RAFAEL MÁXIMO CARREIRA RIBEIRO

Procedimento de projeto de embarcações trimarã por otimização multiobjetivo

São Paulo 2015 RAFAEL MÁXIMO CARREIRA RIBEIRO

Procedimento de projeto de embarcações trimarã por otimização multiobjetivo

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

Área de concentração: Engenharia Naval e Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Luis Rodrigues de Andrade

São Paulo 2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.
São Paulo, <u>4</u> de <u>maio</u> de <u>2015</u>
Ret Alleria
Assinatura do autor:
Assinatura do orientador:

Catalogação-na-publicação

Ribeiro, Rafael Maximo Carreira Procedimento de projeto de embarcações trimarã por otimização multiobjetivo / R. M. C. Ribeiro -- versão corr. -- São Paulo, 2015. 136 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Embarcações (Projeto) 2.Casco de embarcações 3.Transporte de passageiros 4.Otimização global I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os mestres e professores com os quais aprendi a caminhar sozinho, e a todos aqueles que escolheram caminhar a meu lado.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e ao Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo, por disponibilizarem os recursos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, pela bolsa de mestrado concedida durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Professor Bernardo Luis Rodrigues de Andrade, pela orientação do trabalho e pelas profícuas discussões a respeito dos diversos temas abordados.

Aos Professores Kazuo Nishimoto e Claudio Mueller Prado Sampaio, com os quais trabalhei em diversos projetos no laboratório do TPN, e que me propiciaram um enorme aprendizado profissional.

Aos meus colegas de curso Felipe Ruggeri, Rodrigo Schiller e Humberto Nakanishi, pela ajuda no desenvolvimento do modelo de síntese e do processo de otimização.

E por último, mas não menos importante, à minha família, namorada, e amigos que me acompanharam durante todo o processo (nem) sempre com paciência!

"It's a dangerous business, Frodo, going out your door. You step onto the road, and if you don't keep your feet, there's no knowing where you might be swept off to".

"É um negócio perigoso, Frodo, sair da sua porta. Você pisa na estrada e, se não controlar seus pés, nunca sabe para onde será levado".

(J. R. R. Tolkien)

RESUMO

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um modelo de síntese para o projeto conceitual de uma embarcação rápida do tipo trimarã, destinada ao transporte de passageiros. Tal modelo visa possibilitar o entendimento dos mecanismos que governam o projeto deste tipo de navio, através de análises comparativas (atributos de desempenho) entre diferentes soluções de projeto, em função dos parâmetros escolhidos para sua representação (variáveis de projeto). Foram desenvolvidos dois modelos de síntese, em programas comerciais distintos. Cada modelo gera a superfície do casco, a partir de séries sistemáticas, e calcula a resistência ao avanço dividindo-a nas parcelas viscosa e de ondas. A parcela viscosa é calculada pela aproximação de placa plana e a parcela de ondas calculada pela teoria de navio fino. São feitas, ainda, estimativas preliminares do fator de forma e da resistência adicional em ondas. O arranjo geral dos principais espaços e subsistemas foi parametrizado com base no arranjo de embarcações semelhantes e o conforto dos passageiros a bordo é calculado segundo padrões estabelecidos por sociedades classificadoras internacionais. As variáveis de projeto escolhidas foram o comprimento do casco central e razões entre as demais dimensões, de modo a permitir o cálculo das dimensões principais de cada casco e o posicionamento relativo entre eles. Com isso, tem-se que, ao mudar o valor do comprimento, escala-se o casco mantendo-se todas as proporções. A vantagem buscada ao se utilizar esta abordagem é a extinção das restrições geométricas implícitas, pois estarão embutidas diretamente nas restrições explícitas que definem os limites de exploração de cada variável de projeto. Estes modelos foram integrados a procedimentos de otimização mono e multiobjetivo, com base em diferentes versões do algoritmo genético, e aplicados a um problema de projeto exemplo. As funções de mérito, ou funções objetivo, escolhidas para este problema foram a potência requerida pela embarcação para navegar na velocidade de projeto e a disponibilidade operacional da embarcação, calculada a partir dos índices de conforto dos passageiros. Com isso, descobriu-se que os parâmetros com maior influência na resistência ao avanço e no conforto dos passageiros são o comprimento do casco central e sua razão de comprimento por boca. O posicionamento relativo entre os cascos é extremamente importante para a resistência de ondas geradas pela embarcação, mas não é possível observar nenhuma grande tendência em relação a posições que privilegiam seja a resistência seja o comportamento, pois o posicionamento ótimo para cada objetivo depende tanto do número de Froude quanto das demais dimensões da embarcação.

Palavras chave: Trimarã, Embarcação de passageiros de alta velocidade, Otimização, Algorítimo genético, Multiobjetivo, Fronteira de Pareto.

ABSTRACT

The present work studies the development of a synthesis model for the conceptual design of a fast trimaran passenger vessel, in order to understand the mechanisms that govern the design of such a vessel through a comparative analysis (performance parameters) between different design solutions, as a function of the variables chosen to uniquely represent them (design variables). Two separate models were developed, using different commercial softwares. Each model generates the hull surface based on systematic hull series and calculates the ship's forward resistance as the sum of the viscous and wave components. The viscous component is estimated by flat plate approximation, corrected by a form factor, and the wave component is calculated according to thin ship theory. A preliminary estimate of the ship's added resistance in waves is also made. The general layout of the main volumes and systems was parametrized following design trends of similar ships and passenger comfort on board was calculated using international classification societies standards. The design variables chosen were the length of the center hull, the ratios between the main dimensions of each hull as to allow for their calculation and two coefficients regarding the relative positioning of the center and side hulls. The advantage sought by adopting this approach is the elimination of implicit geometrical constraints, once they will be automatically included in the explicit constraints defining the exploration range of each design variable. These models were then coupled to mono and multi objective optimization procedures, based on different versions of the genetic algorithm, and applied to a case study. The objective functions taken for this problem were the required power to achieve the design speed and the operational availability, measured from passengers comfort thresholds. It was found that the parameters with the most influence on the forward resistance, and thus on required power, and on passengers comfort level are the center hull length and its length to breadth ratio. The relative positioning of the side hulls play an important role on the total wave resistance of the ship, although it was not possible to observe any clear trend concerning positions that would favor nor the ship forward resistance neither its seakeeping performance. This is due the fact that the optimum positions of the side hulls are also a function of the Froude number and the remaining design variables.

