navios petroleiros.

4.1. Modelo de Síntese

Para definir os principais sistemas que compõem o navio, representados parametricamente no capítulo 2, foi necessário estabelecer inicialmente um grupo de 10 variáveis. Atribuindo aleatoriamente valores para estas variáveis é possível que o conjunto não represente um navio viável em peso e/ou volume, sendo necessário o balanceamento entre os parâmetros. Além disso, uma metodologia de síntese deve ser implementada para integrar os diferentes modelos paramétricos, procurando obter um navio que satisfaça os requisitos do armador. Em soma, deve existir um balanço entre pesos e flutuação, atendendo o princípio de Arquimedes; o espaço interno disponível deve ser igual ou maior que o espaço requerido e a energia disponível no navio deve ser a necessária para satisfazer os requisitos de projeto.

O processo de síntese, representado esquematicamente na figura a seguir, é executado para cada navio que formará a população do processo de otimização.

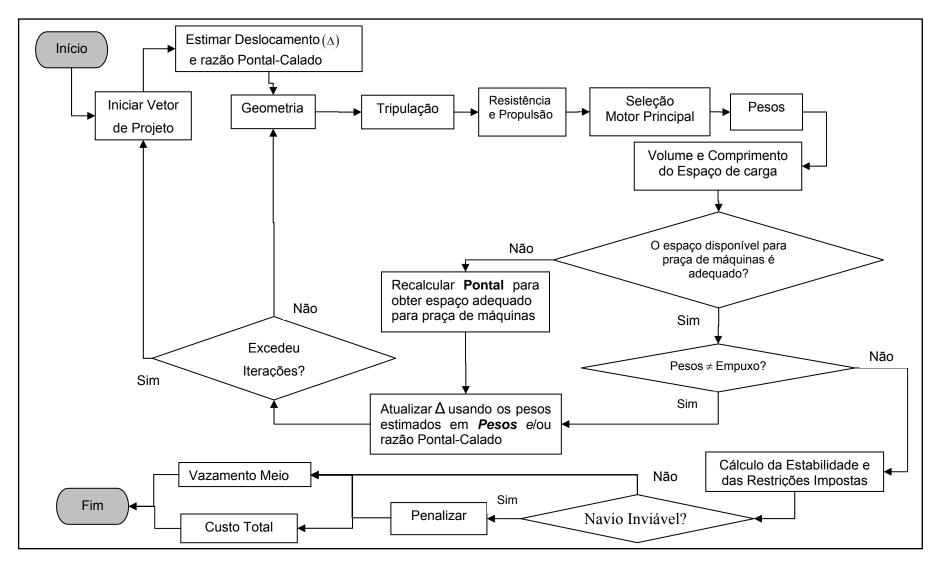


Figura 4.1: Modelo de Síntese proposto.

Inicialmente devem ser definidos os quatro requisitos de projeto (DWT_{TOTAL}, γ_{CARGA} ,V e E) impostos pelo armador. Logo, são gerados 10 números aleatórios na faixa de valores permissíveis de cada variável de projeto, definidas na Tabela 13, que vão definir um navio. Usando a equação (3.5) obtêm-se os valores de cada variável.

Na primeira iteração, o deslocamento inicial é estimado usando o peso morto imposto como requisito e um coeficiente de peso morto de 0.875 conforme sugerido por Watson (1998), típico para navios petroleiros. Desta forma, a expressão para a estimativa do deslocamento no início do processo de balanceamento é:

$$\Delta = \frac{\text{DWT}_{\text{TOTAL}}}{\text{C}_{\text{DWT}}}, \quad [\text{Ton}]$$
 (4.1)

Onde

DWT_{TOTAL}: peso morto total que o navio deve carregar, [Ton];

C_{DWT}: coeficiente de peso morto.

Na primeira iteração a relação pontal-calado $\left(\frac{D}{T}\right)$ é assumida igual a 1.2, considerando que esse valor é suficiente para gerar um navio viável em espaço de carga.

Em seguida, no módulo chamado de **Geometria** são calculadas as dimensões principais e coeficientes de forma do navio – LWL, B, T, D, C_P , C_X , C_B e C_{WL} – assim como a altura total da casaria (H_v). A primeira variável a ser calculada é o comprimento (LWL), sendo que todos os dados requeridos pela equação (2.1) são definidos no vetor de projeto exceto o deslocamento, estimado anteriormente com a equação (4.1); em seqüência usam-se as equações (2.2) até (2.5) para determinar, respectivamente, o calado (T), a boca (T) e os coeficientes de forma T0 e T1 a partir da estimativa do calado e da relação T2 assumida, estima-se o valor do pontal (T3). As equações (2.6) e (2.7) são utilizadas para definir a altura total da casaria.

Posteriormente, no módulo chamado de **Tripulação**, é calculado o número de tripulantes empregando a equação (2.9). No próximo módulo, **Resistência e Potência**, calculam-se a curva de resistência total ao avanço e a curva de potência necessária ao eixo (SHP). No módulo **Seleção do Motor Principal** é escolhido, a partir da base de dados criada, um motor que satisfaça o requisito de potência calculado no módulo anterior. Ao comprimento do motor escolhido é incrementado um valor constante de 10 metros, considerando este valor como suficiente para colocar os demais componentes e acessórios requeridos que complementa a praça de máquinas, isto é:

$$L_{\text{Requerido}}^{\text{Máquina}} = L_{\text{Escolhido}}^{\text{Motor}} + 10, \quad [m]$$
 (4.2)

Ainda no módulo **Seleção do Motor Principal**, a velocidade de projeto obtida com o motor selecionado é calculada. Relembra-se que caso o navio não satisfaça um dos requisitos de projeto impostos pelo armador, exemplo velocidade requerida, o navio será penalizado diminuindo sua perfomance para contabilizar a violação de uma ou mais restrições.

Na seqüência da Figura 4.1 no módulo chamado de **Pesos** são usados os modelos paramétricos descritos no subcapítulo 2.11 para estimar o peso da estrutura de aço – equações (A.1) até (A.19), peso do sistema propulsor – equações (2.20) e (2.21), peso do Outfit e itens do peso morto do navio – equação (2.22) e Tabela 4. No módulo seguinte, **Volume e Comprimento do Espaço de Carga** é calculado o volume disponível para carregar a carga, assim como o comprimento necessário para os tanques de carga e de Slop, definidos pelas equações (2.25) e (2.26) respectivamente, que em conjunto definem o comprimento do bloco de carga. Portanto, conhecendo o comprimento dos Peaks de proa e popa calculados com as equações (2.28) e (2.29), o espaço para o Cofferdam assumido como constante, e igual a 3 metros, é possível definir o comprimento disponível (L^{Máquinas}) para colocar a praça de máquinas fazendo a seguinte operação:

$$L_{\text{Disponivel}}^{\text{Máquina}} = LWL - LCtk - LStk - L_{\text{Peak}}^{\text{Proa}} - L_{\text{Peak}}^{\text{Popa}} - L_{\text{Cofferdam}}^{\text{Popa}}$$

$$(4.3)$$

Comparando o comprimento disponível com o requerido para a praça de máquinas, analisa-se a primeira condicional da **Figura 4.1** que verifica se existe espaço adequado para alocar a praça de máquinas. Esta verificação deve ser feita em dois sentidos:

- 1. Se o espaço disponível é maior ou igual que o requerido, $L_{Disponível}^{Máquina} \ge L_{Requerido}^{Máquina}$;
- 2. Se o espaço disponível não é muito "maior³⁹" $\left(L_{\text{Disponível}}^{\text{Máquina}} \gg L_{\text{Requerido}}^{\text{Máquina}}\right)$ que o requerido, evitando a convergência para uma solução com a relação D/T maior do que a necessária

Para a primeira situação, se a resposta do condicional é negativa, L^{Máquina}>L^{Máquina}_{Requerido}>L^{Máquina}_{Disponível}, é necessário realizar um incremento ao pontal do navio, de tal forma a reduzir o comprimento destinado inicialmente para colocar a carga, equação (2.27), restando espaço suficiente para a praça de máquinas. A figura seguinte apresenta esquematicamente esta adequação.

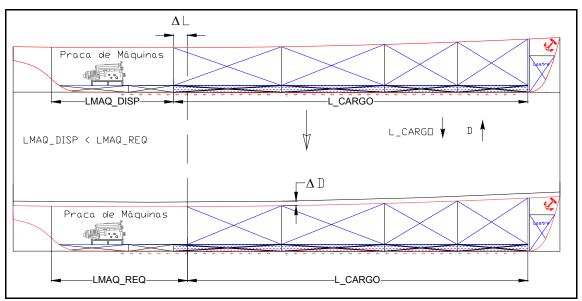


Figura 4.2: Adequação do espaço disponível para a praça de máquinas.

Para o cálculo do novo pontal com a finalidade de obter espaço adequado para praça de máquinas, considera-se que o novo comprimento do bloco de carga

-

 $^{^{39}}$ Considera-se neste trabalho um valor muito maior quando $L_{\text{Discontinel}}^{\text{Máquina}} - L_{\text{Requieddo}}^{\text{Máquina}} \geq \xi$

deve ser igual ao comprimento do navio menos o espaço dos Peaks de proa e popa, Cofferdam e espaço requerido pela praça de máquinas calculado no módulo **Seleção Motor Principal**. Assim:

$$L_{\text{BLOCO de CARGA}} = LWL - L_{\text{Peak}}^{\text{Proa}} - L_{\text{Peak}}^{\text{Popa}} - L_{\text{Cofferdam}} - L_{\text{Requerido}}^{\text{Máquina}}$$
(4.4)

Chamando o lado direito da equação anterior como $L_{\text{Corregido}}^{\text{Carga}}$, substituindo as expressões que definem o comprimento do bloco de carga, equação (2.25) e (2.26), e organizando temos semelhantes obtém-se o valor final do pontal como sendo:

$$D = h_{db} + \frac{\nabla_{CARGA}}{(B-2 \times w) \times L_{Corregido}^{Carga}} \times \left(\frac{Fator_{TANQUES}}{C_B^{PONTAL}} + \frac{0.02}{CS_{TK} \times C_B} \right)$$
(4.5)

Uma vez que o pontal é corrigido, atualiza-se o deslocamento igualando-se à soma dos pesos calculados anteriormente (módulo **Pesos**) e inicia-se uma nova iteração no processo de balanceamento a partir do módulo **Geometria**, a não ser que se tenha atingido o limite máximo de iterações. Neste caso, o navio não balanceado é descartado e um novo vetor de projeto é selecionado aleatoriamente. No processo iterativo, proposto neste estudo, o valor do Deslocamento e conseqüentemente do Comprimento, Boca, Calado, e de todas as variáveis dependentes vão sendo atualizadas até se obter a convergência.

A segunda verificação da adequação do espaço de carga, $\left(L_{\text{Disponível}}^{\text{Máquina}} \gg L_{\text{Requerido}}^{\text{Máquina}}\right)$, é analisada a seguir. O processo resultante desta possível situação é ilustrado na Figura 4.3. Quando o espaço disponível para praça de máquinas é maior em 5 metros do que o valor requerido, o modelo de síntese faz uma correção do pontal, diminuindo seu valor com o correspondente aumento do espaço de carga aproveitando a equação (4.5).

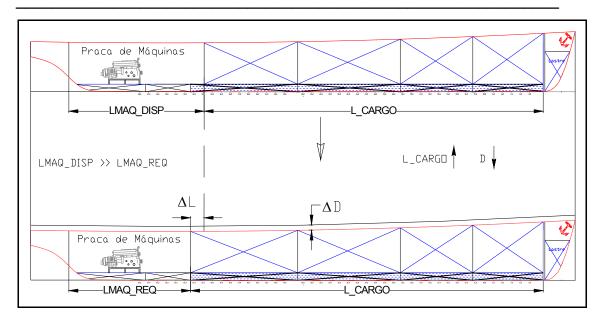


Figura 4.3: Redução do pontal do navio e aumento do espaço de carga devido ao espaço da praça de máquinas ser muito maior que o requerido.

O processo de diminuir o pontal deve estar sujeito a um limite inferior, isto é, o pontal não pode ser menor que o calado do navio. Porém, deve existir ainda uma reserva de flutuação (borda livre) como critério de segurança do navio, já que o processo de otimização poderia chegar um valor de pontal inconsistente fisicamente. Por isso, estabelece-se que a relação pontal-calado não pode ser menor que 1.2 m⁴⁰ durante o processo de balanceamento de cada navio.

Seguindo com o modelo de síntese, deve-se comprovar que a soma de todos os pesos seja igual à força de flutuação. Os pesos componentes do navio são o peso morto total, peso da estrutura de aço, peso do sistema propulsor, peso do Outfit e uma margem adicional para um possível crescimento ou erro nas estimativas feitas. Neste trabalho considerou-se uma porcentagem de 6% do peso leve do navio para o último item. Por outro lado, conhecendo as dimensões principais do navio, calcula-se a força de flutuação considerando um coeficiente por apêndices igual a 0.5%. A comparação entre deslocamento e flutuação é feita em forma porcentual como segue:

⁴⁰ Valor escolhido em função dos dados apresentados na Tabela 2.

$$Error_{PESOS} = \frac{\sum_{j} W_{j} - \left[\nabla \times \gamma_{AGUA} \times (1+s)\right]}{\sum_{i} W_{j}}$$
(4.6)

onde

$$\sum_{j} W_{j} = W_{\text{S.Pr opulsor}} + W_{\text{Casco}} + W_{\text{Casaria}} + W_{\text{Outfit}} + W_{\text{Marg em}} + DWT_{\text{TOTAL}}$$

O critério de parada usado é que a equação (4.6) chegue a um valor menor que 1×10^{-4} . Portanto, se o navio satisfaz a última condicionante – "Peso=Empuxo", diz-se que o navio foi balanceado com sucesso e as seguintes operações são realizadas a seguir:

- Estimativa de centros verticais, conforme item 2.14;
- Avaliação da estabilidade transversal inicial (Lastreado & Carregado), conforme item 2.14;
- Penalizar navios que não satisfazem as restrições impostas em 3.5.1;
- Cálculo do custo total, conforme item 2.15;
- Cálculo do vazamento médio, conforme item 2.16.

Caso a segunda condição da Figura 4.1 seja satisfeita ("Peso ≠ Empuxo"), atualiza-se o deslocamento e certifica-se que o número de iterações realizadas não seja maior que o limite preestabelecido. Em caso negativo, isto é, não se excedeu o limite de iterações, o processo retorna ao módulo **Geometria** para repetir o ciclo até obter a convergência. Por outro lado, se a condição é satisfatória, excedeu-se número de iterações estabelecido como limite, o navio é descartado e um novo conjunto de parâmetros iniciais de projeto é escolhido aleatoriamente para iniciar o processo de balanceamento novamente.

Na figura seguinte mostra-se o número de iterações que foram necessárias para balancear 10 navios, cujo vetor de projeto foi iniciado de forma aleatória.

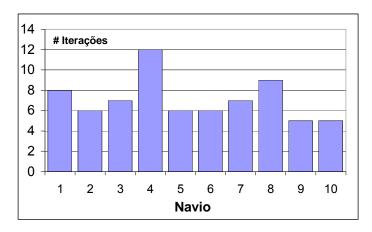


Figura 4.4: Iterações realizadas no processo de balanceamento proposto.

Em média oito iterações foram necessárias para balancear cada navio. Depois de realizar várias corridas usando o modelo de síntese proposto, observou-se que foram necessárias no máximo 18 iterações para balancear um navio e no mínimo quatro. Usando este dado experimental, estabeleceu-se como 25 o limite para o número de iterações permissíveis para tentar balancear um navio qualquer, deixando assim uma pequena margem para balançar qualquer combinação inicial de variáveis que não tenha sido levado em conta.

De modo similar, mostra-se na Figura 4.5 uma corrida feita com PATANGA do número de navios que não foram balanceados durante o processo de síntese, para uma população inicial de 800 navios e 35 gerações como limite do processo de otimização.

O processo aleatório de seleção dos valores iniciais de cada gene (variável) pode gerar soluções que não sejam possíveis de balancear, seja pelas relações C_{LB} , C_{BT} , C_{B} que dão como resultado um navio que não satisfaz os requisitos de projeto estabelecidos (carga requerida e velocidade de projeto exigida) e as condições impostas $(\frac{D}{T} \ge 1.2 \ \& \ L_{Disponível}^{Motor} - L_{Requerido}^{Motor} \ge 5)$ no processo de balanceamento.

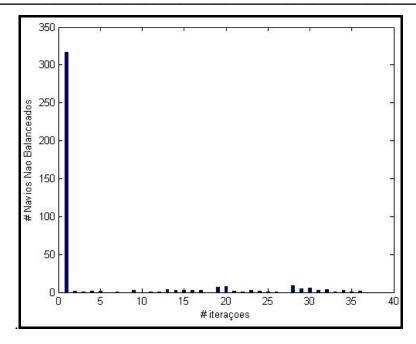


Figura 4.5: Navios não balanceados durante o processo de otimização.

Tanto na primeira como nas gerações subseqüentes quando não se consegue balancear um individuo, ele é descartado e outro vetor com as variáveis de projeto é montado aleatoriamente e utilizado como um novo indivíduo, garantindo desta maneira uma população constante durante o processo de otimização.

Os resultados dos testes realizados sugerem que, em média, 20% da população inicial não serão balanceados na primeira geração. O mesmo não foi verificado nas demais gerações em função destas serem compostas a partir de indivíduos balanceados nas gerações anteriores, porém é possível que a ação dos operadores genéticos, cruzamento e mutação, gerem indivíduos cujos genes não são compatíveis entre si e, portanto, não sendo possível balanceá-los.

O processo gráfico de convergência de dois navios e o de não convergência de outros dois navios, todos com parâmetros de projeto iniciais diferentes escolhidos aleatoriamente, mas com os mesmos requisitos de projeto, será apresentado na seqüência. No APÊNDICE E colocam-se os valores numéricos das dimensões principais, componentes do peso leve, deslocamento, espaço de carga, espaço requerido para praça de máquinas correspondentes aos quatro

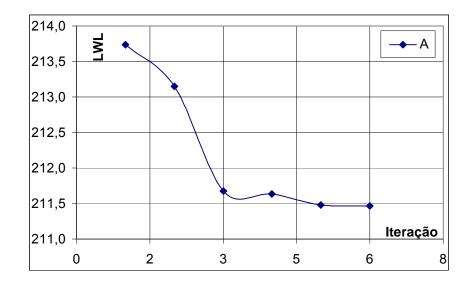
navios. Primeiro serão mostrados os navios balanceados e depois os não balanceados.

As variáveis de projeto iniciais que definem o casco do navio e o calado dos dois navios balanceados são apresentadas a seguir para ter uma idéia das proporções dos navios escolhidos, para ilustração do processo de convergência:

Tabela 15. - Variáveis de projeto iniciais que definem a geometria dos navios selecionados e balanceados.

# Navio	C _{LB}	C _{BT}	C _B	Т
1	5,1	2,25	0,815	18,81
2	6,2	2,90	0,715	15,49

Na Figura 4.6, mostra-se, para o navio # 1, o processo de convergência do comprimento do navio (LWL)- A-, do critério de parada dos pesos (equação (4.6))- B -, da relação pontal calado (D/T)- C-, e da condição que define o espaço disponível e requerido para praça de máquinas -D.



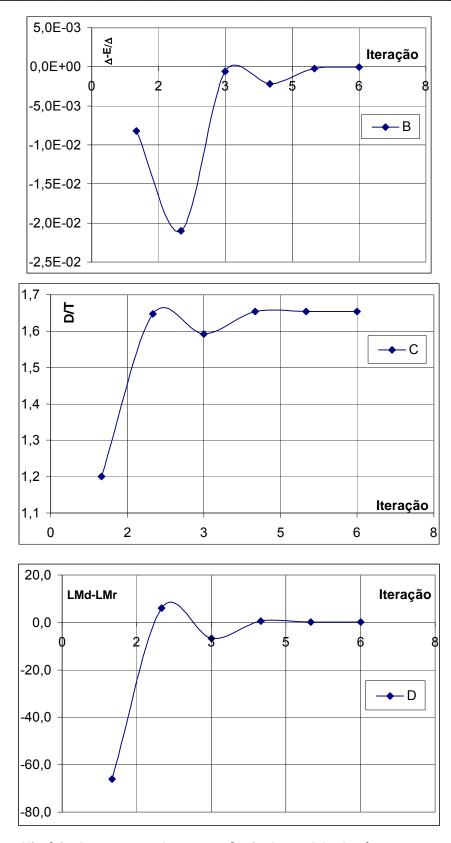
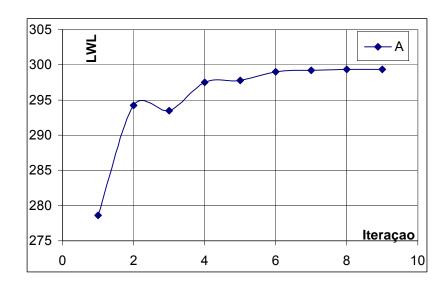


Figura 4.6: História do processo de convergência do modelo de síntese proposto para o primeiro navio escolhido.

O comportamento de convergência da boca, deslocamento e empuxo é similar ao apresentado pelo comprimento, uma vez que estão diretamente ligados pela equação (2.1). Observa-se na figura acima que a convergência ocorre com um valor de comprimento de 211.5⁴¹ m, uma relação pontal-calado de 1.65, diferença entre espaço disponível e requerido de 0.2 m e a diferença porcentual entre peso e empuxo sendo igual a 1.73e-5. Para o valor inicial da razão pontal-calado, 1.2, observa-se que o espaço requerido da praça de máquinas é maior que o disponível em mais de 65 metros. Logo na seguinte iteração D/T é corrigido para o valor de 1.65, o que gera um espaço disponível maior em 5.9 m que o requerido, ficando fora da margem de 5m utilizada como limite sendo necessário modificar novamente D/T na próxima iteração para atingir a faixa permissível (0-5 m). Assim o processo chega, depois de 5 iterações, finalmente a obter um navio balanceado.

O processo de convergência das variáveis para o segundo navio escolhido para ilustrar o modelo de síntese é bastante análogo ao anterior. A Figura 4.7 ilustra o comportamento das mesmas variáveis analisados para o navio #1.



⁴¹ Valores numéricos do processo de convergência mostrados no E.

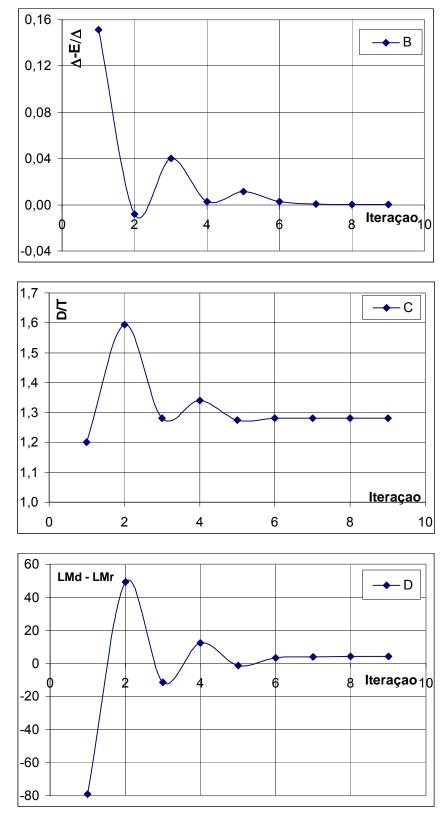


Figura 4.7: Processo de convergência do modelo de síntese proposto para o segundo navio escolhido.

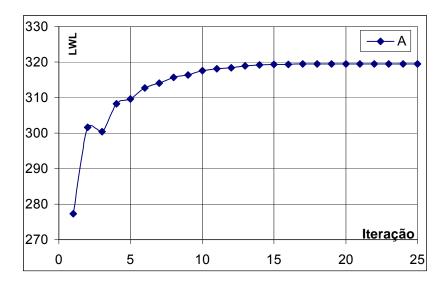
Os comentários referentes ao processo de convergência da razão D/T e espaço disponível da praça de máquinas apresentados para o navio #1 são também válidos para o navio #2. Para este navio, o balanceamento é feito em nove iterações, obtendo um comprimento de 299.34 m, relação pontal-calado de 1.28, diferença entre espaço disponível e requerido de 4.29 m e uma diferença porcentual entre empuxo e peso igual a 8.23e-5.

As variáveis de projeto iniciais que definem o casco e o calado dos dois navios não balanceados são apresentadas a seguir:

Tabela 16 - Variáveis de projeto iniciais que definem a geometria dos navios selecionados e que não foram balanceados.

# Navio	C _{LB}	C _{BT}	C _B	Т
1	5,4	3,90	0,740	13,16
2	6,7	3,60	0,880	12,20

Para o primeiro navio escolhido para análise é mostrado, na figura abaixo, o comportamento, ao longo do processo de balanceamento, das mesmas variáveis usadas para analisar os navios que foram balanceados.



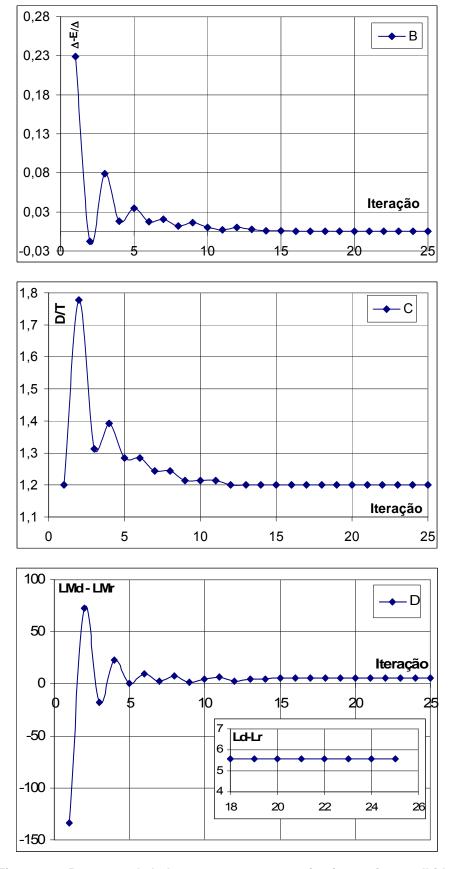


Figura 4.8: Processo de balanceamento para o primeiro navio escolhido.

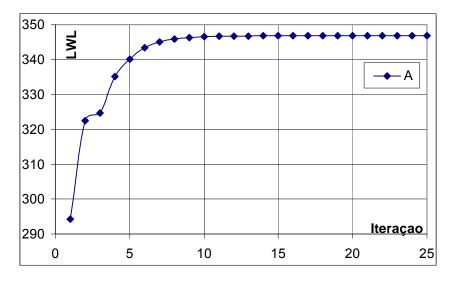
O processo de balanceamento começa calculando um comprimento de 277.25⁴² m, produzindo em seqüência uma estimativa do deslocamento de 184026 Ton e uma diferença entre espaço disponível e requerido de -133.4 m. O algoritmo incrementa na próxima iteração a relação D/T ao valor de 1.78, gerando um espaço disponível superior em mais de 73 m que o valor requerido, o valor do comprimento chega a 301.67 m e a estimativa do deslocamento a 181763 Ton. Na terceira iteração, o comprimento fica em 300.43 m, reduz-se o valor D/T a 1.31 para diminuir o espaço disponível excedente, mas a redução gera uma carência de espaço para a praça de máquinas de -17.44 m. O processo continua assim nas próximas iterações até que a relação D/T chega ao limite mínimo imposto de 1.2 na iteração número 12. Nesse instante, o comprimento do navio é 318.14 m, o deslocamento estimado 217479.4 Ton, a diferença entre o espaço disponível e o requerido é de 2.7 m. Porém, ainda não se conseguiu atingir o nível de precisão estabelecido da equação (4.6) para a diferença entre o peso total do navio e o seu empuxo. Embora na iteração 18 o processo satisfaça o critério de convergência dos pesos, equação (4.6), a diferença entre espaço disponível e requerido passa a 5.55 m superando o valor máximo estabelecido. O valor do comprimento é de 319.4 m, o deslocamento 218449.1 Ton.

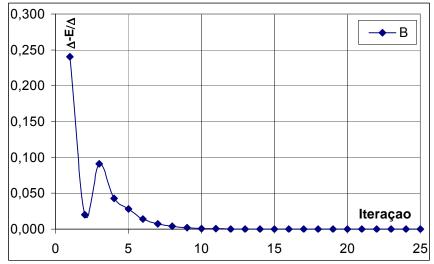
Neste ponto do processo de balanceamento, o conjunto de variáveis já chegou a um equilíbrio, mas sem satisfazer todos os três requisitos impostos para aceitar um navio como balanceado. As variações do comprimento estão na ordem de milímetros, devido ao equilíbrio atingido entre a flutuação e os pesos a bordo. Nas demais iterações, o algoritmo não consegue modificar o espaço disponível para um valor menor a 5 m, sendo finalmente descartada esta solução por chegar ao limite de iterações estabelecidas (25).

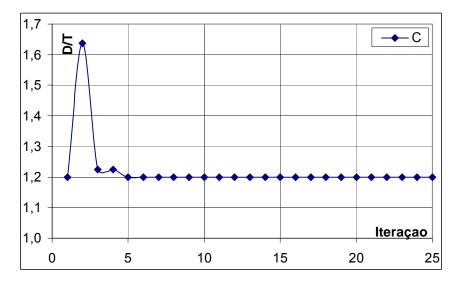
O segundo navio selecionado para análise é mais cheio que o primeiro. Na figura que segue, mostram-se as 4 variáveis apresentadas anteriormente para analisar o processo de balanceamento deste navio.

-

⁴² Valores numéricos apresentados em forma de tabela no APÊNDICE E do presente trabalho







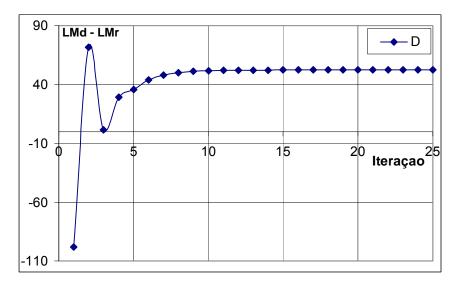


Figura 4.9: Processo de balanceamento para o segundo navio escolhido.

A estimativa inicial de deslocamento de 188082 Ton resulta em um comprimento de 294.2 m e a razão D/T inicial gera uma falta de espaço para praça de máquinas de 98.1 m. Na segunda iteração D/T é incrementado para 1.64, gerando um espaço disponível maior em 71.5 m em relação ao requerido, o novo comprimento é de 322.5 m e o deslocamento resulta em 191933 Ton. Na terceira iteração D/T é reduzido a 1.22, sendo o espaço disponível para a praça de máquinas 1.28 m maior que o requerido. O comprimento resultante é de 324.6 m e o deslocamento é 211233.6 Ton, mas ainda não é satisfeita a equação (4.6). Na iteração seguinte o comprimento atinge 335.2 m, com um deslocamento de 220754.2 Ton. Porém, o espaço disponível fica 29.1 m maior que o requerido, produto de uma redução do comprimento necessário para a carga, que na iteração anterior era de 256 m e passou a 238.6 m.

Depois dessa ocorrência, o processo reduz D/T ao menor valor permitido, mas o comprimento passa a 340.1 m gerando um espaço disponível 35.9 m maior que o valor requerido pela praça de máquinas. O espaço para a carga fica em 236.6 m e o novo deslocamento é 227211.1 Ton. Depois que a razão Pontal-Calado atinge 1.2 o processo não consegue reduzir o espaço disponível para praça de máquinas, o comprimento chega a um ponto de equilíbrio, mas o navio não satisfaz os três condicionantes impostos no processo de balanceamento. O número de iterações atinge o limite de iterações estabelecido sem ser equilibrado em espaço e pesos, para logo ser descartado e um novo conjunto

de variáveis ser gerado para começar novamente o processo de balanceamento.

4.2. Definição das Funções de Mérito Empregadas

No capítulo 3 foi descrito o algoritmo de otimização multidimensional e multiobjetivo empregado nesta pesquisa. Para avaliar cada solução é necessário definir as funções de mérito ou funções objetivo, que dirão quão bom ou ruim é um indivíduo dentro da população estabelecendo seu respectivo ranking – vide Figura 3.14, necessário para determinar a Aptidão de cada solução, parâmetro este utilizado no processo de seleção do algoritmo.

As funções de mérito escolhidas, para o problema do projeto preliminar de um navio petroleiro, são o custo total de construção e operação na vida útil do navio e o vazamento médio de óleo, sendo o cálculo destas descrito nos itens 2.15 e 2.16 respectivamente.

Os modelos de custo apresentados são basicamente dependentes do peso do item ao qual se referem. No subcapítulo 2.11.1.1, apresentou-se cinco diferentes modelos paramétricos que estimam o peso da estrutura de aço (casco + superestrutura). A descrição deste item por mais de um modelo foi feita pelo fato de que este item tem uma maior participação no peso leve do navio quando comparada às outras duas componentes: Outfit e Sistema Propulsor. Além disto, os valores absolutos obtidos a partir de cada um dos modelos podem ser significativamente diferentes.

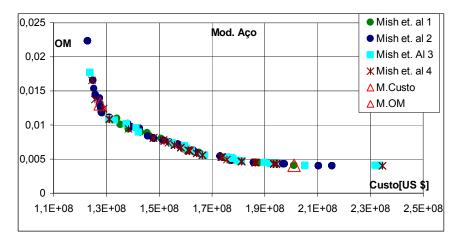
Com o intuito de analisar a influência do uso de um ou outro modelo para a estimativa do peso foram realizadas diversas corridas com os cinco modelos comparando as dimensões principais dos navios obtidos como soluções ótimas correspondentes ao menor Custo Total e menor Vazamento Médio. Para esta avaliação foi utilizado o modelo PODAC para estimar o Custo Total de cada navio. Para cada modelo realizou-se várias rodadas com a finalidade de

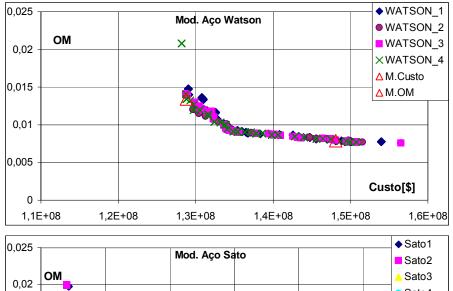
comprovar a convergência para a fronteira de Pareto a partir de diferentes soluções iniciais, assim também, obter uma curva resultante com soluções dispersas em todo seu domínio. Cada rodada de cada modelo foi realizada com os seguintes dados:

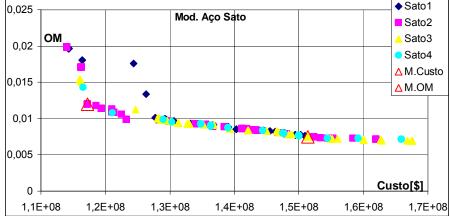
Tabela 17 - Dados empregados para a comparação entre modelos de Peso do Aço.

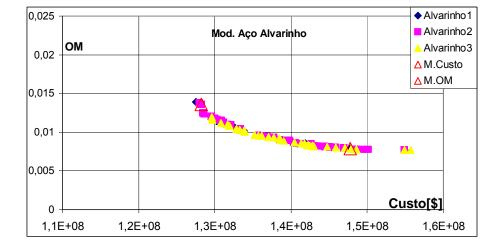
Requisito de Projeto	Valor
Peso Morto [Ton]	153000
Autonomia [milhas]	20000
Velocidade [nós]	14
Densidade da Carga [Ton/m³]	0.8674
Parâmetros do AG	Valor
N_{POP}	800
N_{GER}	50
P _c	0,85
P _m	0,025
N _{FILTRO}	50
N _{TORNEIO}	10

Na figura seguinte, mostram-se as curvas de Pareto obtidas com os modelos de Peso de Mish et al, Watson, Sato, Alvariho e Harvald.









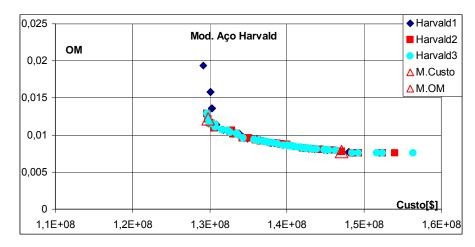


Figura 4.10: Comparação das curva de Pareto para cada modelo de Peso analisado.

Determinaram-se as dimensões principais dos navios que têm mínimo custo e mínimo vazamento médio como parâmetros de comparação entre os modelos. Com o intuito de comparar as soluções ótimas obtidas com cada um dos cinco modelos, escolheu-se nas respectivas fronteiras de Pareto o primeiro ponto na vertical e horizontal antes de se verificar uma mudança na curvatura da curva. Os resultados correspondentes aos navios com mínimo custo são mostrados na tabela seguinte.

Tabela 18 - Dimensões principais obtidas com os diferentes modelos de peso do aço das soluções com mínimo custo total.

Modelo	DIMENSÕES PRINCIPAIS NAVIO COM MÍNIMO CUSTO							
Wiodelo	LWL	В	Т	D	СВ	Custo	OM	
Mish et. al	244,34	48,38	17,59	29,06	0,83	1,2768E+08	0,0131	
Watson	238,47	47,22	17,82	28,27	0,87	1,2878E+08	0,0134	
Alvarinho	240,56	46,71	17,63	27,38	0,88	1,2822E+08	0,0136	
Sato	258,05	47,79	17,70	28,68	0,77	1,1724E+08	0,0120	
Harvald	289,17	41,61	16,32	24,55	0,90	1,2979E+08	0,0122	

Com ressalva do modelo de Sato, todos os navios têm um alto Coeficiente de Bloco. O modelo de Harvald obtém uma solução cujas características estão afastadas consideravelmente das obtidas pelos outros modelos. Porém, pode se dizer, em forma geral, que as soluções são "próximas" entre si e consideramse como equivalentes. Embora diferenças sejam observadas na forma e distribuição final da fronteira de Pareto obtida a partir de cada modelo, os modelos chegam a soluções próximas quando diferentes soluções de cada curva são comparadas. Porém, o modelo de Mish et al apresenta uma melhor

distribuição das soluções encontradas, definindo-se claramente um patamar horizontal que representa a minimização do vazamento médio, um patamar vertical representando a minimização do custo e uma zona intermediária onde existe um "balanço" entre custo total e vazamento médio.

De forma análoga, mostram-se as dimensões principais das soluções correspondentes ao mínimo vazamento (OM) para cada modelo de peso do aço.

Tabela 19 - Dimensões principais obtidas com os diferentes modelos de peso do aço das soluções com mínimo vazamento meio (OM).

Modelo	DIMENSÕES PRINCIPAIS NAVIO COM MÍNIMO OM							
Wiodelo	LWL	В	Т	D	СВ	Custo	OM	
Mish et. al	346,13	50,16	18,93	22,72	0,71	2,0113E+08	0,0041	
Watson	362,52	52,16	13,37	20,54	0,74	1,4807E+08	0,0079	
Alvarinho	361,74	52,05	14,07	21,39	0,71	1,4775E+08	0,0079	
Sato	367,05	52,81	13,90	21,24	0,71	1,5141E+08	0,0075	
Harvald	366,46	52,73	13,18	20,51	0,73	1,4708E+08	0,0078	

Para este caso as soluções obtidas são muito mais próximas entre si. Todos os modelos ficaram com valores do coeficiente do Bloco muito próximos ao limite inferior da faixa de valores permitidos $\left(0.7 \le C_{\text{B}} \le 0.9\right)$. O comprimento, boca, calado e pontal são equivalentes, com exceção do modelo de Mish et. al que obteve um comprimento um pouco menor exigindo maiores valores para o calado e a boca. Em função destas análises escolheu-se o modelo de Mish et. al para ser utilizado como função objetivo pela boa qualidade na densidade de soluções da curva em seus patamares horizontais e verticais, assim como na região central da curva.

Para o processo de otimização que está sendo proposto é necessário definir a função a ser utilizada para a estimativa do custo total de um projeto novo de um navio petroleiro (problema em estudo).

Assim também se realizou uma comparação das soluções obtidas empregando os diferentes⁴³ modelos de custo de construção descritos no subcapítulo 2.15.1.

⁴³O modelo de custo de Carreyette não foi incluído nesta análise comparativa considerando o fato de que todas as estimativas dos custos de operação são feitos em dólares (US\$) e o

A Figura 4.11 apresenta as fronteiras de Pareto obtidas com cada modelo de custo descrito e utilizando o Modelo de Mish et al. para a estimativa do peso da estrutura.

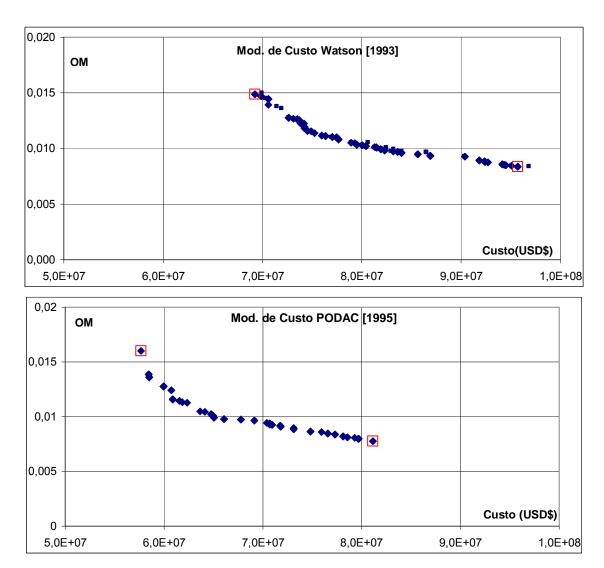


Figura 4.11: Comparação das curvas de Pareto obtidas para cada modelo de custo analisado.