Key words: Trimaran, Fast passenger vessel, Optimization, Genetic algorithm, Multi objective, Pareto front.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Reservas petrolíferas na costa da região sudeste (Fonte: Petrobras). \ldots .	24
1.2	Modelo alternativo para o transporte de passageiros	24
1.3	Embarcações rápidas segundo painel de 1981 da ITTC (SAVITSKY, 1981).	26
1.4	Comparação da potência efetiva de trimarãs com monocascos e catamarãs de deslocamento semelhante (ZHANG, 1997).	27
1.5	Comparação do consumo de combustível do trimarã Ilan com as embarca- ções Rangeboat e Bavaria, adaptado de Davis (2007)	28
1.6	Modelo de trimarã proposto por Zhang (1997), Andrews (2003)	29
1.7	Divisão do processo de projeto de engenharia, adaptado de Arora (1989). $% = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum$	30
1.8	Espiral de projeto convencionalmente usada em engenharia naval, adaptado de Gale (2003).	31
1.9	Comparação entre projeto convencional e projeto otimizado, adaptado de Aror (1989)	a 32
2.1	Exemplos das embarcações.	34
2.2	Variações de potência efetiva e peso leve em função de L/B (ZHANG, 1997).	36
2.3	Variações de potência efetiva, peso leve e GM em função do deslocamento percentual de um casco lateral (ZHANG, 1997).	37
2.4	Variação da área molhada em função da razão B/T (ZHANG, 1997)	38
2.5	Comparação da área molhada de trimarans com monocascos e SWATH's, em função do deslocamento (ZHANG, 1997)	38
2.6	Efeito da variação do vão livre (ZHANG, 1997).	39
2.7	Comparação das curvas de braço de endireitamento com e sem saia (ZHANG, 1997).	40
2.8	Exemplo de seção mestra de um trimarã (ANDREWS, 2003)	41

2.9	Redução de velocidade em função do estado de mar (ZHANG, 1997). $\ .$	42
2.10	Comparação do diâmetro tático em função da área de leme, para um ângulo de leme fixo (ZHANG, 1997).	43
2.11	Raio de giro com propulsores em sentidos opostos (ZHANG, 1997)	44
3.1	Fluxograma do modelo de síntese	45
3.2	Modelo paramétrico do trimarã (corte da linha d'água)	47
3.3	Vistas do casco gerado em <i>NURBS</i>	49
3.4	Diagramas de integração casco-hidrojato, adaptado de Faltinsen (2005)	51
3.5	Exemplo de arranjo Dolphin Ulsan (One2three Naval Architects, 2013)	51
3.6	Arranjo dos sistemas e espaços considerados	52
3.7	Configurações de motores avaliadas	53
3.8	Configurações de hidrojatos avaliadas.	53
3.9	Vista superior do casco central: Arranjo dos motores da embarcação Dolphin Ulsan	54
3.10	Graus de liberdade de uma embarcação.	56
3.11	Variação da frequência de encontro com a frequência das ondas do mar para mares de popa (BECK et al., 1989)	58
3.12	Espectros de encontro calculados, retirado de Beck et al. (1989)	58
3.13	Exemplo de gráfico polar gerado pela análise de comportamento no mar para avaliação de disponibilidade.	60
3.14	Visualização do casco lateral gerado no FriendShip [®]	63
3.15	Curvas utilizadas para geração do casco central no FriendShip [®]	64
3.16	Visualização do casco central gerado no FriendShip [®]	64
3.17	Vista isométrica da superficie do trimarã gerado no FriendShip [®]	64
3.18	Visualização das seções do casco gerado no FriendShip [®]	65
3.19	Vista isométrica da malha exportada para o Seakeeper [®]	66
4.1	Comparação entre minimização de $f(\bar{x})$ e maximização de $-f(\bar{x})$, adaptado de Rao (2009).	68

4.2	Solução ótima de $c \cdot f(\bar{x})$ e $c + f(\bar{x})$, retirado de Rao (2009)	68
4.3	Curvas de nível e restrições para um problema com duas variáveis de pro- jeto, adaptado de Rao (2009)	70
5.1	Resistência de ondas em função do posicionamento relativo entre os cascos, representada em [kN] pela escala de cores de cada gráfico	76
5.2	Resistência de ondas em função do posicionamento relativo entre os cascos para a embarcação de 90 metros de comprimento.	77
5.3	Potência requerida em função do posicionamento relativo entre os cascos [MW]	78
5.4	Disponibilidade operacional em função do posicionamento relativo entre os cascos [MW].	79
5.5	Comparação entre as vistas frontais para as soluções mono-objetivo de mini- mização da potência requerida e maximização da disponibilidade operacional.	80
5.6	Comparação entre as vistas superiores para as soluções mono-objetivo de minimização da potência requerida e maximização da disponibilidade ope- racional	81
5.7	Fronteira de Pareto da otimização multiobjetivo	81
5.8	Otimização multiobjetivo: Comparação entre as vistas frontais para as soluções representativas das regiões de potência mínima e disponibilidade máxima.	82
5.9	Otimização multiobjetivo: Comparação entre as vistas superiores para as soluções representativas das regiões de potência mínima e disponibilidade máxima.	82
5.10	Fronteira de Pareto da otimização multiobietivo.	85
5.11	Fronteira de Pareto da otimização multiobjetivo, incluindo os resultados do processo de otimização mono-objetivo na população inicial.	85
5.12	Fronteira de Pareto da otimização multiobjetivo, incluindo os resultados obtidos na otimização da figura 5.11 na população inicial	86
5.13	Comparação entre as fronteiras de Pareto para diferentes velocidades	87
5.14	Otimização multiobjetivo FriendShip	88