Relembra-se que os modelos de Watson e PODAC produzem estimativas do custo em dólares dos EUA. É importante ressaltar que só foi calculado o custo de construção dos três itens que definem o peso leve do navio (Aço+Outfit+S. Propulsão).

modelo de Carreyette em libras esterlinas (£), do ano 1977, existindo uma grande diferença em valor absoluto de cada item, ficando "inviável" uma possível combinação deles.

Na figura acima observa-se uma tendência similar nas duas curvas apresentadas, porém as faixas dos valores do custo são diferentes, sendo o modelo de Watson que calcula o máximo e PODAC o mínimo custo. As características dos pontos que correspondem às soluções com mínimo custo são mostradas a seguir:

Tabela 20 - Dimensões principais obtidas com os diferentes modelos de custo de construção para as soluções com mínimo custo.

Modelo	DIMENSÕES PRINCIPAIS NAVIO COM MÍNIMO CUSTO						
Modelo	LWL	В	T	D	Св	Custo	OM
Watson	232,274	46,082	16,623	27,642	0,85	6,927E+07	0,01488
PODAC	234,791	45,656	16,415	27,024	0,86	5,770E+07	0,01601

Observa-se a proximidade dos resultados obtidos, assim como a coerência entre eles, assim, sendo o comprimento a dimensão mais cara seria esperado que as soluções de mínimo custo apresentassem menores valores de comprimento e maiores valores para a boca e calado.

Na tabela seguinte são apresentadas as características principais dos navios solução que correspondem ao mínimo vazamento médio obtido com os dois modelos:

Tabela 21 - Dimensões principais obtidas com os diferentes modelos de peso do aço param as soluções com mínimo vazamento médio (OM).

Modelo	DIMENSÕES PRINCIPAIS NAVIO COM MÍNIMO OM						
Modelo	LWL B T D CB Custo OM						OM
Watson	340,201	50,656	13,927	21,662	0,71	9,572E+07	0,00834
PODAC	347,955	51,864	13,493	21,080	0,71	7,931E+07	0,00846

Mostrando similaridade com os resultados dos navios correspondentes ao mínimo Custo, as soluções são muito próximas entre si, com um baixo coeficiente de bloco e correspondentes incrementos no comprimento e boca para poder satisfazer os requisitos de carga quando comparados com os navios maios cheios relacionados ao mínimo Custo. Assim também, observa-se na Tabela 20 que, sendo o pontal a dimensão mais econômica, os navios com mínimo custo têm maior valor quando comparados aos navios de mínimo OM, com alto custo (Tabela 21).

O que interessa para o processo de otimização não é o valor exato do custo e sim a tendência da curva de custo. Tendo os dois modelos a mesma tendência, a escolha do modelo de custo não interfere na fronteira de Pareto obtida.

O modelo PODAC foi definido como função de mérito, empregado para compor o custo total de um projeto novo pelo fato de ser um modelo mais completo, discriminando melhor os sistemas componentes do navio quando comparado com o modelo de Watson.

Resumindo, definem-se as funções objetivo do problema proposto da seguinte maneira:

$$\begin{split} & \text{Minimizar: } \phi(X) = \left[f_1(Y), f_2(Z)\right] \\ & \text{Sendo:} \\ & f_1(Y) = g \Big[\Delta(X), WS(X), W_M(X), W_{\text{margim}}(X), N_{\text{TRIPULAÇAO}}(X), WFO(X), E, V_s(X), \dots \\ & P_{\text{systyp}}, N_{\text{CARGO}}\Big] \\ & f_2(Z) = h \Big[W_{\text{PESO_LEVE}}(X), LWL(X), D \Big(X, \frac{D}{T}\Big), T(X), N_{\text{CARGO}}, h_{\text{db}}, w, C_w(C_B), L_{\text{Requerido}}^{\text{Motor}}(X), \dots \\ & LStk(X), LCtk(X), BCB(X), DCB(X), CStk, CFtk, \tilde{N}_{\text{CARGA}}(X)\Big] \\ & \text{Onde:} & X = \Big(C_{\text{LB}}, C_{\text{BT}}, C_{\text{B}}, h_{\text{db}}, w, N_{\text{CARGO}}, P_{\text{systyp}}, N_{\text{POPA}}, ManFac, H_{DK}\Big) \\ & f_1 = \text{Custo Total} \\ & f_2 = \text{OM} = \text{Vazamento Médio} \end{split}$$

Levando em conta a descrição anterior, o problema de otimizar as dimensões principais de um navio petroleiro na fase de Projeto Preliminar fica formulado da seguinte maneira:

```
\begin{split} & \text{Minimizar: } \phi(X) = \left[f_1 \Big(g(X)\Big), f_2 \Big(h(X)\Big)\right] \\ & \text{Sujeito: } \\ & \frac{T_{\text{LASTRO}}}{T_m} \geq 1 \\ & \frac{Vs}{V} \geq 1 \\ & \left(\frac{GM}{B}\right)_{\text{LASTRO & CARREGADA}} \geq 0.08 \\ & \frac{D-T}{F_{\text{MIN}}} \geq 1 \\ & \text{Onde: } & X = \Big(C_{\text{LB}}, C_{\text{BT}}, C_{\text{B}}, N_{\text{POPA}}, h_{\text{db}}, w, N_{\text{CARGO}}, P_{\text{systyp}}, \text{ManFac}, H_{\text{DK}}\Big) \end{split}
```

Depois de ter detalhado os modelos paramétricos que definem o navio, explicado o algoritmo otimizador e definido as funções de mérito do problema, a ferramenta de projeto foi programada utilizando a linguagem de programação do programa Matlab. A ferramenta possui uma interface para que o usuário possa fornecer os requisitos de projeto, as faixas de valores de cada variável independente e os parâmetros do algoritmo genético. Uma vez terminado o processo de otimização a ferramenta cria um arquivo de resultados, formato".xls", mostrando as soluções finais que pertencem à fronteira de Pareto. É importante salientar que a implementação do procedimento de otimização foi validada com resultados disponíveis na literatura, conforme descrito no item 3.6

Para encerrar o capítulo serão apresentados os resultados obtidos para os estudos casos de realizados, onde se comparam com as dimensões principais de um navio Aframax, um navio Suezmax e um Panamax , todos operando atualmente.

4.3. Estudos de Casos

Com o objetivo de avaliar a efetividade do processo de seleção das dimensões ótimas para um navio petroleiro, apresentam-se a seguir os estudos de casos realizados com o PATANGA. Em cada um dos casos apresentados, as

dimensões das embarcações reais são comparadas às dimensões das soluções ótimas obtidas pelo procedimento proposto.

O primeiro navio escolhido para realizar a análise comparativa de suas dimensões principais com os resultados do processo proposto é o navio Hellspont Tatina do tipo Aframax. Hellspont é um grupo dedicado ao transporte e serviços oceânico desde 1946, provendo soluções aos problemas relacionados ao transporte marítimo. No seu site⁴⁴ estão disponíveis as informações técnicas de seus 15 navios, de diversas capacidades de carga, e o Tatina foi escolhido para a análise comparativa.

Os dados de projeto empregados para executar o PATANGA são mostrados na tabela a seguir:

Tabela 22 - Requisitos de projeto impostos para o navio Hellspont Tatina.

Descrição	Valor
Peso Morto [Ton]	105535
Autonomia [Milhas Náuticas]	22036,8
Velocidade [Nós]	14
γ carga [Ton/m^3]	0,8674
Vida Útil [anos]	30

Com o objetivo de estudar a sensibilidade dos parâmetros N_{POP} , N_{GER} e P_{c} , que são os parâmetros mais significativos em uma procura usando AGs, na fronteira ótima de Pareto foram feitas diversas execuções do PATANGA para variadas configurações dos 3 parâmetros, obtendo finalmente a calibração ótima dos parâmetros indicados. Para todas as execuções foram empregados 50 indivíduos no filtro e o torneio foi feito entre 10 cromossomos.

Na Figura 4.12 mostra-se a fronteira de Pareto para os diversos valores do tamanho da população, mantendo constante para cada execução o número máximo de gerações (35), a probabilidade de cruzamento (0.85) e de mutação (0.028). Analogamente, na Figura 4.13, mostra-se a fronteira ótima de Pareto

⁴⁴ http://www.hellespont.com/index.php?seite=ships&id=7

para dois valores do número máximo de gerações, mantendo constante o número de cromossomos (850) e as probabilidades P_C (0.85) e P_m (0.028).

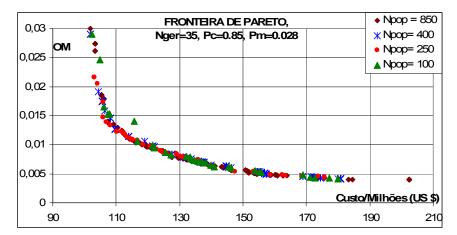


Figura 4.12: Fronteira ótima de Pareto para diversos tamanhos de populações iniciais para o projeto do navio Tatina.

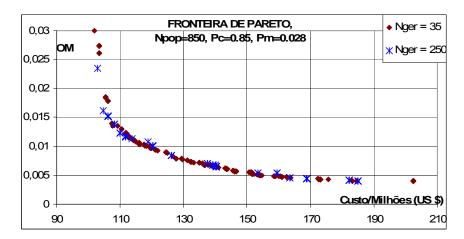


Figura 4.13: Fronteira ótima de Pareto para vários tamanhos máximos do número de gerações para o projeto do navio Tatina.

Por último, na Figura 4.14, mostra-se a fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade de cruzamento, mantendo constante o número de indivíduos da população (850), o número de Gerações máximas (35) e a probabilidade de mutação (0.028).

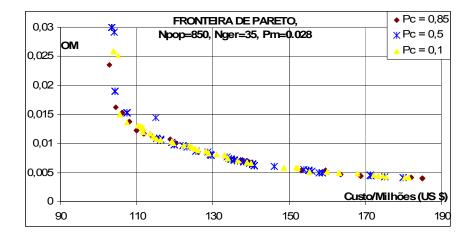


Figura 4.14: Fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade de cruzamento para o projeto do navio Tatina.

As três figuras anteriores mostram a robustez dos AGs ao não ter dependência da configuração inicial dos parâmetros N_{POP} , N_{GER} e P_{C} para identificar a fronteira ótima de Pareto.

A fronteira ótima de Pareto para três execuções do PATANGA é mostrada na Figura 4.15. Os parâmetros finalmente escolhidos para configurar o algoritmo foram:

- Tamanho da população (N_{POP}): 850 indivíduos;
- Número de gerações (N_{GER}): 50 gerações;
- Probabilidade de Cruzamento (P_c): 0.85;
- Probabilidade de Mutação (P_m): 0.028;
- Número de Indivíduos no Torneio: 10;
- Tamanho do Filtro: 50 indivíduos.

Quatro pontos distintivos são marcados na curva: um corresponde à solução com mínimo custo, outro representa a solução com mínimo OM, um terceiro ponto representando o navio Tatina e o quarto é o mais próximo da fronteira de Pareto ao navio Tatina.

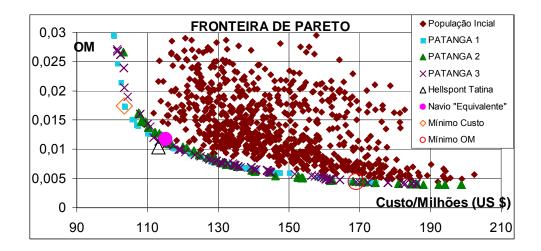


Figura 4.15: Fronteira ótima de Pareto para o projeto do navio Hellspont Tatina.

As soluções selecionadas no patamar horizontal e vertical são aqueles pontos colocados imediatamente antes que exista uma variação de curvatura da fronteira nessas regiões. Deve se comentar que o navio Tatina não está⁴⁵ satisfazendo os requisitos da MARPOL 73/78 com respeito ao calado mínimo (T_m=6.58 m) na condição de lastro, equação (2.6), qauando comparado ao calado (T_{LASTRO}=6.07 m) obtido com a equação (2.33), sendo esse o motivo pelo qual o Tatina tem um menor custo e vazamento médio quando comparado com as soluções da fronteira ótima de Pareto da Figura 4.15.

Na Tabela 23 são apresentados, para os quatro pontos indicados anteriormente, os 10 parâmetros de projeto, as dimensões principais, componentes do deslocamento, potência requerida, critérios de estabilidade inicial e os valores das funções objetivos. O peso do Outfit e do sistema propulsor são as únicas características calculadas com o modelo paramétrico proposto no capítulo 2, sendo todas as demais obtidas de Hellspont (2006).

A perfomance, similaridades e diferenças de cada navio podem ser avaliadas considerando as relações L/B, B/T, L/D e C_B e sua influência nas características da resistência estrutural, resistência ao avanço, estabilidade transversal inicial,

-

⁴⁵ Assumindo que as expressões utilizadas no cálculo dos itens componentes do peso, na condição em lastro, representam em forma apropriada os pesos do navio Tatina.

borda livre e finalmente os custos de construção e operação e vazamento médio de óleo.

Tabela 23 - Características do navio Hellspont Tatina e resultados obtidos com o PATANGA.

Parâmetro	Projeto PATANGA	Aframax Hellespont Tatina	Mínimo Custo	Mínimo OM
C_LB	5,2	5,5	5,1	6,9
С _{вт}	2,9	2,8	2,7	2,7
C _B	0,835	0,828	0,848	0,704
h _{db}	3,62	2,09	2,5	3,9
W	2,35	2,23	2,46	2,58
N _{CARGO}	7	6	4	8
P _{systyp}	2	1	2	1
N _{POPA}	2		2	2
ManFac	0,56		0,50	0,51
H _{DK}	2,00	2,67	2,50	3,0
Comprimento -LWL- [m]	224,17	229	212,31	308,43
Boca -B- [m]	43,44	42,0	41,96	44,51
Pontal -D- [m]	25,02	21,30	26,76	21,50
Calado -T- [m]	14,83	14,88	15,37	16,30
C _x	0,993		0,997	0,993
N _{TRIPULAÇÃO}	15	28	13	14
Δ [Ton]	124200,6	121500,0	119608,0	162290,1
Carga [Ton]	101157,7	100247,2	101176,4	100774,9
Peso Casco [Ton]	14459,0	12861,5	10297,4	49922,8
Peso Outfit [Ton]	2390,8	2333,3	2250,4	2676,0
Peso Sist. Propulsor [Ton]	691,3	770,2	691,3	1007,2
MCR [HP]	17740	16320	17740	20000
Velocidade -Vs- [nós]	14,2	14,0	14,26	14,35
(GM/B) _{lastro}	0,304		0,282	0,266
(GM/B) _{carregado}	0,082		0,054	0,148
Custo Construção (US \$)	65,9	65,4	59,4	117,8
Custo Total (Milhões US \$)	115,1	113,1	103,4	169,0
Vazamento Médio (OM)	0,0117	0,0104	0,0174	0,0044

Os três primeiros parâmetros da Tabela 23, que definem a geometria do navio e os respectivos valores de comprimento, boca, pontal e calado mostram, que em termos gerais o projeto PATANGA e o Hellspont Tatina são navios similares ou equivalentes.

A resistência estrutural está influenciada fortemente pela relação L/D sendo atualmente aceitável pelas sociedades classificadoras um valor máximo entre 15 e 16 e mínimo entre 9 e 10. Assim, tendo o navio Tatina um L/D de 10.75 e o projeto PATANGA um valor de 9 mostram uma adequada resistência primária, sendo os esforços de flexão primários menores no navio Tatina. Porém, por ser o projeto PATANGA uma "viga" muito "Alta" poderia ter problemas por flambagem.

A resistência ao avanço está influenciada principalmente pelas relações L/B, B/T e C_P , existindo uma combinação ótima dos parâmetros C_B e C_x , que definem o C_P , que minimiza a resistência. O sistema de propulsão projetado corresponde a dois motores de média velocidade, obtendo uma potência total maior em 8.7% quando comparada ao sistema do Hellspont Tatina, que possui um único motor principal de baixa velocidade, conseguindo os dois navios a velocidade de projeto requerida satisfatoriamente.

A potência requerida estimada, usando o método de Holtrop, para o navio Tatina é de 16693 HP, resultando em uma pequena diferença de 2.2% com referência ao valor atual instalado no navio. As parcelas de resistência para cada navio são como segue:

Tabela 24: Parcelas da resistência ao avanço para o navio Hellspont Tatina e o projeto equivalente obtido com PATANGA.

Parcela / Navio	Hellspont	Projeto
Parcela / Navio	TATINA	PATANGA
Rf (Atrito) [N]	6,88E+05	7,06E+05
Rw (Ondas) [N]	3,92E+04	4,40E+04
R _B (Bulbo) [N]	7,46E-10	3,53E-09
R _{TR} (Popa Tramsom) [N]	2,10E+05	2,15E+05
R _A (Efeito Escala) [N]	1,87E+05	1,87E+05

Um dos motivos pelo incremento da potência requerida para o projeto PATANGA resulta de um maior valor da parcela de resistência por atrito, devido ao fator de forma ser maior em quase 3%, sendo a área molhada de ambos os cascos praticamente iguais. Um dos fatores que resulta no projeto PATANGA apresentar maior fator de forma é o coeficiente de bloco, sendo coerente com o esperado teoricamente. Contudo, acredita-se que a principal causa da diferença

da potência instalada é o produto das margens de projeto (fatores de segurança empregados nas estimativas, por exemplo, por condições severas do mar) empregadas para o navio TATINA.

A borda livre é geralmente estabelecida pela IMO ou pela estabilidade transversal ou pela resistência estrutural do navio. A recomendação da IMO é dependente principalmente do comprimento, do coeficiente de bloco e da relação L/D, sendo o procedimento de cálculo mostrado no apêndice D. A borda livre do projeto PATANGA resultou em 3.77 m a mais do valor apresentado pelo TATINA (6.42 m), sendo que o pontal do projeto PATANGA fica estabelecido em função do peso da carga a ser transportada, segundo o procedimento de balanceamento explicado em 4.1, e tendo maior capacidade de carga, maiores valores dos parâmetros que definem o espaço de carga e menor cumprimento é lógico esperar o maior pontal no navio equivalente.

A estabilidade transversal inicial, no processo racional proposto, é uma das características que avalia a boa ou má performance de cada navio durante a otimização. A altura do metacêntro (KM) é dependente da razão B/T e a posição do centro vertical de gravidade como uma função do pontal (D). Um critério aceitável e rápido de ser calculado para avaliar a estabilidade transversal é a relação B/D. Segundo Watson (1998) um valor de 1.5 pode ser considerado para navios "pouco" estáveis e 1.8 para navios com "boa" estabilidade. Para o caso em análise, o navio Tatina tem uma relação B/D=1.97 e o projeto PATANGA um valor de B/D=1.74 apresentando assim, ambos os navios, uma estabilidade transversal inicial aceitável. Sendo o valor da boca em ambos os projetos muito próximas, a diferença da estabilidade transversal é função da diferença do valor do pontal.

A configuração do espaço de carga dos navios é similar, porém com certas diferenças no valor da altura do duplo fundo. O navio Hellspont Tatina tem 12 tanques de carga (6 em cada bordo), enquanto o projeto PATANGA têm 14 tanques (7 em cada bordo), tendo ambos navios um alto nível de segurança para uma possível situação de risco de vazamento da carga transportada.

As componentes do deslocamento mostram que o Projeto PATANGA tem capacidade para transportar carga muito próxima, diferença de 0.9%, quando comparada ao Hellspont Tatina. O componente de peso do Outfit difere em 2.5%, do casco em 12.4% e do sistema propulsor em 10.2%, mostrando margens aceitáveis nas estimativas preliminares de cada um desses itens para o projeto PATANGA. O peso do casco está governado pelas dimensões principais (LWL, B e D) e pelo coeficiente de bloco.

Embora o navio Tatina tenha um comprimento maior em 2.1% que o projeto PATANGA, esperando-se um maior peso do casco, acredita-se que o maior pontal (17.5%), maior boca (3.4%) e maior coeficiente de bloco (0.81%) geram o maior valor no caso do projeto PATANGA. A diferença em peso do sistema de propulsão é função principalmente do tipo de motor escolhido no Tatina (motor de baixa velocidade, porém mais pesado) com um peso aproximado de 230 ton contra 142 ton para o projeto PATANGA.

O peso leve (18593 ton) do projeto PATANGA é maior em 16.5%, quando comparado ao navio Hellspont Tatina, considerando a margem a mais de 6% para crescimento ou erro nas estimativas dos componentes do peso leve e sem essa margem existe uma diferença de 9.8%. Somando os valores do peso leve e da carga para o navio projetado e o Hellspont Tatina obtêm-se 119751 e 116212 Ton, respectivamente. A diferença entre o deslocamento e a soma anterior corresponde ao peso dos itens variáveis do peso morto (consumíveis, víveres, tripulação, etc.) indicando que o Tatina possivelmente tenha maior capacidade nos tanques de combustível, água e provisões, sendo coerente com a estimativa feita do número de tripulantes para cada navio.

Analisando os custos de construção de cada navio se observa a grande proximidade que existe (diferença de 0.75%) na estimativa de ambos, já os custos operacionais diferem em 3% e os custos totais em 1.7% a mais para o projeto PATANGA, sendo consideradas todas as margens como aceitáveis. O custo inferior de operação do navio Hellspont Tatina possivelmente resulta do menor valor de comprimento, boca e coeficiente de bloco quando comparado ao projeto PATANGA.

Desta forma, pode-se dizer em termos gerais que há uma boa semelhança entre o projeto PATANGA e o navio Hellspont Tatina, mostrando a aplicabilidade do processo de projeto sugerido nesta pesquisa ao projeto preliminar de navios petroleiros. O procedimento proposto apresenta como resultado a fronteira de Pareto e que cabe ao projetista escolher a configuração mais adequada ao seu propósito levando em consideração os valores de custo e vazamento médio de cada indivíduo da fronteira apresentada.

Assim, não será possível obter uma melhora simultânea em custo e vazamento em relação aos projetos identificados na fronteira de Pareto satisfazendo as restrições impostas no projeto (estabilidade, velocidade de operação, quantidade de lastro e borda livre).

As características dos navios de mínimo custo, doravante chamado de MC, e mínimo vazamento, doravante chamado de MV, serão analisadas a seguir. Como é de se esperar, o navio de mínimo custo corresponde ao de menor comprimento (dimensão mais cara) quando comparado ao de mínimo OM e sendo as outras duas dimensiones principais (B e T) próximas, resulta disto um navio cheio paro o opção de mínimo custo e um de formas mais finas para o de mínimo OM.

Já a resistência estrutural avaliada pela relação L/D mostra que o navio MV está dentro dos limites permitidos pelas sociedades classificadoras (14.3), enquanto o navio MC tem uma relação um pouco baixa (7.9) devendo ter em consideração possíveis problemas por flambagem para esta opção da curva de Pareto.

O sistema de propulsão projetado para o navio MC corresponde a dois motores de média velocidade, obtendo uma potência total 11.3% menor quando comparada ao sistema propulsor do navio MV, que possui um único motor principal de baixa velocidade, conseguindo os dois navios a velocidade de projeto requerida satisfatoriamente. As parcelas respectivas da resistência são:

Tabela 25 - Parcelas da resistência ao avanço para o navio de mínimo custo e mínimo OM para o caso de projeto do navio Hellspont Tatina.

Parcela / Navio	Mínimo Custo	Mínimo OM
R _f (Atrito) [N]	6,89E+05	7,77E+05
Rw (Ondas) [N]	5,66E+04	6,74E+04
Rв (Bulbo) [N]	1,54E-10	1,42E-10
R _{TR} (Popa Tramsom) [N]	2,19E+05	2,52E+05
RA (Efeito Escala) [N]	1,79E+05	2,45E+05

Embora o navio MC tenha um C_B maior em 20.5% e a razão L/B seja maior em 37%, o 26.3% a mais no valor do deslocamento do navio MV produz um valor da resistência por atrito 11.4% maior que a correspondente parcela do navio MC.

Quanto às características do espaço de carga, o navio MV teve maior número de tanques e 1.4 m a mais de altura do duplo fundo e 0.12 m maior o duplo costado quando comparado a solução de MC, dando como resultado o menor índice de vazamento médio de óleo. Ambas as alternativas correspondem a navios com alto nível de automatização e com alturas de todos os decks da casaria próximas entre si.

Nenhuma das duas opções mostra vantagem significativa quanto à capacidade de carga. Porém, o navio de mínimo custo requer 11.3% menos de potência ao eixo para obter a velocidade de projeto. Esta opção também tem como vantagem ter menor peso leve, o que está diretamente relacionado ao custo. Deste modo, os custos operacionais diferem em quase 14% a mais para o navio MV quando comparado com o MC, sendo causada possivelmente pelo maior consumo de combustível dado a maior potência requerida para o navio MV. Os custos de construção são quase 50% maiores para o navio MV. Neste caso, basicamente, um dos principais motivos deste incremento são os 31% a mais de comprimento do navio MV.

O segundo navio escolhido para realizar a análise comparativa de suas dimensões principais com os resultados do processo proposto é o navio Ataulfo Alves. Trata-se de um dos navios da Frota Nacional de Petroleiro da Transpetro

construído nos estaleiros da Hyundai. Este navio realiza operações de alívio de plataformas, escoando grande porcentagem da produção da Bacia de Campos até os terminais da Transpetro (CARDOSO, 2006).

Os dados de projeto empregados para executar o PATANGA são mostrados na seguinte tabela:

Descrição	Valor
Peso Morto [Ton]	153000
Autonomia [Milhas Nauticas]	20000
Velocidade [Nós]	14
γ carga [Ton/m^3]	0,8674
Vida Útil [anos]	30

Tabela 26 - Requisitos de projeto impostos para o navio Ataulfo Alves.

Em forma similar ao caso anterior, foi realizada a avaliação da influência dos parâmetros do otimizador na forma final da fronteira ótima de Pareto. Para todas as execuções foram empregados 50 indivíduos no filtro e o torneio foi feito entre 10 cromossomos. A Figura 4.16 mostra a fronteira ótima para três valores do número máximo de gerações, mantendo constante o número de cromossomos (850) e as probabilidades P_C (0.85) e P_m (0.028).

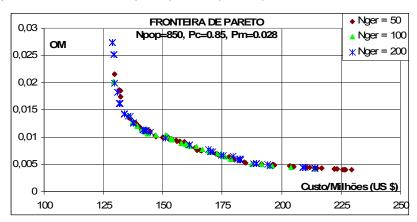


Figura 4.16: Fronteira ótima de Pareto para vários tamanhos máximos do número de gerações para o projeto do navio Ataulfo Alves.

A Figura 4.17 mostra a fronteira de Pareto para diversos valores do tamanho da população (850-400-200), mantendo constante para cada execução o número máximo de gerações (50), a probabilidade de cruzamento (0.85) e de mutação (0.028).

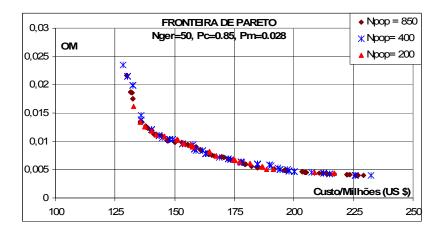


Figura 4.17: Fronteira ótima de Pareto para diversos tamanhos de populações iniciais para o projeto do navio Ataulfo Alves.

Finalmente, na Figura 4.18, mostra-se a fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade de cruzamento, mantendo constante o número de indivíduos da população (850), o número de Gerações máximas (50) e a probabilidade de mutação (0.028).

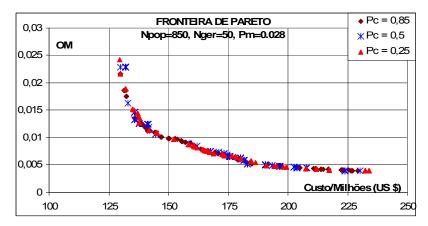


Figura 4.18: Fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade de cruzamento para o projeto do navio Ataulfo Alves.

Novamente, confirma-se a robustez do AGs implementado ao mostrar à curva de Pareto a independência da configuração dos parâmetros N_{POP} , N_{GER} e P_{C} e da população inicial ou pontos de partida.

A figura seguinte mostra a convergência da população inicial à fronteira de Pareto, para três execuções do PATANGA, empregando uma população inicial de 850 navios, probabilidade de cruzamento e mutação de 0.85 e 0.028

respectivamente, torneio realizado entre 10 navios, 50 soluções no filtro e 50 gerações.

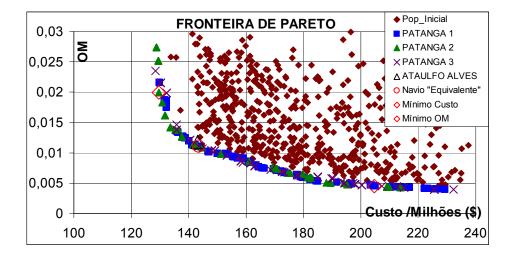


Figura 4.19: Fronteira de Pareto para dimensionar um navio que satisfaça os requisitos de projeto do Suezmax Ataulfo Alves.

Quatro pontos distintivos são marcados na curva: um que corresponde à solução com mínimo custo, outro que representa a solução com mínimo OM, um terceiro representando o navio Ataulfo Alves e o quarto é o ponto mais próximo da fronteira de Pareto ao Ataulfo Alves, sendo o projeto equivalente ao navio Suezmax Ataulfo Alves obtido pelo PATANGA. As soluções selecionadas no patamar horizontal e vertical são aquelas pontos colocados imediatamente antes que exista um cambio de curvatura da fronteira nessas regiões. Observando a solução de mínimo custo, conclui-se que ela apresenta um valor de OM aceitável segundo os limites estabelecidos pela IMO (2005).

Na tabela abaixo são apresentados, para os quatro pontos indicados anteriormente, os 10 parâmetros de projeto, as dimensões principais, componentes do deslocamento, potência requerida, critérios de estabilidade inicial e os valores das funções objetivos.

Tabela 27 - Dimensões do Ataulfo Alves e resultados obtidos com o PATANGA.

DADÂMETOO	Projeto	Ataulfo	Mínimo	Mínimo
PARÂMETRO	PATANGA	Alves	Custo	OM
C_LB	5,7	5,6	5,3	7,0
C _{BT}	2,8	2,8	2,7	2,6
C _B	0,880	0,852	0,880	0,715
h _{db}	2,70	2,40	1,89	3,84
w	2,50	3,75	2,50	2,50
N _{CARGO}	7	6	7	8
P _{systyp}	2	1	2	2
N _{POPA}	2		2	2
ManFac	0,50		0,5	0,55
H _{DK}	2,8	2,65	2,4	2,2
Comprimento -LWL- [m]	260,34	258	241,88	338,94
Boca -B- [m]	46,08	46	46,07	48,77
Pontal -D- [m]	26,39	24,40	27,55	24,27
Calado -T- [m]	16,76	16,2	17,39	18,76
C _x	0,997		0,998	0,994
N _{TRIPULAÇÃO}	15	30	15	16
Δ [Ton]	182199,0	175200,8	175639,4	228353,2
Carga [Ton]	147575,3	137905,3	147575,3	147357,0
Peso Casco [Ton]	23737,4	18317,3	17661,3	67254,2
Peso Outfit [Ton]	2684,6	2672,7	2617,4	2919,7
Peso Sist. Propulsor [Ton]	1028,0	1210,8	1028,0	1081,5
MCR [HP]	22880	20900	22880	23760
Velocidade -Vs- [nós]	14,17	14	14,23	14,12
(GM/B) _{lastro}	0,309		0,320	0,265
(GM/B) _{carregado}	0,090		0,082	0,143
Custo Construção (Milhões US \$)	95,3	93,9	81,5	146,5
Custo Total (Milhões US \$)	143,6	143,1	129,6	204,8
Vazamento Médio (OM)	0,0113	0,01105	0,0199	0,0045

O número de tripulantes, o peso do Outfit e do sistema propulsor são as únicas características calculadas com o modelo paramétrico proposto no capítulo 2, sendo todas as demais obtidas de Cardoso (2006).

Os três primeiros parâmetros da Tabela 27 que definem a geometria do navio e os respectivos valores de comprimento, boca, pontal e calado mostram que o projeto PATANGA e o Ataulfo Alves são navios similares ou equivalentes.

A resistência estrutural avaliada novamente pela razão L/D mostra que ambos os navios estão dentro dos limites recomendados pelas sociedades classificadoras, sendo L/D=11 para o Ataulfo Alves e L/D= 9.9 para o projeto PATANGA.

O sistema de propulsão projetado corresponde a dois motores de baixa velocidade, obtendo uma potência total maior em 9.5% quando comparada ao sistema do Ataulfo Alves, que possui um único motor principal de baixa velocidade, conseguindo os dois navios a velocidade de projeto requerida satisfatoriamente. A potência requerida estimada usando o método de Holtrop para o navio Ataulfo Alves é de 20583 HP, resultando em uma pequena diferença de 1.48% com referência ao valor atual instalado no navio. As parcelas de resistência para cada navio são como segue:

Tabela 28 - Parcelas da resistência ao avanço para o navio Ataulfo Alves e o projeto equivalente obtido com PATANGA.

Parcela / Navio	Ataulfo	Projeto	
Faicela / Navio	Alves	PATANGA	
Rf (Atrito) [N]	8,58E+05	9,39E+05	
Rw (Ondas) [N]	3,93E+04	5,91E+04	
R _B (Bulbo) [N]	1,17E-09	2,58E-10	
RTR (Popa Tramsom) [N]	2,56E+05	2,68E+05	
RA (Efeito Escala) [N]	2,34E+05	2,45E+05	

Observa-se que mais de 60% da resistência ao avanço corresponde à parcela por atrito. Um dos motivos do incremento da potência requerida para o projeto PATANGA resulta dos 9.5% a mais do valor da parcela de resistência por atrito, devido ao fator de forma ser maior em quase 5%, sendo a área molhada de ambos os cascos praticamente iguais. Um dos fatores que faz o projeto PATANGA apresente maior fator de forma é o coeficiente de bloco, sendo coerente com o esperado teoricamente. Similar ao estudo de caso anterior, acredita-se que a principal causa da diferença da potência instalada é o produto das margens de projeto (fatores de segurança empregados nas estimativas, por exemplo, por condições severas do mar) empregadas para o navio Ataulfo Alves.

A borda livre do projeto PATANGA resultou em 1.43 m a mais do valor apresentado pelo Ataulfo Alves (8.2m), sendo que o pontal do projeto PATANGA fica estabelecido em função do peso morto da carga a ser transportada, mostrando coerência com o esperado, isto é, um maior pontal já que o projeto PATANGA leva 7% a mais de carga.

Empregando novamente a razão B/D para avaliar a estabilidade inicial transversal, tem-se o seguinte: um valor de 1.88 para o Ataulfo Alves e 1.75 para o projeto PATANGA. Assim, considera-se que ambos os navios possuem uma estabilidade aceitável, sendo o valor da boca em ambos os projetos muito próximos, a diferença da estabilidade transversal é função da diferença do valor do pontal.

Por outro lado, as componentes do deslocamento mostram que o Ataulfo Alves tem menor capacidade para transportar carga quando comparado ao Projeto PATANGA. As componentes de peso do Outfit e sistema propulsor diferem muito pouco, porém o peso do aço para o projeto PATANGA é maior em quase 5500 Ton (29%), gerando um peso leve maior quando comparado com o navio Ataulfo Alves. Tendo o navio Ataulfo Alves menor comprimento (0.91%), coeficiente de bloco (3.28) e pontal (8.14%) é lógico esperar que tenha menor peso do casco quando comparado com o projeto PATANGA.

Somando os valores do peso leve e da carga para o navio projetado e o Ataulfo Alves obtêm-se 175025 e 160106 Ton, respectivamente. Somando-se a estes valores as parcelas correspondentes ao peso dos consumíveis e tripulação (itens do peso morto, vide), obtêm-se o deslocamento total, indicando que o Ataulfo Alves possivelmente tenha maior capacidade nos tanques de combustível, água e provisões, sendo coerente com a estimativa feita do número de tripulantes para cada navio.

A configuração do espaço de carga dos navios é similar, porém com certas diferenças no valor da largura do duplo costado. O Ataulfo Alves tem 12 tanques de carga (6 em cada bordo), enquanto o projeto PATANGA tem 14 tanques (7 em cada bordo), tendo ambos alto nível de segurança para uma possível

situação de risco de vazamento da carga transportada. Como as configurações do espaço de carga são equivalentes os valores correspondentes de OM são quase iguais, isto é, as alturas do duplo fundo são muito próximas, o Ataulfo Alves tem uma largura do duplo costado 1.2 m maior, quando comparada ao projeto PATANGA, em contraposição ao anterior o projeto PATANGA tem uma divisão a mais do espaço de carga quando comparada com as do Ataulfo Alves o que gera um balanço entre estas duas características gerando, como efeito, navios com similares índices de segurança.

Analisando os custos de construção de cada navio se observa a grande proximidade que existe (diferença de 1.5%) na estimativa de ambos, já os custos operacionais diferem em 2% e os custos totais em 0.3%, sendo consideradas todas as margens como aceitáveis.

Desta forma, pode-se dizer que há uma boa semelhança entre o projeto PATANGA e o Navio Ataulfo, mostrando a aplicabilidade do processo de projeto proposto nesta pesquisa ao projeto preliminar de navios petroleiros. O procedimento proposto apresenta como resultado a fronteira de Pareto, cabendo ao projetista escolher a configuração mais adequada ao seu propósito levando em consideração os valores de custo e vazamento médio de cada indivíduo da fronteira apresentada.

Assim também, não será possível obter uma melhora simultaneamente em custo e vazamento em relação aos projetos identificados na fronteira de Pareto. Por último, acredita-se que o navio Ataulfo Alves é um projeto otimizado considerando ambos os critérios: custo e vazamento.

As características dos navios de mínimo custo, doravante chamado de MC, e mínimo vazamento, doravante chamado de MV, serão analisadas a seguir. Como é de se esperar, o navio MC corresponde ao de menor comprimento (dimensão mais cara) e maior pontal (dimensão mais econômica) quando comparado ao de MV e sendo as outras duas dimensiones principais (B e T) próximas (diferenças de 5 e 7%), resulta disto um navio cheio paro o opção de mínimo custo e um de formas mais finas para o de mínimo OM.

Já a resistência estrutural avaliada pela relação L/D mostra que o navio MV está dentro dos limites permitidos pelas sociedades classificadoras (13.96), enquanto o navio MC tem uma relação (8.78), sendo um pouco menor do mínimo, devendo ter em conta possíveis problemas por flambagem para esta opção da curva de Pareto.

O sistema de propulsão projetado para o navio MC corresponde a dois motores de baixa velocidade, obtendo uma potência total 4% menor quando comparada ao sistema propulsor do navio MV, que possui dois motores principais de baixa velocidade, conseguindo os dois navios a velocidade de projeto requerida satisfatoriamente. As parcelas respectivas da resistência são:

Tabela 29 - Parcelas da resistência ao avanço para o navio de mínimo custo e mínimo OM para o caso de projeto do navio Ataulfo Alves.

Parcela / Navio	Mínimo Custo	Mínimo OM
Rf (Atrito) [N]	9,11E+05	9,65E+05
Rw (Ondas) [N]	6,55E+04	6,16E+03
R _B (Bulbo) [N]	4,43E-11	1,53E-111
RTR (Popa Tramsom) [N]	2,81E+05	3,29E+05
RA (Efeito Escala) [N]	2,32E+05	3,06E+05

Outra vez, observa-se que para este tipo de navio o principal componente da resistência ao avanço é a parcela viscosa, com mais de 60% do valor total. Embora o navio MC tenha um C_B maior em 23.8% e a razão L/B seja maior em 24.5% quando comparado ao navio MV, o 23% a mais no valor do deslocamento do navio MV produz um valor da resistência por atrito 5.5% maior que a correspondente parcela do navio MC.

Referente a estabilidade, pode-se dizer que os navios MC e MV têm uma boa estabilidade inicial transversal, com valores de B/D de 1.7 e 2, respectivamente. Também, a principal diferença da estabilidade transversal é função da diferença do valor do pontal.

Quanto às características do espaço de carga, o navio MV teve maior número de tanques e 1.94 m a mais de altura do duplo fundo quando comparado a

solução MC, resultando num menor índice de vazamento médio de óleo. Ambas as alternativas correspondem a navios com um alto nível de automatização e com alturas de todos os decks da casaria muito próximas entre si (9% diferença).

Nenhuma das duas opções mostra vantagem quanto à capacidade de carga. Porém, o navio MC custo requer menor potência ao eixo para obter a velocidade de projeto. Esta opção também tem como vantagem ter menor peso leve, o que está diretamente relacionado a uma redução de 44.4% nos custos de construção, sendo a principal fonte o 28.6% e 23% a menos no valor do comprimento e do coeficiente de bloco, respectivamente. Por outro lado, os custos operacionais diferem em quase 17.3% a mais para o navio MV quando comparado ao MC, sendo causada possivelmente pelo maior consumo de combustível dado a maior potência requerida para o navio MV.

Finalmente o estudo de caso de um navio Panamax será apresentado na seqüência. O navio escolhido é o Hellspont Pride, que pertence ao grupo Hellspont. Os dados de projeto empregados para executar o PATANGA são mostrados na seguinte tabela:

Tabela 30 - Requisitos de projeto impostos para o navio Panamax Hellspont Pride.