5.15	Comparação entre as fronteiras de Pareto para diferentes velocidades. \ldots 91
5.16	Comparação das fronteiras de Pareto obtidas no Matlab® e no FriendShip®. 93
5.17	Mapas auto-organizáveis: Características gerais
5.18	Mapas auto-organizáveis: Funções objetivo
5.19	Mapas auto-organizáveis: Restrições
5.20	Mapas auto-organizáveis: Variáveis de Projeto - casco central 97
5.21	Mapas auto-organizáveis: Variáveis de Projeto - casco lateral
5.22	Mapas auto-organizáveis: Variáveis de Projeto - posicionamento relativo 99
5.23	Correlação estatística
5.24	Histogramas de significância de <i>Student</i> para resistência total 102
5.25	Histogramas de significância de $Student$ para aceleração vertical RMS 102
5.26	Histogramas de significância de <i>Student</i> para a restrição de Lastro 103
5.27	Histogramas de significância de $Student$ para a restrição de GM inicial 103
A.1	Tipos de cascos investigados por Tarafder et al. (2006)
A.2	Comparação do coeficiente de resistência de ondas para os três tipos de cascos (TARAFDER et al., 2006)
A.3	Comparação do coeficiente de resistência de onda para o casco <i>Wigley</i> : Pontos azuis (método implementado); Linha preta contínua (YEUNG et al., 2004).
A.4	Comparação de coeficiente de resistência de onda para embarcação cata- marã com cascos individuais <i>Wigley</i> , com diferentes valores de separação entre os cascos (RUGGERI et al., 2012b)
A.5	Validação da rotina de cálculo da resistência de ondas para um trimarã 117
A.6	Casco utilizado para validação da rotina de cálculo do coeficiente de resis- tência de ondas (C_w)
A.7	Comparação entre o C_w da embarcação completa com o C_w dos cascos isolados (soma ponderada pela área molhada do C_w de cada casco 119
C.1	Comparação do RAO de afundamento (<i>heave</i>)

C.2	Comparação do RAO de arfagem (pitch)	127
D.1	Variação da função $y(x)$	131
D.2	Solução de um problema de otimização linear no espaço tridimensional	132
D.3	Comparação entre os caminhos seguidos pelos métodos Simplex e de Ka- markar	133
D.4	Procedimento sequencial linear.	135

LISTA DE TABELAS

1.1	Limites dos regimes de velocidade (PAVLENKO, 1978 apud DUBROVSKY; LYAKHOVITSKY, 2001).	25
1.2	Características das embarcações do estudo apresentado em Davis (2007). $% = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_$	28
1.3	Embarcações semelhantes.	30
2.1	Critérios para avaliação do comportamento em ondas	42
3.1	Intervalos de validade da série 64	48
3.2	Critérios adotados pela NORDFORSK (1987) para avaliação de movimento.	61
3.3	Critérios da ABS COMF e ABS COMF+	62
4.1	Limites de variação das variáveis de projeto.	73
4.2	Coeficientes de penalização (C_{rest}) das funções objetivo	74
5.1	Dimensões do casco padrão para avaliação do posicionamento relativo entre os cascos.	75
5.2	Resultados da otimização mono-objetivo: disponibilidade e potência	80
5.3	Variáveis de projeto para cada solução	80
5.4	Resultados da otimização multiobjetivo sem restrições não lineares (pena- lização da função objetivo): disponibilidade e potência	83
5.5	Variáveis de projeto para as soluções dos extremos da fronteira de Pareto	83
5.6	Resultados da otimização mono-objetivo sem restrições não lineares (pena- lização da função objetivo): disponibilidade e potência.	83
5.7	Variáveis de projeto para cada solução da otimização mono-objetivo sem restrições não lineares.	84
5.8	Resultados da otimização mono-objetivo no FriendShip®: Aceleração ver- tical e potência requerida.	89

5.9	Variáveis de projeto para cada solução da otimização mono-objetivo no FriendShip [®]
5.10	Resultados da otimização multiobjetivo no FriendShip®: Aceleração verti- cal e potência requerida
5.11	Variáveis de projeto para cada solução da otimização multiobjetivo no FriendShip [®]
5.12	Comparação dos resultados de potência requerida entre os procedimentos multiobjetivo do Matlab [®] e do FriendShip [®]
5.13	Comparação das variáveis de projeto para os extremos da fronteira de Pa- reto do Matlab [®] e do FriendShip [®]
A.1	Dimensões principais do casco Wigley parabólico
A.2	Dimensões principais do casco Wigley parabólico da embarcação catamarã. 115
A.3	Dimensões do casco de validação
B.1	Constantes de peso e <i>air gap.</i>
B.2	Raio de giração para estimativa de inércia dos cascos
D.1	Principais diferenças entre o algoritmo genético e os algoritmos clássicos. 136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ITTC	International	Towing	Tank	Conference
------	---------------	--------	------	------------