Descrição	Valor
Peso Morto [Ton]	73727
Autonomia [Milhas Náuticas]	16801,85
Velocidade [Nós]	15
γ _{carga} [Ton/m^3]	0,8674
Vida Útil [anos]	30

Para este caso particular foi necessário fazer pequenas alterações no código fonte do PATANGA, especificamente foram acrescentadas duas restrições adicionais as cinco indicadas em 3.5.1, sendo o comprimento e a boca restrita a valores menores ou iguais que 290m e 32.3m, respectivamente. De tal modo, foram realizados testes exploratórios e analisando os resultados se constatou que o navio Hellspont Pride não satisfazia na condição carregada a restrição imposta do GM/B, valor maior que 8% do valor da boca, motivo pelo qual foi calculado, com o modelo descrito em 2.14, o GM do Pride obtendo um valor

aproximado de 0.05B. Portanto, o valor da restrição foi reduzido a um valor mínimo de 4% o valor da boca.

Outras mudanças que tiveram ser feitas, com a intenção de reproduzir características similares ao navio Hellspont Pride, foram o incremento do valor mínimo da razão B/T para um valor de 2.2 e da razão L/B para um valor de 7.5. A necessidade do primeiro incremento é resultado da restrição imposta na boca, já que o valor do KM devia ser incrementado, para obter um valor do GM que resulte num valor de estabilidade positivo. Portanto, chegou-se a conclusão que o valor de B/T de 2 não era suficiente para garantir um valor positivo do GM, sendo logo mudado para o valor mínimo de 2.2. A necessidade da mudança do parâmetro de projeto L/B foi originado quando se observou os resultados exploratórios iniciais, já que o patamar horizontal da fronteira de Pareto não era muito bem identificado.

Uma vez superados as "dificuldades" anteriores, procedeu-se a avalair o impacto dos parâmetros do otimizador na forma final da fronteira de Pareto, esperando-se mostrar novamente a robustez dos AGs. Para todas as execuções foram empregados 50 indivíduos no filtro e o torneio foi feito entre 10 cromossomos.

A Figura 4.20 mostra a fronteira ótima para para diversos valores do tamanho da população, mantendo constante para cada execução o número máximo de gerações (50), a probabilidade de cruzamento (0.85) e de mutação (0.028)

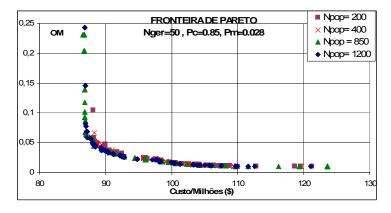


Figura 4.20: Fronteira ótima de Pareto para diversos tamanhos de populações iniciais para o projeto do navio Hellspont Pride.

A Figura 4.21 mostra a fronteira ótima para três valores do número máximo de gerações, mantendo constante o número de cromossomos (1200) e as probabilidades P_C (0.85) e P_m (0.028).

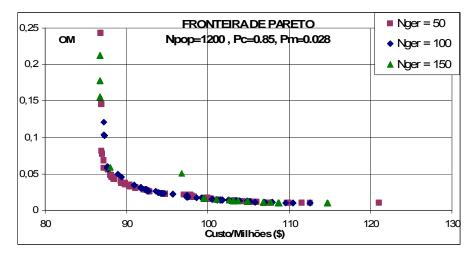


Figura 4.21: Fronteira ótima de Pareto para vários tamanhos máximos do número de gerações para o projeto do navio Hellspont Pride.

Finalmente, na Figura 4.22, mostra-se a fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade de cruzamento, mantendo constante o número de indivíduos da população (850), o número de Gerações máximas (50) e a probabilidade de mutação (0.028).

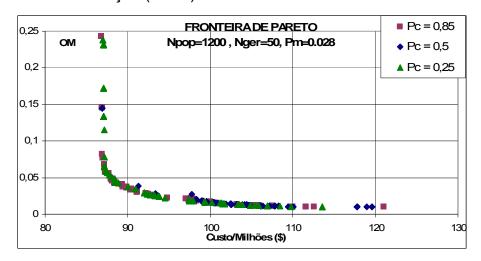


Figura 4.22: Fronteira ótima de Pareto para diversos valores de probabilidade de cruzamento para o projeto do navio Panamax Hellspont Pride.

Na seguinte figura, mostra-se a convergência da população inicial à fronteira de Pareto, para três execuções do PATANGA, empregando uma população inicial de 1200 navios, probabilidade de cruzamento e mutação de 0.85 e 0.028 respectivamente, torneio realizado entre 10 navios, 50 soluções no filtro e 50 gerações.

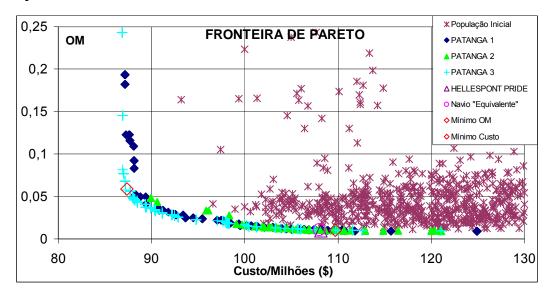


Figura 4.23: Fronteira ótima de Pareto para o projeto do navio Panamax Hellspont Pride.

Os quatro pontos distintivos são marcados na curva: um que corresponde à solução com mínimo custo, outro que representa a solução com mínimo OM, um ponto representando o navio Hellspont Pride e o quarto é o ponto mais próximo da fronteira de Pareto ao Hellspont Pride, sendo o projeto equivalente ao navio Panamax em estudo. As soluções selecionadas no patamar horizontal e vertical são aqueles pontos colocados imediatamente antes que exista um câmbio de curvatura nessas regiões. Observa-se como o navio Pride está localizado no patamar horizontal, podendo ser confundido com o navio de mínimo vazamento de óleo.

Na Tabela 31 são apresentados, para os quatro pontos indicados anteriormente, os 10 parâmetros de projeto, as dimensões principais, componentes do deslocamento, potência requerida, critérios de estabilidade inicial e os valores das funções objetivos.

Tabela 31 - Características do navio Hellspont Pride e resultados obtidos com o PATANGA.

Parâmetro	Projeto PATANGA	Panamax Hellespont Pride	Mínimo Custo	Mínimo OM	
C _{LB}	7,3	7,1	5,1	7,3	
Свт	2,4	2,2	2,2	2,4	
C _B	0,834	0,847	0,741	0,834	
h _{db}	2,64	2,00	1,07	2,69	
W	1,78	2,0	1,02	1,78	
N _{CARGO}	7	6	4	8	
P _{systyp}	2	1	2	2	
N _{POPA}	2		2	2	
ManFac	0,50		0,51	0,51	
H _{DK}	2,1	2,75	2,7	2,1	
Comprimento -LWL- [m]	238,56	228,60	183,83	238,36	
Boca -B- [m]	32,77	32,26	36,05	32,74	
Pontal -D- [m]	21,13	20,80	25,83	21,38	
Calado -T- [m]	13,83	14,52	16,24	13,87	
C _x	0,995		0,999	0,994	
N _{TRIPULAÇÃO}	12	36	13	13	
Δ [Ton]	92861,05	89343,70	82122,42	93020,69	
Carga [Ton]	70627,38	70554,07	70794,48	70625,32	
Peso Casco [Ton]	15541,92	13113,85	5529,87	15695,87	
Peso Outfit [Ton]	1851,66	1758,98	1787,09	1849,50	
Peso Sist. Propulsor [Ton]	691,28	743,87	589,12	691,28	
MCR [HP]	17740	15155,6	15910	17740	
Velocidade -Vs- [nós]	15,20	15	15,10	15,20	
(GM/B) _{lastro}	0,048	0,057	0,038	0,048	
(GM/B) _{carregado}	0,215	0,228	0,305	0,218	
Custo Construção (US \$)	60,24	57,64	45,33	60,39	
Custo Total (Milhões US \$)	108,02	108,15	87,34	109,73	
Vazamento Médio (OM)	0,0106	0,010	0,0590	0,0100	

O peso do Outfit e do sistema propulsor e as razões GM/B para a condição carregada e lastro são as características calculadas com o modelo paramétrico proposto no capítulo 2, sendo todas as demais obtidas de Hellspont (2006).

Analisando os valores dos navios Pride, do projeto PATANGA e do navio de mínimo vazamento médio de óleo, constata-se a afirmação feita da similaridade que existe entre estas três opções.

Os três primeiros parâmetros da Tabela 31 que definem a geometria do navio e os respectivos valores de comprimento, boca, pontal e calado mostram que o projeto PATANGA e o Hellspont Pride são navios similares ou equivalentes.

A resistência estrutural avaliada pela razão L/D mostra que ambos os navios estão dentro dos limites recomendados pelas sociedades classificadoras, sendo L/D=11 para o AHellspont Pride e 11.3 para o projeto PATANGA.

O sistema de propulsão projetado corresponde a dois motores de média velocidade, obtendo uma potência total maior em 17% quando comparada ao sistema do Hellspont Pride, que possui um único motor principal de baixa velocidade, conseguindo os dois navios a velocidade de projeto requerida satisfatoriamente. A potência requerida estimada usando o método de Holtrop para o navio Hellspont Pride é de 17764 HP, resultando numa pequena diferença de 14% com referência ao valor atual instalado no navio. As parcelas de resistência para cada navio são como segue:

Tabela 32 - Parcelas da resistência ao avanço para o navio Hellspont Tatina e o projeto equivalente obtido com PATANGA.

Deveole / Nevie	Hellspont	Projeto	
Parcela / Navio	Pride	PATANGA	
Rf (Atrito) [N]	5,83E+05	5,78E+05	
Rw (Ondas) [N]	5,29E+04	4,24E+04	
Rв (Bulbo) [N]	1,11E-15	4,99E-14	
RTR (Popa Tramsom) [N]	1,56E+05	1,49E+05	
RA (Efeito Escala) [N]	1,62E+05	1,65E+05	

Igual que para o caso dos navios Suezmax e Aframax, observa-se que mais de 60% da resistência ao avanço corresponde à parcela por atrito.

A borda livre do projeto PATANGA resultou em 1 m a mais do valor apresentado pelo Hellspont Pride (6.28m). Empregando novamente a razão B/D para avaliar a estabilidade inicial transversal, vê-se que ambos os navios têm um valor de 1.55, esperando que ambos os navios tenham pouca estabilidade inicial.

Por outro lado, os componentes do deslocamento mostram que o Pride e o projeto PATANGA têm quase a mesma capacidade para transportar carga. As

componentes do sistema propulsor diferem em 7%, sendo os motores de média velocidade do projeto PATANGA o responsável por essa diferença. O componente do Outfit é muito próxima entre si. Já o peso do casco difere em 18%, sendo o 5% a mais no comprimento a principal causa dessa diferença.

A configuração do espaço de carga dos navios é próxima, com pequenas diferenças no valor da altura e largura do duplo costado. O Hellspont Pride tem 12 tanques de carga (6 em cada bordo), enquanto o projeto PATANGA tem 14 tanques (7 em cada bordo). Novamente, conclui-se que se as configurações do espaço de carga são equivalentes produzem valores correspondentes de OM. O projeto PATANGA tem uma altura do duplo fundo 0.64m maior e uma divisão a mais no espaço de carga quando comparada ao Hellspont Pride, em contraposição ao anterior, o Hellspont Pride tem 0.22m a mais na largura do duplo costado e um calado 0.7m maior quando comparado ao projeto PATANGA, o que gera um balanço entre estas duas características, gerando como efeito navios com similares índices de segurança.

Analisando os custos de construção de cada navio, observa-se uma margem de diferença aceitável (4.5%) na estimativa de ambos. Já os custos operacionais diferem em 5.4% e os custos totais em 0.22%, sendo considerado todas as diferenças como aceitáveis.

Desta forma, pode-se dizer que há uma boa semelhança entre o projeto PATANGA e o Navio Pride, mostrando, novamente, a aplicabilidade do processo de projeto proposto nesta pesquisa ao projeto preliminar de navios petroleiros. Não será possível obter uma melhora simultaneamente em custo e vazamento em relação aos projetos identificados na fronteira de Pareto.

As diferenças dos navios de mínimo custo (MC) e mínimo vazamento (MV) serão analisadas em seguida. Observa-se que o MC corresponde à opção com menor comprimento e menor pontal, como é esperado. Porém, por ter estabelecido a mínima relação entre L/B como 5, originou-se um solução que não conseguiria cruzar pelo canal de Panamá, tendo uma boca maior em mais

de 3m do navio de boca máxima⁴⁶, que já passou pelo canal. Desta forma, o navio MC representa uma solução inviável, acrescentado o fato que o "pequeno" comprimento e o "excessivo" pontal produz um navio com pouca estabilidade e que possivelmente apresente problemas por flambagem. Portanto, não é plausível realizar uma comparação adequada entre o navio MC e MV.

Já o navio MV resultou numa opção muito próxima ao navio Hellspont Pride, com adequada resistência estrutural (L/D = 11.15), porém é uma opção pouco estável, B/D≈1.5.

A principal conclusão da análise dos navios MC e MV é que: o navio MC é uma solução totalmente inviável, pois não poderia ser considerada como alternativa durante a escolha de um navio que deva satisfazer os requisitos de projeto impostos (vide Tabela 30) neste estudo de caso.

Para finalizar o capítulo, pode se destacar a efetividade da ferramenta computacional implementada e validada para obter as dimensões principais preliminares de um navio petroleiro, usando AGs como uma ferramenta robusta de procura, tanto para problemas com vários objetivos como multidimensionais com restrições lineares ou não lineares.

⁴⁶Os navios <u>Washington</u> e <u>North Carolina</u> da marinha de guerra dos Estados Unidos de America com bocas de 33.025 metros.

5. Conclusões

Acredita-se que o trabalho desenvolvido nesta dissertação de mestrado atingiu seus objetivos inicialmente propostos. A elaboração de um procedimento racional e sua posterior implementação numa ferramenta de projeto, devidamente avaliada, gerou uma metodologia para dimensionar de forma preliminar uma embarcação do tipo petroleira, satisfazendo diferentes requisitos impostos pelo armador. Além disso, foram apresentadas comparações entre diversas metodologias para estimar os custos de construção e os componentes do peso do aço para navios petroleiros, concluindo que se as tendências dos modelos são as mesmas, a seleção de um ou outro modelo é indiferente na obtenção das soluções ótimas da fronteira de Pareto.

É necessário implementar um procedimento iterativo para determinar as dimensões principais e coeficientes de forma de um navio. Assim, foi proposta uma metodologia simples e efetiva para balancear em peso e volume os diferentes navios soluções do problema de otimização proposto. Mostrou-se que é necessário mais espaço no navio a solução mais simples, imediata e econômica consiste em aumentar o pontal.

O algoritmo otimizador foi inicialmente construído com uma função objetivo, com a finalidade de ganhar experiência e confiança nos algoritmos genéticos como processo de busca robusto. Posteriormente, foi acrescentado um segundo objetivo e o algoritmo foi provado com várias funções testes mostrando efetividade na sua resolução. Portanto, o estudo dos algoritmos genéticos como ferramenta de otimização robusta atendeu ao propósito de apresentá-la como motor de busca eficiente e eficaz para problemas com múltiplos objetivos, espaços de busca multidimensionais e complexos.

Apresentou-se o conceito de dominância de soluções, que gera a fronteira de Pareto para problemas multiobjetivos. Os estudos de casos empregados serviram para ganhar confiança na validade e coerência do modelo paramétrico

implementado, assim como o modelo de síntese proposto nesta pesquisa. A qualidade dos resultados produzidos pela metodologia racional proposta foi comprovada a reproduzir, de forma muito próxima, as dimensões principais, suas razoes e os coeficientes de formas de três diferentes navios que estão em operação atualmente, mostrando-se a efetividade e abrangência da ferramenta computacional construída. Os resultados são sensíveis a correta definição dos modelos paramétricos, o modelo de vazamento de óleo, a faixa de valores dos parâmetros de projeto e dos limites das restrições funcionais impostas.

O algoritmo evolutivo, de forma geral encontrou nas fronteiras ótimas de Pareto navios "Pequenos, Cheios e Altos" para o patamar vertical e navios "Compridos, Esbeltos e largos" para o patamar horizontal sendo essas dimensões as esperadas teoricamente para as soluções de mínimo custo total e mínimo vazamento médio de óleo, respectivamente.

A metodologia racional implementada é recomendada para realizar projetos preliminares de embarcações, sendo necessário a construção de um modelo paramétrico para o navio de interesse, a implementação do algoritmo genético e a integração dos anteriores, gerando uma ferramenta de busca robusta.

Para tomar decisões adequadas no dimensionamento inicial é necessário considerar o efeito das dimensões principais e coeficientes de forma na resistência ao avanço, estabilidade, maniobrabilidade, comportamento no mar, resistência estrutural, restrições de projeto, custos relativos à construção e operação do navio. Portanto, como futuro trabalho, com o objeto de complementar e melhorar a metodologia de projeto proposta, sugere-se a inclusão como função de mérito o comportamento no mar, com o intuito de levar em conta, desde a etapa inicial de projeto, o efeito nas dimensões principais a resposta do navio ao movimento no mar.

Outra tarefa futura seria ampliar o espectro de aplicação do processo proposto, isto é, inicialmente adaptar o modelo paramétrico e o cálculo do vazamento médio para navios tipo VLCC. Assim também, construir um modelo paramétrico

válido para embarcações de "pequeno porte", ou seja de menos de 70 mil toneladas de porte bruto.

Outra tarefa, um pouco mais ambiciosa, seria construir modelos paramétricos válidos para outro tipo de embarcações, por exemplo: Graneleiros, Porta contêiner, Gaseiros, Carga Geral, Pesqueiros, Rebocadores, etc., assim como a criação dos respectivos modelos para avaliar a performance de cada tipo de navio.

6. Referências

Alvarinho, R.; Azpiroz J. J.; Meizoso, M. **El Proyecto del Buque Mercante**. FEIN, Madrid 1997.

Americam Bureau of Shipping. Commom Structural Rules for Double Hull Oil Tankers. 2007.

Amorozowicz, M.; Brown, A.; Golay, M. A Probabilistic Analysis of tanker **Grounding**. 7 th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, May, 1997.

Andrews, D. J. A compressive Methodology for the Design of Ships (and other Complex Systems). The Royal Society. 1998.

Baker, J. E. Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm. Proceeding of the Second International Conference on Genetic Algorithms, pp. 14-21, Hillsdale, NJ, 1987.

Barbosa, A.; Lage, A. **Algoritmos Genéticos Paralelos**. Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal da Bahia, 2007.

Barentine, John. M. A Process-Based Cost Estimating Tool for Ship Structural Designs. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 1996.

Bazarar, M.; Sherali, D.; Shetty, C. **Nonlinear Programming: Theory and Algorithms**. John Wiley & Sons, Inc, Second edition, (2000)

Beasley, D.; Bull, D.; Martin, R. An Overview of Genetic Algorithms: Part 2, Research Topics. University Computing, 1993, 170-181.

Benford Harry. **Engineering Economics in Tanker Design**. University of Michigan, November 1956

_____. **Fundamentals of Ship Design Economics**. University of Michigan, January 1965.

_____. **Principles of Engineering Economy in ship Design**. Transactions SNAME, Vol 70, 1962.

Brito Oscar. **Processos de Busca não Linear para o Projeto da Estrutura do Navio.** Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, EPUSP, Setembro 1996.

Brown, A.; Mierzwicki, T. **Risk Metric for Multi-Objective Design of Naval Ships**. Naval Engineers Journal, Vol 116, N° 2, pp 55-71.

Brown, Alan. J. Optimum Risk Tanker (ORT): A systematic Approach to a TAPS Tanker Design. Ship Structure Committee (SCC) Symposium 2000, Arlington V. A, July, 2000.

Brown, A. J; Salcedo, J. **Multi-Objective Optimization in Naval Ship Design**. Naval Engineers Journal, Vol 115, No 4, pp 49-61, 2003.

Buxton I. L.; The Design of Tanker Hull Structure by Computer with Particular Reference to One Midship Cargo Tanks. Transactions RINA, 1966.

Camponogara, E.; Sarosh, N. T. A Genetic Algorithm for Constrained and Multiobjective Optimization. Proceeding of the 3 NWGA, Helsinki, Finlad, 20-22 August 1997.

Carreyette J. **Preliminary Ship Cost Estimation**. Trans. RINA, Vol 120, pg 235 – 258, 1978.

Cardoso, Beatriz. **Operação alivio: A frota DP em ação**. Revista Tn Petróleo, edição # 45. Disponível em:

http://www.tnpetroleo.com.br/TN_45_especial.pdf>. Acesso em 04 Outubro, 2007.

Castro, R. E. Otimização de Estruturas com Multi-Objetivos Via Algoritmos Genéticos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, UFRJ, Agosto 2001.

Cavalcanti. P, Marco. A. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicaciones**. Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, Departamento de Eng. Elétrica, Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.

Centro de Gestão em Engenharia Naval (CEGEN). **Banco de dados da Lloyd Register of Shipping do ano 2006**. EPUSP, São Paulo, Brasil.