- SWATH Small Waterplane Area Twin Hull
- RAO Response Amplitude Operator
- WAMIT Wave Analysis MIT
- MIT Massachusetts Institute of Technology
- IMO International Maritime Organization
- NURBS Non-Uniform Rational Basis Spline
- MJP Marine Jet Power Inc.
- MTU Motoren und Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH
- ABS American Bureau of Shipping
- MSDV Motion Sickness Dose Value
- RMS Root Mean Square
- ALGA Augmented Lagrangian Genetic Algorithm
- NSGA-II Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
- MCR Maximum Continuous Rating
- CFD Computational fluid dynamics

LISTA DE SÍMBOLOS

Fn	Número de Froude
∇	Volume deslocado pela embarcação
V_s	Velocidade da embarcação
g	Aceleração da gravidade
L	Comprimento
Sl	Elongação do casco
Pot _{inst}	Potência instalada
В	Boca
C_W	Coeficiente de resistência de ondas
C_f	Coeficiente de resistência friccional
S_W	Área molhada
GM	Altura metacêntrica
Δ_{SH}	Deslocamento de um casco lateral
Δ	Deslocamento total da embarcação
Т	Calado
GM_0	Altura metacêntrica inicial
GZ	Braço de endireitamento
L_{ch}	Comprimento do casco central
$(L/B)_{ch}$	Razão de comprimento por boca do casco central
$(B/T)_{ch}$	Razão de boca por calado do casco central
$(C_b)_{ch}$	Coeficiente de bloco do casco central
$(L/B)_{sh}$	Razão de comprimento por boca dos cascos laterais
$(C_b)_{sh}$	Coeficiente de bloco dos cascos laterais
SP	Coeficiente de separação lateral dos cascos
ST	Coeficiente de separação longitudinal dos cascos
γ	Razão entre o deslocamento de um casco lateral e o deslocamento total da embarcação
λ	Razão entre o comprimento do casco lateral e o comprimento do casco central

Comprimento do casco lateral
Boca do casco central
Boca do casco lateral
Separação transversal
Separação longitudinal
Pontal
Resistência viscosa
Coeficiente de resistência viscosa
Densidade dá água
Fator de forma
Número de Reynolds
Resistência total
Resistência adicional em ondas
Peso leve da embarcação
Deadweight total
Peso em aço
Peso do maquinário
Peso de acabamento
Peso da margem de projeto
Peso dos passageiros
Peso da bagagem
Peso do combustível
Peso de serviço
Altura metacêntrica inicial
Altura do centro de carena
Raio metacêntrico
Altura do centro de gravidade
Momento transversal de inércia de área do plano de linha d'água
Coeficiente de área de linha d'água do casco central
Coeficiente de área de linha d'água dos cascos laterais
Frequência de encontro
Frequência da onda incidente

U_0	idem V_s
μ_0	Ângulo relativo entre a direção de propagação das ondas e a direção de avanço
	da embarcação
S_{ζ}	Espectro de mar
m_n	Momento espectral de ordem n
$(x,y,z)_G$	Coordenadas do centro de gravidade
T_P	Período entre picos
H_S	Altura significativa de onda
A ^{mín} pas	Área mínima para acomodar os passageiros
A _{convés}	Área total do convés de passageiros
a_z	Aceleração vertical
a_w	Aceleração ponderada
Potreq	Potência requerida
<i>Pot_{efet}</i>	Potência efetiva

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO		23	
	1.1	Panorama e motivação	23	
	1.2	Histórico de trimarãs	29	
	1.3	Abordagem de projeto	30	
	1.4	Objetivos	32	
	1.5	Organização do trabalho	33	
2	Сар	RACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRIMARÃS E DE SEU PROJETO	34	
	2.1	Esbeltez do casco central	35	
	2.2	Razão de comprimento e de deslocamento do casco lateral	36	
	2.3	Área molhada	37	
	2.4	Vão livre mínimo	38	
	2.5	Estabilidade e curva de braço de endireitamento	39	
	2.6	Projeto estrutural	40	
	2.7 Comportamento no mar		41	
	2.8 Manobrabilidade		43	
3	Pro	OPOSTA DE MODELAGEM DO PROBLEMA DE PROJETO	45	
	3.1	Introdução	45	
	3.2	.2 Definição das variáveis de projeto		
	3.3	.3 Modelagem em Matlab [®]		
		3.3.1 Geração do casco	47	
		3.3.2 Resistência ao avanço	49	

		3.3.3	Integração casco-propulsor	. 50
		3.3.4	Arranjo geral	. 51
		3.3.5	Pesos & Centros	. 54
		3.3.6	Estabilidade	. 55
		3.3.7	Comportamento em ondas e avaliação do conforto a bordo	. 55
	3.4	.4 Modelagem no FriendShip [®]		
		3.4.1	Geração do casco	. 63
		3.4.2	Cálculos hidrostáticos	. 65
		3.4.3	Comportamento em ondas	. 65
4	0 р	ROCES	SO DE OTIMIZAÇÃO	67
	4.1	Visão	geral	. 67
	4.2	Métod	os de otimização	. 70
		4.2.1	Métodos adotados	. 71
	4.3	Aplica	ção a um problema de projeto	. 72
5	Res	ULTAD	DS	75
	5.1	Avaliação da posição dos cascos laterais		
	5.2	Otimiz	zação: Matlab®	. 79
		5.2.1	Otimização mono-objetivo	. 79
		5.2.2	Otimização multiobjetivo	. 81
		5.2.3	Otimização com velocidade reduzida para 30 nós	. 86
	5.3	Otimiz	zação: FriendShip [®]	. 88
		5.3.1	Otimização com velocidade reduzida para 30 nós	. 91
	5.4	Comparação dos resultados: Matlab [®] e FriendShip [®]		
	5.5	Mapas	auto-organizáveis	. 95
	5.6	Anális	es estatísticas	. 100