Cheng, Franklin.; Li, Dan. **Multiobjective Optimization Design with Pareto Genetic Algorithm**. Journal of Structural Engineering, September 1997.

Coello, Carlos. A. **An Updated Survey of GA-Based Multiobjective Optimization Techniques**. ACM Computing Surveys, Vol 32, No 2, June 2000.

Deb, Kalyanmoy. **Non-Linear Goal Programming Using Multi-Objective Genetic Algorithms.** Technical Report N° CI-60/98. October 1998.

Evans, J. H. **Basic Design Concepts.** Naval Engineers Journal, Vol. 71, Nov 1959.

Fonseca, Carlos.; Fleming, Peter, **Genetic Algorithms for Multiobjetive Optimization: Formulation, Discussion and Generalization**. Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, California, 1993

Gammon, Mark. **Ship Hull Form Optimization by Evolutionary Algorithm**. Doctoral Thesis at Yildiz Technical University, Istanbul, 2004.

Gen, M.; Cheng, R. **Genetic Algorithms and Engineering Design**. John Wiley and Sons, INC, NY 1997.

Gerber Engineering Corp. **Oil Outflow Analysis for a Series of Double Hull Tankers**. Report # 9749-1 for USCG, March 31, 1998.

Goldberg, D. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learnig**. Addision-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.

Gray, Mark. James. An Approach for Developing a Preliminary Cost Estimating Methodology for USCG vessels. Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering, June 1987.

Hellespont Group &Co. Disponível em: http://www.hellespont.com/index.php?seite=ships&id=7 Acesso em 04 junho, 2008.

Holtrop, J.; Mennen, G.G.J. **An Approximate Power Prediction Method**. International Shipbuilding Progress, Vol 29. 1982.

Holtrop, J. A Statistical Analysis of Resistance and Propulsion Data. International Shipbuilding Progress. 1984

Horn, J.; Nafpliotis, N.; Goldberg, D. **Multiobjective Optimization Using the Niched Pareto Genetic Algorithm**. Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Volume 1, 1994.

International Maritime Organization. International Convention on Load Lines. **1966**. First published in 1981, London.

MARPOL 73/78: Consolidated Edition. London, 1997.

____. **Protection of Fuel Tanks**. Report of the Working Group, Sub-Committee on Ship Design and Equipment, 48 th session, Agenda item 7, February 2005.

International Association of Independent Tanker Owners. **Evaluation of Accidental oil Spills from bunker Tanks**. IMO, Sub-Committee on Ship Design and Equipment, 46 th session, Agenda item 20, December, 2002.

Johnson, Roger.; Rumble, Henry. Weight, Cost and Design Characteristics of Tankers and Dry-Cargo Ships. Marine Technology, April 1965.

Kraine, G.; Ingvason, S. **Producibility in Ship Design**. National Shipbuilding Research Program 1989 Ship Production Symposium, SNAME, Virginia, September 13-15,1989.

Lamb, Thomas. A Ship Design Procedure. Marine Technology, Vol 6, No. 4, October, 1969.

_____. **Engineering for Ship Production**. SNAME, Ship Production Committee, Education and Training Panel, January 1986.

Lewis, Edward. **Principles of Naval Architecture**. SNAME 1988

Mandel, P.; Leopold, R. **Optimization Methods Applied to Ship Design**. Transactions, SNAME, Vol. 74, 1966.

Mello, Avidio. Comparação dos Custos de Aquisição e Operação entre Navios Petroleiros dos Tipos Casco Duplos e Convés Intermediário no Brasil. Dissertação de Mestrado, PENO /COPPE, UFRJ, Setembro 1993.

Mezura, Efren.; Coello, Carlos. **Multiobjective-Based Concepts to Handle Constrainst in Evolutionary Algorithms**. Evolutionary Computation Group, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Computación, México.

Michalewicz, Zbigniew. A survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Methods. Proc. Fourth Annual Conference on Evolutionary Programming, MIT Press, Cambridge, 1995.

Michalewicz, Z.; Dasgupta, D. Evolutionary algorithms for Constrained Engineering Problems.

Miranda,I.; Martins, M. **Projeto Hidrodinâmico de um Navio tipo Ro-Ro**. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, EPUSP.2005.

Miroyannis, Aristides. **Estimation Ship Constructions Costs**. Master's thesis, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, June 2006.

Mish, W.; Adamos, E.; Staggers, S.; Kaczmarek, R.; Van Voorem, C. J. **Optimum Risk Tanker Design Report**. Ocean Engineering Design Project, Virginia Tech, 2000.

Moe, J.; Lund, S. Cost and Weight Minimization of Structures with Special Emphvasis on Longitudinal Strength Members of Tankers. Transactions RINA, vol 110, 1968.

Muniz de Oliveira, Alexandre. **Algoritmos Evolutivos para Problemas de Otimização Numérica com Variáveis Reais**. Monografia apresentada para o Exame de Qualificação do Curso de Computação Aplicada, CAP, INPE, São José dos Campos, SP, 2001.

Murphy, R.D.; Sabat, D. J.; Taylor, R. J. Least Cost Ship Characteristic by Computer Techniques. Marine Technology, Vol. 2, N 2, April 1965.

National Steel & Shipbuilding Co. Whole Ship Design Rules & Guidelines. Maritech ASE Project 99-21. July 2000.

Nathan, Andrew. G. Multi-Objective Design Optimization Considering Uncertainty in a Multi-Disciplinary Ship Synthesis Model. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, August 7, 2006.

Nishimoto, Kazuo. **Anotações da Aula Arquitetura de Sistemas Oceânicos**. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, 2006.

Nowacki, H.; Swift, P. M. **Tanker Preliminar Design: An Optimization Problem with Constraints.** Transactions SNAME, Volume 78, 1970.

Osyczka, A.; Krenich, S. K. **Optimum Design of Tobot Grippers Using Genetic Algorithms**. Department of Mechanical Engineering, Cracow University of Technology, Poland, 1999.

Osyczka, Andrzej.; Krenick, Stanislaw. **New Constraint Tournament Selection Method for Multicriteria Optimization Using Genetic Algorithm**. Department Of Mechanical Engineering, Cracow University of Technology, 2000.

Parson, Michael. G. **Parametric Design**. Ship Design and Construction, Chapter 11, edited by Lamb T, 2003.

Rao, Singiresu. S. **Engineering Optimization – Theory and Practice**. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc, 1996;

Reed, Michael. R. **Ship Synthesis Model for Naval Surface Ships.** Master's thesis, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, May 1976.

Read, J. et al **Millenium Class Tanker Structural Design - From Owner Experience to Shipyard Launching Ways**. ARCO Marine Inc, Long Beach, California, 2000.

Reynolds, B. J.; Azar, S.; Narayanan, S. Comparison of Two Multiobjective Optimization Techniques With and Within Genetic Algorithms. Proceedings of the ASME design Engineering Technical Conferences, September 1999, Las Vegas, Nevada.

Ross, Jonathan. M. A Practical Approach for Ship Construction Cost Estimation. Proteus Engineering, Anteon Corporation, USA.

Sawyer, Myron. A Study of the Economic Life of a Ship. Master thesis, MIT, Department of Ocean Engineering, September, 1960.

Schneekluth, H.; Bertram, V. **Ship Design for Efficiency and Economy**. Butterworth Heinemann. Second Edition, 1998.

Shahak, Shmuel. **Naval Ship Concept Design: an Evolutionary Approach**. Master thesis, MIT, Department of Ocean Engineering, January 16, 1998.

Sub-Committee on Ship Design and Equipment. **Japan Proposal of Revisions to the Draft New Marpol Regulation on the Protection of Fuel Tanks**. DE 48/7/1, IMO, November 2004.

Ducto office of Final	Tables	\neg	40/M/D 0	11.40		2005
Protection of Fuel	ranks.	DΕ	48/VVP.Z,	IIVIO,	reb	∠ 005.

Thanh, Binh. A Multiobjective Evolutionary Algorithm: The Study Cases. Institute for Automation and Communication, Barleben, Germany.

Thomas, Mark. A Pareto Frontier for Full Stern Submarines Via Genetic Algorithm. PhD Thesis, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, June 1998

Valadares L, Nunes F. Otimização Linear e Não Linear: Conceitos, Métodos e Algoritmos. Edição da Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa,

Watson, David.; Gilfillan A. W. Some Aspect of Ship Designs Methods. RINA, 1976.

Watson, David. G. M. **Practical Ship Design**. Elsevier Ocean Engineering Book series, Vol 1, Oxford 1998.

Whitley, Darrel. A Genetic Algorithm Tutorial. Computer Science Department, Colorado State University, 1994.

Zitzler, Eckart. Evolutionary algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications. Doctoral Dissertation. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. November 1999.

APÊNDICE A - Modelos de Peso do Casco e Casaria

Neste apêndice são descritos detalhadamente os cinco modelos de peso do aço empregado nesta pesquisa.

Modelo de Watson e Gilfillan

A primeira variável a ser calculada é $E_{\scriptscriptstyle T}$, chamada de numeral do casco, que corresponde à soma das áreas do fundo e costado até o calado, costado da área morta e convés e as parcelas da superestrutura e casaria:

$$\begin{split} E_T &= E_{CASCO} + \ E_{SUPERESTRUTURA} + \ E_{CASARIA}, \quad \left[m^2\right] \end{split} \tag{A.1} \\ \text{onde,} \\ E_{CASCO} &= LWL(B+T) + 0.85LWL(D-T), \quad \left[m^2\right] \\ E_{SUPERESTRUTURA} &= 0.85 \underset{i}{\sum} I_i \times h_i, \quad \left[m^2\right] \\ E_{CASARIA} &= 0.75 \underset{i}{\sum} I_j \times h_j, \quad \left[m^2\right] \end{split}$$

Como foi considerado que os navios que estão sendo projetados possuem apenas casaria de convés, a contribuição correspondente à superestrutura é igual a zero. O coeficiente 0.85 na segunda parcela do peso do casco reflete a menor rigidez estrutural da obra morta, em função da ausência de pressão hidrostática atuante nesta região. Os termos correspondentes a superestrutura e casaria representa a contribuição das áreas dos costados que as constituem, isto é, $l_{i \ ou \ j}$ e $h_{i \ ou \ j}$ representam os comprimentos e alturas dos diferentes elementos, respectivamente, que formam a superestrutura e casaria. Observase que existem coeficientes de 0.85 e 0.75 nas expressões da superestrutura e casaria, que indica o maior peso da superestrutura pelo fato que suas chapas serem de maior espessura quando comparadas as da casaria, devido ao maior aporte estrutural. A seguinte regressão é usada para calcular o peso da estrutura de aço (WS), sendo válida para um grande grupo de navios

(Petroleiros, Cargueiros, Containeros, Quimiqueiros, Refrigerados, Rebocadores, Ro-Ro, Passageiros):

WS =
$$K \times E_T^{1.36} \times \left[1 + 0.05 \left(C_B^{0.8D} - 0.7 \right) \right], \quad [Ton]$$
 (A.2)

onde:

K : coeficiente dependente do tipo de navio

 $C_{\scriptscriptstyle R}^{\scriptscriptstyle 0.8D}$: coeficiente de bloco a 0.8D

A expressão entre parênteses planos corresponde a uma correção por variações no $C_B^{0.8D}$ do valor padrão de 0.7 escolhido pelos autores e empregado na análise de regressão. O coeficiente adimensional K para navios petroleiros tem um valor médio de 0.032 com um desvio de \pm 0.003 para uma faixa do valor E_T de 1500 até 40000 m². A estimativa é feita para aço 100% suave (Mid Steel).

Modelo de Mish et al.

A **Fig. A** apresenta a modelagem do navio como uma viga-caixão, indicando as diferentes chapas constitutivas que a compõem.

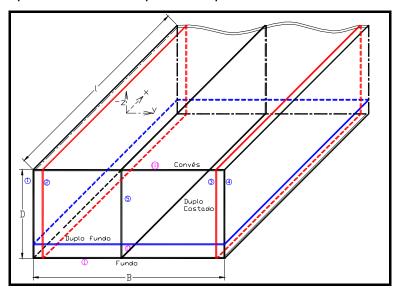


Fig. A: Navio modelado como uma viga-caixão.

Usando a teoria da flexão pura de vigas se calcula a espessura necessária para a viga-caixão. Para tanto é necessário estimar o momento flexor máximo

atuando na viga e selecionar um valor limite para o esforço de flexão da vigacaixão. Sabe-se que o momento flexor de uma viga simplesmente apoiada ou engastada varia de forma quadrática com o comprimento dela, assim também, que o momento flexor total é igual a soma em uma condição de onda mais a condição em águas tranqüilas. As sociedades classificadoras de navios propõem formulações que são do tipo $M \cong B \times LWL^2 \times C_B$, para calcular o momento flexor em ondas, onde para obter a igualdade são incluídas constantes. Assim a seguinte expressão é proposta por Mish et al. para calcular o momento flexor agindo na viga-caixão:.

$$M_{FLETOR} = 0.009 \times B \times LWL^{2.5}, [Ton-m]$$
 (A.3)

Depois de conhecer o momento flexor deve-se calcular a inércia da seção da viga-caixão e a posição do eixo neutro. Na figura seguinte, mostra-se o equivalente da seção mestra típica de um navio petroleiro com duplo casco sendo modelada como uma viga caixão.

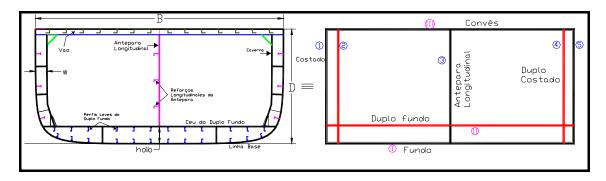


Fig. B: Seção do navio sendo representada como uma viga de seção constante.

Para calcular a posição vertical da linha neutra (y_{NA}) são calculados momentos estáticos de área, de todos os elementos de chapa da seção, com respeito à linha de base como segue:

$$y_{NA} = \frac{\sum_{i}^{N} A_{i} \times d_{i}}{\sum_{i}^{N} A_{i}} = \frac{(D \times tt) \times \frac{D}{2} \times 5 + (B \times tt) \times D + (B \times tt) \times h_{DB}}{5(D \times tt) + 3(B \times tt)}$$

Onde

A_i: área de cada elemento de chapa que forma a seção da viga-caixao, [m²];

d_i: distância desde a linha de base até o centróide do elemento de chapa considerado, [m];

y_{NA}: posição vertical da linha neutra com respeito do fundo do navio, [m]; tt: espessura das chapas que conformam a viga-caixão, [m].

Agrupando termos semelhantes e simplificando a espessura que é comum no numerador e denominador, chega-se a:

$$y_{NA} = \frac{(D+h_{db}) \times B + 2.5D^2}{5D + 3B}, [m]$$
 (A.4)

Para calcular a inércia da seção é determinado o momento de inércia de cada elemento de chapa (fundo, costado, duplo fundo, convés e antepara longitudinal) com respeito a seu centróide e o segundo momento estático de área com respeito à linha de base. Utilizando o teorema dos eixos paralelos tem-se:

$$I\left[m^{4}\right] = \left[\frac{1}{12}D^{3}\times tt + D\times tt\times \left(\frac{D}{2}\right)^{2}\right]\times 4 + \left[\frac{1}{12}t^{3}\times B + B\times tt\times \left(\frac{tt}{2}\right)^{2}\right] + \left[\left[\frac{1}{12}t^{3}\times B + B\times tt\times \left(h_{db}\right)^{2}\right] + \frac{1}{12}t^{3}\times B + B\times tt\times \left(D + \left(\frac{tt}{2}\right)\right)^{2}\right]$$
(A.5)

Desprezando termos da equação (A.5) que estejam multiplicados pela espessura elevada a um expoente maior que um (1), resulta em um valor de inércia por unidade de espessura:

$$\frac{1}{tt} = \frac{1}{3}D^3 + D^3 + B \times h_{db}^2 + B \times D^2$$
 (A.6)

Agrupando termos semelhantes, a expressão final da inércia com respeito à linha do fundo do navio é:

$$I = \left(\frac{4}{3}D^3 + B \times \left(h_{db}^2 + D^2\right)\right) \times tt, \quad \left[m^4\right]$$
 (A.7)

Usando o teorema dos eixos paralelos se traslada a inércia com respeito ao eixo neutro do navio e, manipulando os termos semelhantes, a expressão final da inércia fica da seguinte maneira:

$$I = \left[B \times \left(D^2 + h_{db}^2\right) + \left(\frac{5}{3}\right) \times D^3\right] \times tt - y_{NA}^2 \times \left(5D + 3B\right) \times tt, \quad \left[m^4\right]$$
 (A.8)

Utiliza-se a teoria da flexão pura de vigas para calcular a espessura das chapas da viga-caixão:

$$\sigma_{\text{FLEXÃO}} = \frac{M_{\text{FLETOR}} \times c}{I}, \quad \left[\frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}\right]$$
 (A.9)

Sendo

c: distância desde o eixo neutro até a chapa do convés, [m];

I: inércia da seção com respeito ao eixo neutro, [m⁴];

M_{FLETOR}: momento flexor, [Ton-m].

Escolhendo um valor máximo permissível para o esforço de flexão, substituindo os valores das equações (A.3) e (A.8) na equação (A.9) e isolando o valor da espessura resulta em:

tt [m]=
$$\frac{\left[D - \left(\frac{(D + h_{db}) \times B + 2.5D^{2}}{5D + 3B}\right)\right] \times 0.009 \times B \times LWL^{2.5}}{\sigma_{FLEXÃO} \times \left\{\left[B \times \left(D^{2} + h_{db}^{2}\right) + \left(\frac{5}{3}\right) \times D^{3}\right] - \frac{\left((D + h_{db}) \times B + 2.5D^{2}\right)^{2}}{5D + 3B}\right\}}$$
(A.10)

Em seguida calcula-se o volume das chapas de costado, duplo fundo, costado, convés, antepara longitudinal, anteparas transversais. A expressão a seguir obtém o volume em questão:

$$\nabla_{AQO} = LWL \times (5D + 3B) \times tt + (N_{CARGO} + 3) \times B \times D \times tt, \quad [m^3]$$
 (A.11)

Nota-se que a primeira parcela da equação (A.11) representa o volume das chapas de fundo, duplo fundo, duplo costado, convés e antepara longitudinal. Já a segunda parcela representa o volume das chapas das anteparas da área de carga incluindo as chapas da antepara de colisão da proa e as anteparas que fecham a viga caixão na proa e popa.

Por último, calcula-se o peso do aço do casco multiplicando o volume pelo específico do aço.

$$W_{CASCO} = \gamma_{AÇO} \left[\frac{Ton}{m^3} \right] \times \nabla_{AÇO} \left[m^3 \right]$$
 (A.12)

A estimativa do peso da casaria está baseada nas áreas necessárias para moradia, ponte de navegação, lavanderia, cozinha, elevadores, víveres, lazer, etc. Para o cálculo do peso da casaria, explorou-se as equações propostas por Nowacki e Swift (1970). Eles propõem os seguintes valores para estimar as áreas requeridas da casaria.

- 175 [pés²] para área de navegação.
- 220 x N_{TRIPULAÇÃO} [pés²] para tripulação, o que inclui área de lazer e cabines.
- 0.04 x LWL x B [pés²] para espaços públicos.

Portanto, o valor da área requerida na casaria é:

$$A_{REQUERIDA} = \frac{\left(175 + 220 \times N_{TRIPULAÇÃO} + 0.04 \times LWL \times B\right)}{10.7584}, \quad [m^2] \quad (A.13)$$

Com o valor da área total requerida se calcula a área de cada deck dividindo o valor obtido em (A.13) pelo número de decks na casaria calculado com a equação (2.8). Considerando a largura da casaria igual a 0.95xB, o comprimento da casaria é obtido por:

$$LDH_{REQUERIDO} = \frac{A_{REQUERIDA}}{N_{DK} \times 0.95B}, \quad [m]$$
 (A.14)

onde

N_{DK}: número de decks na casaria.

Para estimar o peso da casaria é necessário assumir um valor para o peso específico para a estrutura. Mish et al. (2000) utilizam em seu trabalho um valor de 0.035 Ton/m³, valor que será empregado nesta pesquisa. Logo, o valor do peso da casaria é obtido da seguinte maneira:

$$W_{\text{DH}} = 0.035 \times \left(\text{LDH}_{\text{REQUERIDO}} \times \ 0.95 \text{B} \ \times N_{\text{DK}} \times H_{\text{DK}}\right), \quad \left[\text{Ton}\right] \quad \text{(A.15)}$$

Por conseguinte, o peso da estrutura de aço para o segundo modelo fica definido pela soma dos valores obtidos usando as equações (A.12) e (A.15).

Modelo de Harvald e Juncher

Segundo Harvald e Juncher apud Alvarinho et al. (1997) o peso do casco, superestrutura e casarias pode ser estimado com a seguinte formulação de um modo fácil:

$$WS = C_s \times (LPP \times B \times D + Sup), [Ton]$$
 (A.16)

onde,

C_s: coeficiente calculado com a equação (A.17)

Sup: volume em m³ da superestrutura e casaria.