6	Con	ICLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
	6.1	Trabalhos futuros	. 106
R	EFERI	ÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
A	PÊND	ice A – Validação da teoria de navio fino	113
	A.1	Efeito da seção transversal do casco	. 113
	A.2	Aplicação da teoria a cascos <i>Wigley</i>	. 114
		A.2.1 Monocascos	. 114
		A.2.2 Catamarãs	. 115
		A.2.3 Trimarãs	. 116
A	PÊND	ICE B – C ÁLCULO DE PESOS E CENTROS	120
	B.1	Peso leve	. 120
		B.1.1 Estrutura	. 120
		B.1.2 Máquinário	. 122
		B.1.3 Acabamento	. 122
		B.1.4 Margem	. 122
	B.2	DWT	. 123
		B.2.1 Passageiros e bagagens	. 123
		B.2.2 Combustível	. 123
		B.2.3 Serviço	. 123
	B.3	Centros	. 124
	B.4	Inércias	. 124
A	PÊND	ICE C – COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO NO MAR	126
	C.1	Operadores de amplitude de resposta - RAO	. 126
Ar	PÊND	ICE D – PRINCIPAIS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	128

D.1	Métod	os analíticos clássicos
	D.1.1	Cálculo diferencial
	D.1.2	Multiplicadores de Lagrange
	D.1.3	Cálculo variacional
D.2	Métod	os numéricos
	D.2.1	Programação linear
	D.2.2	Programação não-linear
	D.2.3	Programação sequencial
	D.2.4	Algoritmo genético
	D.2.5	Recozimento simulado (Simulated Annealing)

1 INTRODUÇÃO

1.1 PANORAMA E MOTIVAÇÃO

Com a descoberta de campos de óleo e gás cada vez mais afastados da costa, novos desafios precisam ser vencidos para possibilitar sua exploração. Além dos desafios tecnológicos, o aumento da distância faz com que toda a logística de transporte de suprimentos e pessoal seja repensada, já que não só o custo das viagens até a costa aumenta, como também o custo de oportunidade aumenta, pois o tempo gasto com essas viagens passa a ser mais significante.

Para resolver esse problema, uma solução possível é a utilização de plataformas intermediárias de distribuição para armazenar suprimentos, de modo que os navios de apoio a plataforma possam recarregar sem precisar voltar até a costa. Mas isto não resolve ainda o transporte da tripulação dessas embarcações e das plataformas em si, pois, embora um navio possa operar por meses seguidos sem voltar à costa, um tripulante não pode ficar embarcado por mais de 15 dias consecutivos, de acordo com a legislação brasileira (Art. 8^{o} da lei N^{o} 5.811, de 11 de Outubro de 1972).

A figura 1.1 mostra a distribuição dos campos de exploração de petróleo e as reservas descobertas na camada do pré-sal na região sudeste.

Pode-se observar que, no caso da bacia de Santos, há um aumento considerável da distância dos reservatórios até a costa. Uma alternativa para o transporte de tripulação tanto para as plataformas, que atualmente é realizado principalmente por meio de helicópteros, quanto para embarcações de apoio, pesquisa, perfuração, lançamento de linhas, etc., é o emprego de embarcações de passageiros rápidas.



Figura 1.1: Reservas petrolíferas na costa da região sudeste (Fonte: Petrobras).

Como pode ser visto na figura 1.2, essas embarcações fariam o transporte de uma grande quantidade de passageiros até uma plataforma intermediária (HUB), que seriam então levados a sua destinação final por helicópteros.



Figura 1.2: Modelo alternativo para o transporte de passageiros.

Tipicamente, pode-se definir três regimes de navegação para embarcações, são eles: deslocamento, transição e planeio. Em Dubrovsky e Lyakhovitsky (2001), são definidas diferentes formas de se classificar uma embarcação em um destes regimes, com base em relações entre sua velocidade e características geométricas.

De acordo com Pavlenko (apud DUBROVSKY; LYAKHOVITSKY, 2001), os limites de cada regime podem ser dados em função do número de Froude com base no deslocamento

(ver equação 1.1), conforme mostrado na tabela 1.1.

$$Fn_{\nabla} = V_s / \sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}} \tag{1.1}$$

Onde:

- V_s é a velocidade da embarcação;
- g é a aceleração da gravidade; e
- ∇ é o volume deslocado pelo casco, sendo que para multicascos, pode-se utilizar tanto o volume total quanto o volume de um único casco.

Tabela 1.1: Limites dos regimes de velocidade (PAVLENKO, 1978 apud DUBROVSKY; LYAKHOVITSKY, 2001).

Deslocamento	$0 < Fn_{\nabla} \leq 1$
Transição	$1 < Fn_{\nabla} \leq 3$
Planeio	$3 < Fn_{\nabla}$

Já de acordo com Voytkunsky (apud DUBROVSKY; LYAKHOVITSKY, 2001), o regime de transição, com base no número de Froude em relação ao comprimento, $Fn = V_s/\sqrt{g \cdot L}$, está entre seis e treze décimos:

$$0, 6 < Fn < 1, 3 \tag{1.2}$$

E por fim, Basin (apud DUBROVSKY; LYAKHOVITSKY, 2001) propõe que o limite que define a região de transição seja função da elongação do casco:

$$\frac{1}{\sqrt{Sl}} < Fn < \frac{3}{\sqrt{Sl}} \tag{1.3}$$

Sendo $Sl = L/\nabla^{1/3}$ a elongação do casco.

Segundo Faltinsen (2005), embarcações com número de Froude superior a quatro décimos podem ser consideradas rápidas, de modo que estas estarão, em geral, no regime de transição ou de planeio. Os diferentes conceitos existentes para embarcações de alta valocidade podem ser agrupados em 4 categorias principais (SAVITSKY, 1981), como mostra a figura 1.3.



Figura 1.3: Embarcações rápidas segundo painel de 1981 da ITTC (SAVITSKY, 1981).

Os monocascos são o tipo mais representativo entre os navios existentes e possuem uma alta eficiência de carga (peso de carga por peso total), são robustos e têm um custo de construção baixo, comparado aos demais tipos. No entanto, os cascos de deslocamento encontram um limite de velocidade quando o número de Froude se aproxima de 0,5 (0,9 para navios esbeltos) e são mais susceptíveis ao estado de mar.

Dentre os multicascos, as embarcações com dois cascos são as mais recorrentes. Os cascos do tipo catamarã são amplamente aplicados para balsas rápidas, pois tem elevada área de convés e deslocamento reduzido, devido ao uso de materiais leves, como o alumínio (ZHANG, 1997). Mas possuem resposta em ondas demasiado rápida, com grandes acelerações verticais no convés (INSEL, 2000), devido a alta inércia de área na linha d'água. Podem apresentar ainda problemas de fadiga estrutural e necessitam de proteção extra contra incêndio, ambos devido ao uso de materiais leves (ZHANG, 1997).

Outra embarcação de destaque que possui também dois cascos é o *SWATH - Small Waterplane Area Twin Hull*, ou Cascos gêmeos com pequena área de linha d'água (tradução livre) e consiste de dois cascos cilíndricos submersos conectados ao convés por estruturas com pequeno volume e área de linha d'água. Isso garante ao *SWATH* excelente comportamento no mar, embora o torne também extremamente sensível a mudanças de trim e de deslocamento (INSEL, 2000). A elevada área molhada faz com que seu desempenho em águas calmas seja pior, do ponto de vista de resistência ao avanço, e seus custos de produção e operação são mais elevados, devido a maior complexidade do casco (ZHANG, 1997). A figura 1.4(a) traz uma comparação entre a potência de diversos monocascos existentes e a faixa de potência estimada para trimarãs de deslocamento semelhante, em função da velocidade. Pode-se notar claramente que, para altas velocidades, a potência necessária para os trimarãs é significantemente menor que aquela dos monocascos. Em velocidades menores que vinte e cinco nós, entretanto, há embarcações monocasco com menor potência requerida. Isto acontece pois a contribuição da resistência de ondas é pequena em baixo Froude, e a parcela de resistência viscosa do trimarã é maior pois este possui maior área molhada.



Figura 1.4: Comparação da potência efetiva de trimarãs com monocascos e catamarãs de deslocamento semelhante (ZHANG, 1997).

Há melhora da potência efetiva também em comparação a catamarãs de mesmo deslocamento, como mostra a figura 1.4(b). Isto pode ser explicado pela maior área molhada dos catamarãs, e pela redução da resistência de ondas dos trimarãs, obtida pelo correto posicionamento dos cascos laterais, de modo a causar interferência destrutiva entre as ondas geradas por eles e pelo casco central.

Em relação a cascos de planeio, há melhoras significativas não só do ponto de vista da resistência ao avanço como também do comportamento no mar. Isto ocorre pois o casco alongado do trimarã "corta" as ondas, sofrendo pouco ou nenhum impacto no fundo, quando comparado a cascos de planeio (DAVIS, 2007).

A tabela 1.2 resume as principais características das três embarcações utilizadas no estudo de comparação do consumo de combustível, apresentado no projeto TRYBRID (DAVIS, 2007).



Tabela 1.2: Características das embarcações do estudo apresentado em Davis (2007).

Dependendo da faixa de velocidade na qual se deseja operar, embarcações do tipo trimarã podem apresentar um consumo de combustível extremamente reduzido em comparação a cascos convencionais de planeio e semi-deslocamento, como pode ser visto na figura 1.5



Figura 1.5: Comparação do consumo de combustível do trimarã Ilan com as embarcações Rangeboat e Bavaria, adaptado de Davis (2007).

1.2 HISTÓRICO DE TRIMARÃS

As embarcações trimarã existem há muito tempo, ainda que o termo tenha sido empregado de maneira técnica pela primeira vez em um relatório de 1959 (ZHANG, 1997). Uma das primeiras formas de embarcação trimarã a ser usada no mar tem origem na Indonésia (HORNELL, 1946), com o casco central feito a partir de um tronco de árvore e os dois cascos laterais afastados do casco central.

Surge então, em meados da década de 90, um conceito de trimarã de deslocamento no qual o casco central é responsável por mais de noventa porcento da flutuação da embarcação e os cascos laterais são responsáveis pela estabilidade (ZHANG, 1997; ANDREWS, 2003), ilustrado na figura 1.6.



Figura 1.6: Modelo de trimarã proposto por Zhang (1997), Andrews (2003).

Dentre as vantagens desse arranjo, podem-se citar vasta área de convés, baixa resistência ao avanço, boa estabilidade e bom comportamento no mar. No entanto, uma das principais desvantagens é que a introdução de mais cascos eleva a complexidade do projeto, tornando mais difícil a realização das vantagens citadas.

A tabela 1.3 lista alguns dos projetos de embarcações trimarã que foram utilizados como base de navios semelhantes para ajustar o modelo de síntese criado.

Ano	País	Nome	$\rm http://goo.gl/$
2012	Indonésia	Kri Klewang	6 M1 dU
2010	Australia	Auto Express 102	GgfkDY
2009	EUA	USS Independence	RieEQ e L6hpN
2005	Espanha	Benchijigua Express	CNX7Ub
2001	Australia	Dolphin Ulsan	jJXWh6
2000	Inglaterra	RV Triton	j6f5y

Tabela 1.3: Embarcações semelhantes.