O coeficiente C_s calcula - se como segue:

$$C_s = C_{s0} + 0.064 \times e^{(-0.5 \times u - 0.1 \times u^{2.45})}$$
 (A.17)

onde,

$$u = \log_{10} \left(\frac{\Delta}{100} \right)$$

Δ: deslocamento do navio, [Ton]

C_{so}: constante dependente do tipo de navio

Na tabela abaixo se reproduz os diferentes valores da constante C_{so} segundo o tipo de navio:

 $\label{eq:control_solution} \textbf{Tab. A- Coeficiente} \ C_{SO} \ usado \ na \ estimativa \ do \ peso \ do \ casco \ no \ modelo \ proposto \ por \ Harvald \ e$ Juncher.

Tipo	C _{S0}
Graneleiro	0.070
Petroleiro VLCC	0.0645
Petroleiro	0.0752
Petroleiro de Produtos	0.0664
Carga Geral de um convés	0.700
Rebocadores	0.0892
Navios Fornecedores	0.0974

Modelo de Alvarinho et al.

Segundo Alvarinho (1997) o peso total de aço incluindo superestrutura e casarias, com uma quantidade padrão de aço de alta resistência e coeficiente de bloco "nas faixas padrões para este tipo de navio ($0.7 \le C_{\rm B} \le 0.9$)", pode ser estimado pela seguinte fórmula:

$$WS = 0.0658 \times LPP^{1.7} \times B^{0.102} \times D^{0.886}, [Ton]$$
 (A.18)

onde

LPP: comprimento entre perpendiculares, [m]

B: boca, [m]

D: pontal, [m]

As variações máximas dos pesos da estrutura de aço dos navios analisados por Alvarinho, ao aplicar a fórmula anterior foram na faixa de -4% até +18%.

Modelo de Sato

Segundo Sato apud Nowacki e Swift (1970) a estimativa do peso do aço para navios com peso morto entre 150000 e 300000 pode ser feita com a seguinte equação:

WS[Ton] =
$$10^{-5} \times \left(\frac{C_B}{0.8}\right)^{\frac{1}{3}} \times \left[5.11 \times \left(3 \times \frac{B \times LWL^3}{D} + 2.56 \times LWL^2 (B+D)^2\right)\right]$$
 (A.19)

APÊNDICE B - Cálculo do custo de construção

Modelo de Carreyette

Carreyette (1978) propõe as seguintes expressões para estimar os custos da mão-de-obra e dos materiais para cada um dos itens do peso leve do navio dados em libras esterlinas (£) e válidas para o ano de 1977:

Tab. B: Expressões empregadas para estimar os custos de construção propostas por Carreyete em 1978.

Descrição	Custo Construção (£)					
Booongao	Mão-de-obra	Materiais				
Aço	$A\frac{WS^{\frac{2}{3}} \times LWL^{\frac{1}{3}}}{C_B}$	B×WS				
Outfit	$C \times W_{OUTFIT}^{\frac{2}{3}}$	D×W _{OUTFIT} ^{0.95}				
Sistema Propulsor	$F \times (PI)^{0.82}$	$G \times (PI)^{0.82}$				

Os valores das constantes A, B, C, D, F e G são reproduzidos na **Tab.** C. Eles levam em conta a produtividade, taxas salariais e gastos indiretos do estaleiro. As variáveis que melhor representam os custos de aço e Outfit são o peso de cada item. No caso do sistema propulsor, melhores coeficientes de correlação são obtidos usando a potência de serviço (PI [HP]) como variável independente quando comparado aos resultados obtidos com a consideração do peso da máquina como variável independente.

Tab. C: Coeficientes empregados na estimativa do custo proposto por Carreyette.

	valor d	le A					valor de E	3			
Razão d	do salário médio	da labor d	direta (£/hr)		Р	reço me	édio do aço	naval (£/ton)			
Х	C)verhead:	S		х	Overheads					
^	75%	100%	125%		^	8%	10%	13%			
1,6	700	800	900		150	178	182	186			
2	875	1000	1125		200	237	242	248			
2,4	1050	1200	1350		250	296	303	310			
	valor d	le C					valor de [)			
Razão d	do salário médio	da labor d	direta (£/hr)			Mate	eriais do Ou	tfit (£/hr)			
Х		verhead			data	D					
^	75%	100%	125%		uata	-					
1,6	8350	9550	10750		jun/75	1500					
2	10425	11925	13425		jun/76		17	25			
2,4	12500	14300	16100		jun/77		20	11			
	valor o	le F					valor de C	3			
Razão d	do salário médio	da labor d	direta (£/hr)			Materia	ais da Propu	ılsão (£/hr)			
Х	C)verhead:	S		data		(3			
^	75%	100%	125%		uata			,			
1,6	323	369	415		jun/75		73	35			
2	404	461	519		jun/76		84	15			
2,4	485	553	622		jun/77	980					
				- '	=						

Modelo de Watson

O custo em dólares por tonelada da estrutura em aço incluindo materiais, mãode-obra e custos indiretos do estaleiro, pode ser calculado usando a seguinte figura:

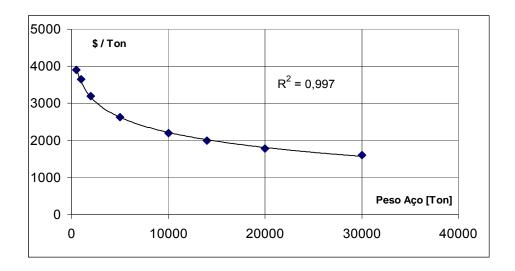


Fig. C: Custo aproximado da estrutura de aço por tonelada (WATSON, 1998).

A curva anterior é válida para navio de formas cheias, por exemplo petroleiros, sendo a equação de regressão obtida usando os dados apresentados por Watson - que melhor se ajusta a curva dada por:

$$Custo_{Aço} = (-588.03 \times Ln(WS) + 7632.4) \times WS$$
 (B.1)

O item seguinte é o custo do Outfit. Watson concluiu que os custos por tonelada do Outfit eram muitos próximos para navios de diferentes tipos e tamanhos. Depois de vários experimentos para normalizar os dados – excluindo itens que tivessem uma grande influência no custo médio por tonelada, seja porque tem um custo muito alto ou muito baixo por unidade de peso – a seguinte figura foi proposta para estimar o custo médio do Outfit incluindo materiais, mão-de-obra e custos indiretos do estaleiro:

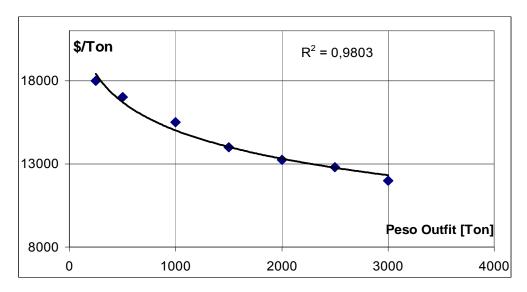


Fig. D: Custos aproximados do Outfit por tonelada incluindo materiais, mão-de-obra e custos indiretos do estaleiro (WATSON, 1998).

A seguinte regressão é obtida da figura anterior para estimar o custo do Outfit sendo o resultado em dólares dos EUA:

$$Custo_{Outfit} = (-2451.7 \times Ln(W_{OUTFIT}) + 31948) \times W_{OUTFIT}$$
 (B.2)

Por último, o custo em US \$ do sistema propulsor em função do seu peso em tonelada é mostrado na seguinte figura.

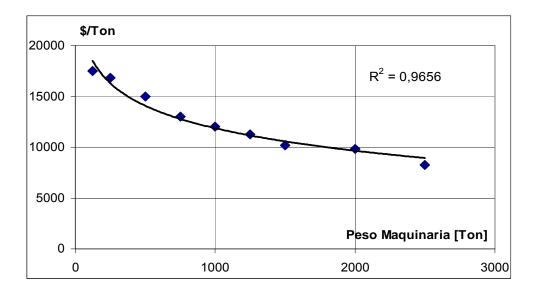


Fig. E: Custos aproximados do sistema propulsor por unidade de peso, incluindo materiais, mão-de-obra e custos indiretos do estaleiro (WATSON, 1998).

A figura mostra que a tendência da redução de custos específicos quando se incrementa o peso. O alto custo por tonelada ao início da linha pode ser associado a motores leves de altas velocidades de rotação, na região intermediária com motores de média velocidade e por último os de menores custos por tonelada, ao "final" da curva, com motores pesados e de baixa velocidade de rotação. A regressão obtida é:

$$Custo_{MAQUINARIA} = (-3190 \times Ln(W_{MAQ}) + 33903) \times W_{MAQ}$$
(B.3)

Na expressão anterior os pesos devem ser considerados sempre em toneladas.

Modelo PODAC

No nível de projeto preliminar, as seguintes relações são propostas para estimar os custos (US\$) da mão-de-obra e dos materiais para cada um dos sistemas que constituem o navio (MIROYANNIS, (2006).

Tab. D.- Expressões empíricas para estimar o custo de construção. (MIROYANNIS, 2006)

Descrição	Mão de Obra	Materiais				
Estrutura	$CF \times 177 \times (WS)^{0.862}$	800×WS				
Sistema Propulsão	$CF \times 365 \times (W_M)^{0.704}$	$15000 + 20000 \times (W_{M})$				
Elétrico	$682 \times \left(W_{ELETRICO}\right)^{1.025}$	25000×(W _{ELETRICO})				
Comando e Controle	$1605 \times (W_{CONTROLE})^{0.795}$	$40000 \times (W_{CONTROLE})$				
Maq. Auxiliar	$CF \times 34.8 \times (W_{AUXILIAR})^{1.24}$	10000 + 10000 × (W _{AUXILIAR})				
Outfit	310×(W _{OUTFIT}) ^{0.949}	5000 + 10000 × (W _{OUTFIT})				

Na tabela anterior W_{ELETRICO} e W_{CONTROLE} e W_{AUXILIAR} representam os pesos dos itens que compõem o sistema elétrico, sistema de comando e controle e o sistema auxiliar respectivamente. Todos os pesos da **Tab. D** devem estar em Toneladas.

O valor de CF empregado nas formulações mostradas na tabela anterior é definido como fator de complexidade e é igual a:

$$CF = STF \times 32.47 \times \Delta^{-0.3792}$$
 (B.4)

onde,

STF: Fator que depende do tipo do navio.

Δ: Deslocamento do navio na condição carregada, [Ton]

Os valores de STF tomados de Miroyannis (2006) para navios petroleiros têm os seguintes valores:

Tab. E. - Fatores dos tipos de navios usados nas formulações empíricas empregadas no PODAC.

Tipo de Navio	Fator
Navio Tanque com casco simples	1.13
Navio Tanque de produtos Químicos	1.25
Navios Tanques com duplo casco	0.9

APÊNDICE C - Cálculo do vazamento de óleo devido à colisão e encalhe

Neste apêndice são descritos os procedimentos propostos pela INTERTANKO (2002) para o cálculo do vazamento médio de óleo para as situações de encalhe e colisão.

Estimativa de vazamento dada a ocorrência de colisão

A estimativa de vazamento médio em função de um evento de colisão, O_{MS}, é obtida como segue:

$$O_{MS} = \sum_{i=1}^{N} P_{S(i)} \times O_{S(i)} \quad [m^3]$$
 (C.1)

Onde,

i: representa cada tanque do navio;

N: número total de tanques;

O_{S (i)}: vazamento em m³ por dano no costado, assumido igual ao volume do tanque a 98% da sua capacidade.

P_{S (i)}: Probabilidade de perfuração do tanque i devido a colisão.

O procedimento propõe que a probabilidade de perfuração de um compartimento devido ao evento de colisão deve ser calcular como segue:

$$P_{S} = P_{SL} \times P_{SV} \times P_{ST} \tag{C.2}$$

onde,

P_{SL}: Probabilidade do dano atingir a zona longitudinal limitada por X_a e X_f;

P_{SV}: Probabilidade de o dano atingir a zona vertical limitada por Z_u e Z_i;

P_{ST}: Probabilidade de o dano se estender transversalmente além do limite definido por *y*.

As variáveis X_a e X_f , Z_u e Z_l e y definem as coordenadas dos limites longitudinal, vertical e transversal, respectivamente, de cada tanque ou espaço de carga considerado na análise (vide figura seguinte).

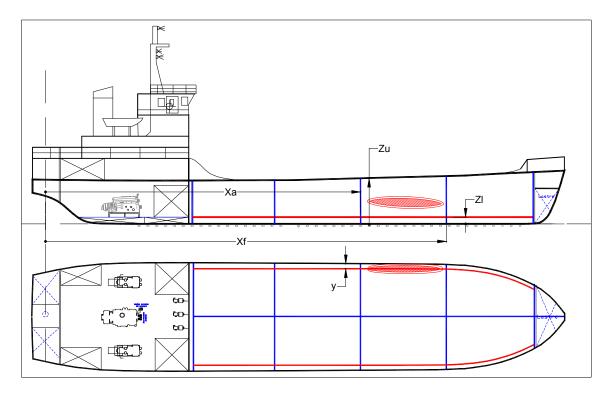


Fig. F: Variáveis utilizadas para localizar espacialmente um tanque no navio.

As variáveis X_a e X_f são definidas como as distâncias longitudinais em relação à perpendicular da popa até os pontos mais a popa e proa do tanque, respectivamente; Z_u e Z_l são as alturas com respeito da linha base do ponto mais alto e baixo do tanque, respectivamente. Finalmente, y é a mínima distância horizontal entre o tanque e o costado do navio.

A probabilidade do dano não atingir a região entre X_a e X_f é obtida a partir da função densidade de probabilidade (P_{Sa}) do dano estar totalmente a ré de X_a e da densidade de probabilidade (P_{Sf}) do dano estar totalmente a vante de X_f . Ambas as funções são apresentadas na forma de tabelas em INTERTANKO (2002).

Na **Fig. G** são apresentadas as funções P_{Sa} e P_{Sf} em função, respectivamente, de X_a/L e X_f/L e a soma. É esperado que P_{Sa} P_{Sf} sejam igual a 100 % para um valor de X_a/L e X_f/L igual a 1 e 0 respectivamente.

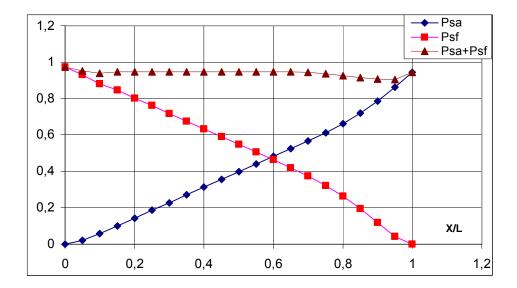


Fig. G: Probabilidade de perfuração no costado estar totalmente a vante de X_f/L (P_{Sf}) e à ré de X_a/L (P_{Sa})

Da forma como definido, a probabilidade do casco não apresentar uma avaria entre as posições X_a e X_f é a soma⁴⁷ de P_{Sa} e P_{Sf} . Portanto, a probabilidade do casco apresentar uma avaria entre as posições X_a e X_f , dada a ocorrência de um evento de colisão, é definida por:

$$P_{SL} = 1 - \left(P_{Sa} + P_{Sf}\right) \tag{C.3}$$

De forma análoga ao caso anterior, no sentido vertical se define P_{SV} como segue:

$$P_{SV} = 1 - (P_{Su} + P_{SI})$$
 (C.4)

Onde.

Oriuc,

P_{Su}: Probabilidade de o dano se apresentar inteiramente acima do tanque;

P_{SI}: Probabilidade de o dano se apresentar inteiramente abaixo do tanque.

Os valores de P_{Su} e P_{Sl} e sua soma também são apresentados em forma tabular em INTERTANKO (2002) e estão reproduzidos em forma gráfica na figura seguinte:

⁴⁷Consideram-se os eventos como independentes e, portanto, a probabilidade dos eventos ocorrerem simultaneamente é nula.

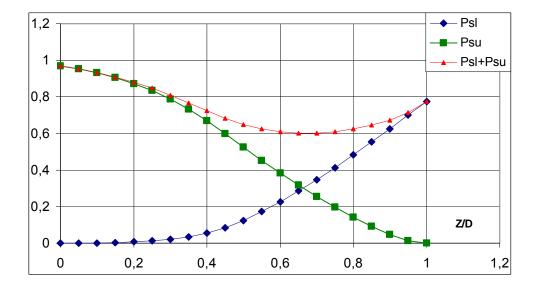


Fig. H : Probabilidade de perfuração no costado estar totalmente a baixo do tanque (Z_L/D) e acima do tanque (Z_U/D) (IMO, 2002)

Assim como na **Fig. G**, nota-se a lógica que seguem os valores da figura anterior, por exemplo, P_{Su} tem um valor mínimo para tanques localizados acima do convés e valores crescentes para os tanques que ficam abaixo do convés principal.

Finalmente, P_{ST} pode ser obtido por:

$$P_{ST} = 1 - P_{Sy} \tag{C.5}$$

onde, P_{Sy} é a probabilidade da avaria não apresentar uma penetração transversal no casco superior à cota y. INTERTANKO (2002) sugere a estimativa de P_{Sy} por:

$$P_{Sy} = \left(24.96 - 199.3 \times \frac{y}{B}\right) \times \frac{y}{B}, \quad \text{para } \frac{y}{B} \le 0.05$$

$$P_{Sy} = 0.749 + \left(5 - 44.4 \times \frac{y}{B}\right) \times \frac{y}{B}, \quad \text{para } \left(\frac{y}{B} > 0.05 \quad \land \quad \frac{y}{B} < 0.1\right)$$

$$P_{Sy} = 0.888 + 0.56 \times \left(\frac{y}{B} - 0.1\right), \quad \text{para } \frac{y}{B} \ge 0.1$$
(C.6)

Interpolando os valores de P_{Sa} e P_{Sf} , P_{Su} e P_{SI} e calculando P_{Sy} se obtêm os valores de P_{SL} , P_{SV} e P_{ST} respectivamente. Com estes três últimos valores de

probabilidade se obtém P_S por meio da equação (C.2). Finalmente, utiliza-se a equação (C.1) para calcular o vazamento médio (O_{MS}) devido a um evento de colisão.

Estimativa de vazamento dada a ocorrência de encalhe

A INTERTANKO (2002) sugere que para a estimativa de vazamento médio em função de um evento de encalhe, O_{MB} , devam ser consideradas duas condições de maré (2.5m e 0.0m) combinando-as da seguinte forma:

$$O_{MB} = 0.7 \times O_{MB(0.0)} + 0.3 \times O_{MB(2.5)}, \quad [m^3]$$
 (C.7)

onde,

 $O_{{\rm MB}(0.0)}$: estimativa de vazamento médio sem variação de maré, $[{\rm m}^3]$;

O_{MB(2.5)}: estimativa de vazamento médio quando a maré abaixa 2.5 m, [m³].

A estimativa para o vazamento médio devido ao encalhe com dano no fundo é calculado para cada condição de maré, como segue:

$$O_{MB(K)} = \sum_{i=1}^{N} P_{B(i)} \times O_{B(i)} \quad [m^3]$$
 (C.8)

Onde

k: representa a condição de maré analisada – 0.0 ou 2.5 m;

i: cada tanque de carga;

N: número de tanques de carga;

P_{B (i)}: probabilidade de perfuração do tanque pelo dano no fundo;

O_{B (i)}: vazamento médio de óleo do tanque i, em m³;

O vazamento médio de óleo $O_{B\ (i)}$ para cada tanque é calculado baseado em princípios hidrostáticos de balanço entre colunas de líquidos. O nível de óleo depois do dano é calculado como segue:

$$h_{F} = \frac{\left(T + t_{C} - Z_{I}\right) \times \gamma_{S} - p_{SIG}}{\gamma_{N}}$$
 (C.9)

onde,

h_F: altura da superfície de óleo acima de Z_I, [m];

t_C: variação da maré. Reduções na maré devem ser expressas como valores negativos, [m];

Z_i: altura do ponto mais baixo do tanque de óleo acima da linha base do navio,[m];

 γ_S : peso específico da água do mar, [N/m³];

 γ_{N} : peso específico nominal do óleo, [N/m³];

T: calado de projeto do navio, [m];

p_{SIG}: pressão do gás inerte no topo do tanque⁴⁸, [N/m²];

INTERTANKO propõe o cálculo da probabilidade de perfuração de um tanque, em função da ocorrência de um evento de encalhe, como segue:

$$P_{B} = P_{BL} \times P_{BT} \times P_{BV} \tag{C.10}$$

onde;

P_{BL}: Probabilidade do dano atingir a zona longitudinal limitada por X_A e X_F;

P_{BT}: Probabilidade do dano atingir a zona transversal limitada por Y_P e Y_S:

P_{BV}: Probabilidade do dano se apresentar inteiramente acima do limite definido por **z**.