1.3 ABORDAGEM DE PROJETO

Em engenharia, projetar é um processo iterativo do qual resultam desenhos, cálculos e relatórios que permitem a construção do sistema projetado (ARORA, 1989). Tal iteratividade implica que diversos sistemas de teste serão analisados antes que se possa obter uma solução aceitável, sendo que, em geral, busca-se encontrar o melhor sistema possível, de acordo com as especificações do projeto. A figura 1.7 ilustra uma possível divisão do processo de projeto em fases subsequentes.



Figura 1.7: Divisão do processo de projeto de engenharia, adaptado de Arora (1989).

Em engenharia naval, o método de projeto convencional é baseado na espiral de projeto (GALE, 2003), como no exemplo da figura 1.8, que consiste em analisar sequencialmente os diferentes subsistemas projetados e propor modificações até que se atinja uma solução satisfatória/viável.



Figura 1.8: Espiral de projeto convencionalmente usada em engenharia naval, adaptado de Gale (2003).

No entanto, a crescente demanda por sistemas mais eficientes e com custos menores fez com que métodos não convencionais de projeto fossem buscados, destacando-se, dentre eles, o projeto otimizado (RAO, 2009).

Em um projeto convencional, a solução encontrada depende muito da habilidade do projetista em prever o comportamento do sistema e fazer as alterações necessárias no projeto, tanto para encontrar uma solução que seja viável quanto para melhorar o desempenho de alguma função da solução. Para projetos de maior complexidade, nos quais os atributos não podem ser linearizados em função de poucas variáveis de projeto, é difícil prever o comportamento da solução em função da variação de uma ou outra variável de projeto.

E nesse ponto, o projeto otimizado beneficia-se do seu maior formalismo, com a definição de uma figura de mérito que mede o desempenho do sistema e com a tomada de decisões para melhoria do sistema baseada em informações de tendência, frente ao projeto convencional.

As figuras 1.9(a) e 1.9(b) ilustram as duas abordagens de projeto em questão, respectivamente, o projeto convencional e o projeto otimizado.



(a) Projeto convencional

(b) Projeto otimizado



Ambos os métodos são úteis em fases distintas do projeto, pois o projeto convencional, justamente por permitir maior influência do projetista, pode levar a mudanças conceituais do sistema. Mas uma vez definidos os conceitos principais, a formalização imposta pelo processo de otimização permite que sejam encontradas soluções que dificilmente seriam previstas por projetistas.

Vale esclarecer que tanto o projeto convencional quanto o otimizado fazem uso de uma ferramenta de análise, cuja função é determinar o comportamento ou resposta do sistema sob dadas condições de entrada. Tal ferramenta, também chamada modelo de síntese, pode ser aplicada a sistemas existentes ou a candidatos à solução do problema de projeto e é apenas parte do projeto como um todo, seja ele convencional ou otimizado.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para o projeto de embarcações rápidas do tipo trimarã, voltadas inicialmente para o transporte de passageiros. A posteriori, poderá ser considerado o transporte de suprimentos, granel sólido ou líquido, contenedores, veículos, etc. Como objetivos intermediários, citam-se a construção do modelo de síntese que será utilizado para analisar os candidatos a solução de projeto, e a implementação do processo de otimização e obtenção das dimensões ótimas de um trimarã projetado para um caso de estudo escolhido.

São objetivos paralelos, mas igualmente importantes, o entendimento dos métodos e técnicas de análise utilizados tanto na construção do modelo de síntese quanto na aplicação do processo de otimização. Bem como a compreensão dos mecanismos que governam o projeto de embarcações deste tipo.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 faz um resumo das principais considerações relativas ao projeto de uma embarcação de três cascos conforme o conceito proposto por Zhang (1997), Andrews (2003) e adotado no presente estudo.

O capítulo 3 detalha a abordagem de projeto adotada e descreve os modelos de síntese desenvolvidos. O apêndice A traz a validação da teoria de navio fino implementada para resolver o escoamento potencial e calcular a resistência de ondas, o apêndice B descreve em maior detalhe o modelo de cálculo dos pesos e centros da embarcação, e o apêndice C faz uma comparação entre os operadores de amplitude de resposta (RAO¹, na sigla em inglês) calculados pelo WAMIT[®] e pelo Seakeeper[®].

O capítulo 4 faz uma introdução ao processo de otimização e descreve o procedimento proposto e implementado. Um resumo dos principais métodos de otimização, incluindo o método adotado, pode ser encontrado no apêndice D.

O capítulo 5 traz os principais resultados obtidos a partir da aplicação do processo de otimização proposto a um caso exemplo, bem como as discussões e análises pertinentes.

Finalmente, o capítulo 6 resume as principais conclusões obtidas no decorrer da pesquisa e sugere problemas que poderão ser estudados em trabalhos futuros, a fim de contribuir para o melhor entendimento do tema.

³³

¹Nota: não confundir com o autor Singiresu S. Rao.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRIMARÃS E DE SEU PROJETO

Uma forma interessante, e de certo modo contra intuitiva, de se olhar para este tipo de embarcação é colocá-la como uma embarcação intermediária entre monocascos e catamarãs (ZHANG, 1997), cujos conceitos são bem mais difundidos. Para isso, deve-se considerar a razão entre o deslocamento de um casco lateral e o deslocamento total da embarcação, se esta razão for zerada, tem-se um monocasco, e se for levada a 1/2, tem-se um catamarã. Dessa forma, poderia-se esperar que o comportamento, de maneira geral, também fosse intermediário ao comportamento desses dois outros tipos. Um exemplo de cada um dos tipos de embarcação pode ser visto na figura 2.1.



(a) Monocasco

(b) Trimarã

(c) Catamarã

Figura 2.1: Exemplos das embarcações.