As variáveis X_A e X_F já foram definidas no item anterior; Y_P e Y_S são as distâncias horizontais entre os pontos do tanque mais a bombordo e mais a boreste, respectivamente, localizados na linha d'água do calado de projeto analisado até um plano vertical localizado a $\frac{B}{2}$ a boreste da linha central do navio. Finalmente, z é a mínima altura – em qualquer ponto no comprimento do

_

⁴⁸ Segundo a IMO (1997) não deve ser menor que 5 kPa

tanque – desde a chapa do fundo até o ponto mais baixo do tanque em consideração. A Fig. I ilustra a definição destas variáveis.

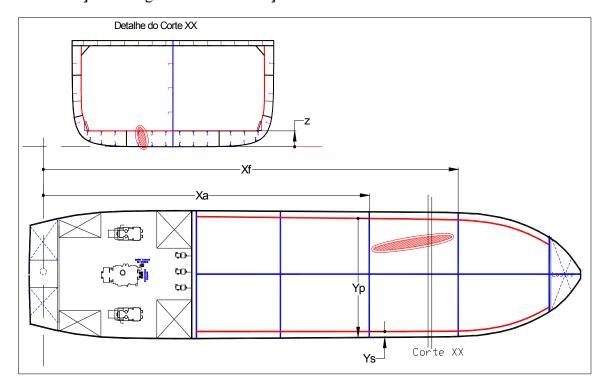
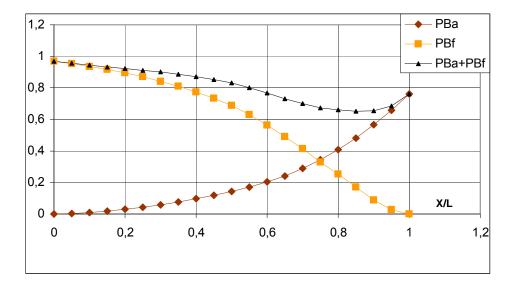


Fig. I : Esquema das variáveis utilizadas para localizar um tanque no navio quando sofreu encalhe.

Na determinação da probabilidade de perfuração de um tanque no fundo, emprega-se a mesma idéia que a usada para formular a equação (C.3) no cálculo de P_{BL} , P_{BT} e P_{BV} . Para definir P_{BL} , utiliza-se o valor da probabilidade (P_{Ba}) do dano estar inteiramente a ré da posição X_a e da probabilidade (P_{Bf}) do dano estar inteiramente a vante da posição X_f . INTERTANKO apresenta estas funções de densidade de probabilidade na forma tabular e a Fig. J na forma gráfica, assim como a soma delas.



 ${f Fig.~J}$: Probabilidade de perfuração no fundo estar totalmente à ré de X_A/L e a vante de X_F/L

Observa-se na figura anterior que P_{Ba} avaliada em $X_a/L=1$ chega a um valor menor que 1, sendo isto ocasionado possivelmente por acidentes que aconteceram a vante da perpendicular da proa.

Assim, da forma como definido;

$$P_{BL} = 1 - \left(P_{Ba} + P_{Bf}\right) \tag{C.11}$$

De forma análoga, utiliza-se o valor da probabilidade (P_{Bp}) do dano estar inteiramente a boreste Y_p e da probabilidade (P_{Bs}) do dano estar inteiramente a bombordo da posição Y_s . IMO (2002) apresenta estas funções de densidade de probabilidade na forma tabular e a Fig. K na forma gráfica.

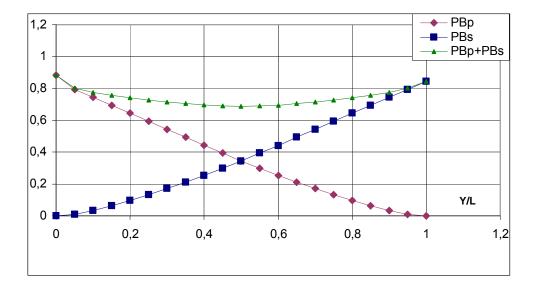


Fig. K : Probabilidade de perfuração estar totalmente a bombordo da linha de centro Yp/B e a boreste da linha de centro Yp/B

Desta forma, P_{BT} é calculada por:

$$P_{BT} = 1 - (P_{BP} + P_{BS})$$
 (C.12)

Finalmente, P_{BV} é calculado segundo a seguinte expressão:

$$P_{BV} = 1 - P_{BZ}$$
 (C.13)

onde,

P_{BZ}: probabilidade que o dano fique inteiramente abaixo do tanque

$$P_{BZ} = \left(14.5 - 67.0 \times \frac{z}{D}\right) \times \frac{z}{D}, \quad \text{para } \frac{z}{D} \le 0.1$$

$$P_{BZ} = 0.78 + 1.10 \times \left(\frac{z}{D} - 0.1\right), \quad \text{para } \frac{z}{D} > 0.1$$

Interpolando os valores de P_{Ba} e P_{Bf} , P_{Bs} e P_{Bl} e calculando P_{Bz} se obtêm os valores de P_{BL} , P_{BT} e P_{BV} respectivamente. Com estes três últimos valores de probabilidade se obtém P_{B} por meio da equação (C.10). Finalmente, utiliza-se a equação (C.8) para calcular o vazamento médio (O_{MB}) devido a um evento de colisão

APÊNDICE D - Cálculo da mínima borda livre

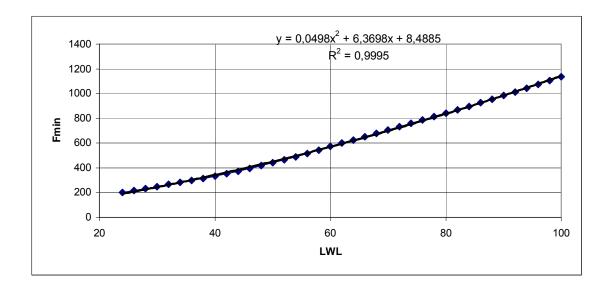
A conferência internacional de linha de carga de 1966 estabelece a mínima borda livre. A seguir apresenta-se de modo sucinto as fórmulas empregadas na determinação da borda livre, remetendo o leitor à referencia IMO (1981) para mais detalhes.

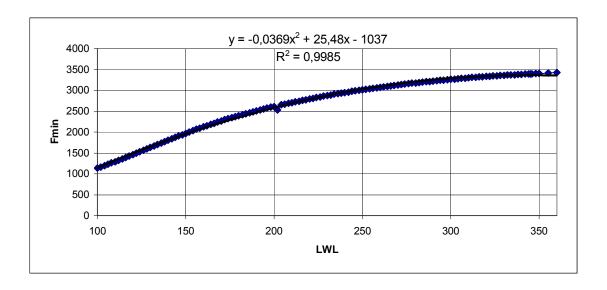
O cálculo está divido em duas partes:

- Borda livre tabular;
- Correções ao valor anterior.

A primeira parte consiste em determinar a mínima borda livre calculada mediante o uso de tabelas, para navios com comprimentos de 24 até 365 metros. Na figura seguinte mostra-se as curvas obtidas com os valores apresentados pela IMO e a correspondente regressão obtida. Para melhorar as aproximações a faixa de valores do comprimento foi dividida em três partes:

- 24 ≤ LWL < 100
- 100≤LWL< 360
- LWL≥360





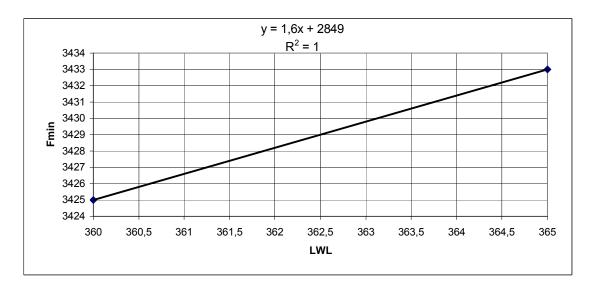


Fig. L: Mínima borda livre tabular (IMO, 1987)

Diferentes correções devem ser feitas ao valor calculado anteriormente:

- Por comprimento da superestrutura;
- Por coeficiente de bloco;
- Por pontal;
- Por curvatura do convés.

Pelo fato de não contar com a configuração completa do navio, só duas correções (por coeficiente de bloco e pontal) foram consideradas neste trabalho. Quando o coeficiente de bloco do navio excede 0.68, a borda livre

tabular deve ser multiplicada pelo fator $\frac{C_{_B}+0.68}{1.36}$. Assim também, quando o pontal excede $\frac{LWL}{15}$ a borda livre será incrementada por:

$$\left(D - \frac{LWL}{15}\right)R \tag{C.1}$$

sendo

$$R[mm] = \begin{cases} \frac{LWL}{0.48} & LWL < 120 \text{ m} \\ 250 & LWL \ge 120 \text{ m} \end{cases}$$

APÊNDICE E – Resultados numéricos do processo de balanceamento

Apresentam-se os valores numéricos do processo de convergência de 15 parâmetros seletos para comprovar a proposta de balanceamento, assim como a história desses parâmetros para navios que não tiveram como ser balanceados

Características dos navios balanceados

1.

DWT =	125000	Ton	C _B =	0,815
Δ inicial	142857,1	Ton	E 1 =	1E-04

	NAVIO BALANCEADO # 1														
# Iter	LWL	В	D/T	D	Wcasco	Wmaq	Woutfit	WFL	EMPUXO	(WFL-EMP)/WFL	LCtk	LStk	LMreq	LM_Disp - LM_Req	PI_REQ
1	213,7	42,3	1,2	22,6	12136,6	562,0	2277,4	141690,0	142857,1	-0,0082375	226,1	7,1	20,2	-65,9867	32254,4
2	213,2	42,2	1,647	30,9	9309,4	540,0	2268,1	138771,7	141690,0	-0,0210294	157,7	5,1	18,1	5,9397	32433,3
3	211,7	41,9	1,592	29,7	9340,6	476,0	2244,7	138691,5	138771,7	-0,0005778	166,7	5,4	20,2	-6,7782	32017,9
4	211,6	41,9	1,654	30,8	9052,3	476,0	2244,1	138385,2	138691,5	-0,0022136	159,5	5,2	20,2	0,6159	32092,2
5	211,5	41,9	1,654	30,8	9029,2	476,0	2241,6	138358,1	138385,2	-0,0001958	159,7	5,2	20,2	0,2105	32056,9
6	211,5	41,9	1,654	30,8	9027,1	476,0	2241,4	138355,7	138358,1	-0,0000173	159,8	5,2	20,2	0,1746	32053,8

2.

DWT =	125000	Ton	C _B =	0,715
∆ inicial=	142857,1	Ton	E 1 =	1E-04

	NAVIO BALANCEADO # 2														
# Iter	LWL	В	D/T	D	Wcasco	Wmaq	Woutfit	WFL	Empuxo	(WFL-EMP) /WFL	LCtk	LStk	LMreq	LM_Disp - LM_Req	PI_REQ
1	278,6	44,9	1,200	18,6	36795,8	593	2664,4	168333,1	142857,1	0,1513425	296,3	9,3	21,7	-79,01	31336,9
2	294,3	47,5	1,594	26,1	35064,7	800	2841,2	166996,9	168333,1	-0,0080011	185,6	6,1	22,0	49,31	34989,4
3	293,5	47,3	1,281	20,9	41684,3	800	2832,6	174004,7	166996,9	0,0402731	244,0	7,7	22,0	-11,50	34670,3
4	297,5	48,0	1,340	22,2	42110,2	800	2876,7	174502,7	174004,7	0,0028544	224,5	7,2	22,0	12,38	35604,7
5	297,8	48,0	1,275	21,1	44047,5	800	2879,7	176559,5	174502,7	0,0116488	238,0	7,5	22,0	-1,19	35638,0
6	299,0	48,2	1,281	21,3	44474,3	800	2892,2	177025,1	176559,5	0,0026304	234,7	7,4	22,0	3,30	35904,4
7	299,2	48,3	1,281	21,3	44609,9	800	2895,0	177171,9	177025,1	0,0008286	234,2	7,4	22,0	4,00	35964,0
8	299,3	48,3	1,281	21,3	44652,7	800	2895,9	177218,2	177171,9	0,0002612	234,1	7,4	22,0	4,22	35982,8
9	299,3	48,3	1,281	21,3	44666,2	800	2896,2	177232,8	177218,2	0,0000824	234,1	7,4	22,0	4,29	35988,7

Características dos navios não balanceados

1.

DWT =	125000	Ton	C _B =	0,74
∆ inicial	142857,1	Ton	E 1 =	1E-04

	NAVIO NÃO BALANCEADO # 1														
4 14	1.14/1	_	Б/Т	_	10/	11/	\\/ 				LCtk	1.041.	1.1.4		DI DEO
# Iter	LWL	B 54.0	D/T	D	Wcasco	Wmaq	Woutfit	WFL	EMPUXO	(WFL-EMP)/WFL		LStk	LMreq	LM_Disp - LM_Req	PI_REQ
1	277,3	51,3	1,20	15,8	50645,9	1160	3041,3	184026,9	142857,1	0,2237161	346,4	11,1	23,0	-133,382	32495
2	301,7	55,9	1,78	25,5	48255,6	990	3353,7	181763,2	184026,9	-0,0124541	167,7	5,7	23,5	73,037	38461
3	300,4	55,6	1,31	18,7	61685,6	1290	3338,6	196283,3	181763,2	0,0739749	253,4	8,2	24,6	-17,439	37862
4	308,2	57,1	1,39	20,4	64048,1	1140	3431,8	198843,9	196283,3	0,0128777	220,1	7,2	26,0	22,872	39766
5	309,6	57,3	1,28	18,9	69755,4	1140	3447,4	204910,1	198843,9	0,0296043	242,8	7,9	26,0	0,780	40036
6	312,7	57,9	1,28	19,1	72201,2	1140	3483,3	207540,7	204910,1	0,0126750	237,2	7,7	26,0	9,406	40799
7	314,0	58,2	1,24	18,5	75317,7	1140	3498,5	210860,3	207540,7	0,0157428	245,1	7,9	26,0	2,618	41107
8	315,7	58,5	1,24	18,6	76700,8	1140	3517,2	212346,3	210860,3	0,0069981	242,1	7,8	26,0	7,240	41520
9	316,4	58,6	1,21	18,2	78955,4	1140	3525,5	214744,9	212346,3	0,0111695	248,6	8,0	26,0	1,248	41688
10	317,6	58,8	1,21	18,3	79979,0	1140	3538,7	215843,9	214744,9	0,0050920	246,5	7,9	26,0	4,565	41984
11	318,1	58,9	1,21	18,3	80448,7	1140	3544,7	216348,1	215843,9	0,0023302	245,5	7,9	26,0	6,067	42120
12	318,4	59,0	1,20	18,1	81513,2	1140	3547,4	217479,4	216348,1	0,0052019	249,0	8,0	26,0	2,700	42174
13	318,9	59,1	1,20	18,2	82002,2	1140	3553,5	218004,2	217479,4	0,0024074	248,0	8,0	26,0	4,247	42313
14	319,2	59,1	1,20	18,2	82229,2	1140	3556,3	218247,8	218004,2	0,0011162	247,5	8,0	26,0	4,961	42377
15	319,3	59,1	1,20	18,2	82334,6	1140	3557,6	218360,9	218247,8	0,0005179	247,3	7,9	26,0	5,292	42407
16	319,4	59,1	1,20	18,2	82383,5	1140	3558,2	218413,4	218360,9	0,0002404	247,2	7,9	26,0	5,445	42421
17	319,4	59,1	1,20	18,2	82406,3	1140	3558,5	218437,8	218413,4	0,0001116	247,2	7,9	26,0	5,516	42427
18	319,4	59,2	1,20	18,2	82416,8	1140	3558,6	218449,1	218437,8	0,0000518	247,2	7,9	26,0	5,549	42430
19	319,4	59,2	1,20	18,2	82421,7	1140	3558,7	218454,4	218449,1	0,0000241	247,2	7,9	26,0	5,564	42432
20	319,4	59,2	1,20	18,2	82424,0	1140	3558,7	218456,8	218454,4	0,0000112	247,2	7,9	26,0	5,572	42432
21	319,4	59,2	1,20	18,2	82425,0	1140	3558,7	218458,0	218456,8	0,0000052	247,1	7,9	26,0	5,575	42433
22	319,4	59,2	1,20	18,2	82425,5	1140	3558,7	218458,5	218458,0	0,0000024	247,1	7,9	26,0	5,576	42433
23	319,4	59,2	1,20	18,2	82425,8	1140	3558,7	218458,7	218458,5	0,0000011	247,1	7,9	26,0	5,577	42433
24	319,4	59,2	1,20	18,2	82425,9	1140	3558,7	218458,8	218458,7	0,0000005	247,1	7,9	26,0	5,577	42433
25	319,4	59,2	1,20	18,2	82425,9	1140	3558,7	218458,9	218458,8	0,0000002	247,1	7,9	26,0	5,578	42433

DWT =	125000	Ton	C _B =	0,88
Δ inicial	142857,1	Ton	= 13	1E-04

	NAVIO NÃO BALANCEADO # 2														
# Iter	LWL	В	D/T	D	Wcasco	Wmaq	Woutfit	WFL	EMPUXO	(WFL-EMP)/WFL	LCtk	LStk	LMreq	LM_Disp - LM_Req	PI_REQ
1	294,2	43,9	1,20	14,6	55269	740	2629	188082,1	142857,1	0,24045326	327,9	10,6	22,7	-98,12	34183
2	322,5	48,1	1,64	21,9	58066	1140	2895	191933,9	188082,1	0,02006829	185,9	6,1	26,0	71,52	39730
3	324,6	48,5	1,22	16,5	76255	1140	2914	211233,6	191933,9	0,09136666	256,0	8,3	26,0	1,28	39961
4	335,2	50,0	1,22	17,0	85150	1140	3000	220754,2	211233,6	0,04312752	238,6	7,7	26,0	29,11	42094
5	340,1	50,8	1,20	16,9	91204	1140	3038	227211,1	220754,2	0,02841811	236,6	7,6	26,0	35,88	43117
6	343,4	51,3	1,20	17,1	94283	1140	3062	230501,0	227211,1	0,01427282	231,7	7,5	26,0	44,06	43809
7	345,1	51,5	1,20	17,2	95857	1140	3074	232182,3	230501,0	0,00724145	229,2	7,4	26,0	48,11	44160
8	345,9	51,6	1,20	17,2	96663	1140	3080	233042,9	232182,3	0,00369276	228,0	7,3	26,0	50,15	44339
9	346,3	51,7	1,20	17,2	97076	1140	3083	233483,7	233042,9	0,00188798	227,4	7,3	26,0	51,18	44430
10	346,6	51,7	1,20	17,2	97288	1140	3084	233709,6	233483,7	0,00096653	227,1	7,3	26,0	51,71	44477
11	346,7	51,7	1,20	17,2	97396	1140	3085	233825,4	233709,6	0,00049514	226,9	7,3	26,0	51,98	44501
12	346,7	51,8	1,20	17,3	97452	1140	3086	233884,7	233825,4	0,00025374	226,8	7,3	26,0	52,12	44513
13	346,8	51,8	1,20	17,3	97480	1140	3086	233915,1	233884,7	0,00013005	226,8	7,3	26,0	52,19	44519
14	346,8	51,8	1,20	17,3	97495	1140	3086	233930,7	233915,1	0,00006666	226,8	7,3	26,0	52,23	44523
15	346,8	51,8	1,20	17,3	97502	1140	3086	233938,7	233930,7	0,00003417	226,8	7,3	26,0	52,25	44524
16	346,8	51,8	1,20	17,3	97506	1140	3086	233942,8	233938,7	0,00001752	226,8	7,3	26,0	52,26	44525
17	346,8	51,8	1,20	17,3	97508	1140	3086	233944,9	233942,8	0,00000898	226,8	7,3	26,0	52,26	44526
18	346,8	51,8	1,20	17,3	97509	1140	3086	233946,0	233944,9	0,00000460	226,8	7,3	26,0	52,26	44526
19	346,8	51,8	1,20	17,3	97510	1140	3086	233946,5	233946,0	0,00000236	226,8	7,3	26,0	52,27	44526
20	346,8	51,8	1,20	17,3	97510	1140	3086	233946,8	233946,5	0,00000121	226,8	7,3	26,0	52,27	44526
21	346,8	51,8	1,20	17,3	97510	1140	3086	233947,0	233946,8	0,00000062	226,8	7,3	26,0	52,27	44526
22	346,8	51,8	1,20	17,3	97510	1140	3086	233947,0	233947,0	0,00000032	226,8	7,3	26,0	52,27	44526
23	346,8	51,8	1,20	17,3	97510	1140	3086	233947,1	233947,0	0,00000016	226,8	7,3	26,0	52,27	44526
24	346,8	51,8	1,20	17,3	97510	1140	3086	233947,1	233947,1	0,00000008	226,8	7,3	26,0	52,27	44526
25	346,8	51,8	1,20	17,3	97510	1140	3086	233947,1	233947,1	0,0000004	226,8	7,3	26,0	52,27	44526