Uma das principais características do conceito de trimarã adotado é que os cascos são bastante esbeltos/elongados. O casco central concentra a maior parcela do deslocamento, enquanto os cascos laterais garantem que a embarcação seja estável. Sendo assim, pode-se exceder os limites convencionais da razão de comprimento (L) por boca (B), o que, até certo ponto, provoca uma redução do coeficiente de resistência de ondas C_w maior que o aumento do coeficiente de resistência friccional C_f - ligado ao aumento da área molhada S_W . Portanto, cascos mais esbeltos tendem a ter uma resistência reduzida em relação aos menos esbeltos, para altas velocidades.

No entanto, a adição dos cascos laterais aumenta a superfície molhada total e a geração

de ondas, fazendo com que seja importante estudar tanto a razão entre o deslocamento dos cascos laterais e o deslocamento total, para que o aumento de área molhada não ultrapasse a redução obtida com o uso de cascos mais esbeltos, e o posicionamento dos cascos laterais em relação ao casco central, no plano de linha d'água, para obter-se uma interferência destrutiva das ondas geradas pelo casco central nos cascos laterais, minimizando o coeficiente de resistência de ondas total da embarcação (BRIZZOLARA; BRUZZONE, 2008).

Ainda, a embarcação conta tanto com boca quanto com área de convés muito maiores que uma embarcação monocasco. Em relação ao catamarã, a área é semelhante, mas o vão livre entre os cascos é muito menor no trimarã, necessitando assim de uma estrutura cruzada de sustentação muito menos robusta e, portanto, mais leve.

2.1 ESBELTEZ DO CASCO CENTRAL

Uma forma de medir a esbeltez do casco central é através da razão de L/B. Embarcações monocasco dificilmente ultrapassam L/B = 8, enquanto as multicascos podem atingir valores bem mais altos, pois a boca mínima deixa de estar limitada pela estabilidade e passa a ser limitada apenas pelo arranjo interno. Outra forma de se medir a esbeltez é pelo adimensional de comprimento por volume deslocado elevado a um terço, ou seja, a razão entre o comprimento do casco pelo comprimento da aresta do cubo de mesmo volume.

O caso estudado por Zhang (1997), mostra que com o aumento da razão de L/B, há inicialmente uma redução do peso leve (ver figura 2.2(b)), pois a redução de potência provoca uma diminuição do peso dos motores mais significativa que o aumento do peso estrutural, para valores de L/B até 15 (ver figura 2.2(a)). Em seguida, o peso leve aumenta consideravelmente, pois atinge-se um limite de redução da resistência.


Figura 2.2: Variações de potência efetiva e peso leve em função de L/B (ZHANG, 1997).

2.2 RAZÃO DE COMPRIMENTO E DE DESLOCAMENTO DO CASCO LATERAL

O comprimento do casco lateral deve estar na faixa de 30 a 40% do comprimento do casco central, pois valores inferiores a 30% tendem a não ser suficientes para garantir a estabilidade da embarcação e valores superiores a 40% tendem a elevar a resistência total da embarcação, tanto por aumentar a área molhada como o coeficiente de resistência de ondas global.

Pelos mesmos motivos, o deslocamento de cada casco lateral (Δ_{SH}) deve estar na faixa de 2 a 5% do deslocamento total da embarcação. A figura 2.3 mostra a variação da potência efetiva, do peso leve e da altura metacêntrica inicial em função da variação da razão de deslocamento do casco lateral.



Side hull displacement ratio

0.1

0.15

0.05

0

(c) GM em função de $\Delta_{\rm SH}/\Delta$

Figura 2.3: Variações de potência efetiva, peso leve e GM em função do deslocamento percentual de um casco lateral (ZHANG, 1997).

Como pode ser visto, valores de Δ_{SH}/Δ inferiores a 2% deixam a embarcação sem estabilidade inicial e valores superiores a 5% elevam a potência efetiva em torno de 20%.

2.3 ÁREA MOLHADA

A área molhada influencia diretamente a resistência friccional da embarcação, sendo assim, é importante saber como se comporta em função dos parâmetros dos cascos. A figura 2.4 mostra a variação da área molhada em função da razão de boca por calado, para dados coeficiente de bloco e razão L/B fixos, no caso, 0,5 e 15, respectivamente.



Figura 2.4: Variação da área molhada em função da razão B/T (ZHANG, 1997).

Em relação a outras embarcações, tem-se, como pode ser visto na figura 2.5, que trimarãs apresentam uma área molhada menor que a de embarcações do tipo SWATH e maior que monocascos, como seria esperado, dadas as formas de cada tipo de embarcação.



Figura 2.5: Comparação da área molhada de trimarans com monocascos e SWATH's, em função do deslocamento (ZHANG, 1997).

2.4 VÃO LIVRE MÍNIMO

O vão livre mínimo entre a superfície da água e a parte inferior da estrutura cruzada será determinado pelos critérios de comportamento no mar, e.g. ocorrência de impacto de onda na estrutura cruzada ou embarque de água no convés, nas condições em que a embarcação irá operar, i.e. estado de mar e velocidade de cruzeiro.

A figura 2.6 mostra a ocorrência de impactos de ondas na estrutura cruzada por hora,

para mares com altura significativa de onda de 1,9 e 2,5 metros, em função da altura do vão livre.



Figura 2.6: Efeito da variação do vão livre (ZHANG, 1997).

2.5 ESTABILIDADE E CURVA DE BRAÇO DE ENDIREITAMENTO

A estabilidade inicial, medida através da altura metacêntrica GM_0 , pode ser ajustada para níveis ligeiramente superiores aos de monocascos, e significativamente menores que os de catamarãs. No exemplo estudado por Zhang (1997), o GM_0 do trimarã foi ajustado para 2,5 *m*, enquanto uma faixa razoável para monocascos fica em torno de 1 *a* 1,5 *m* e, para catamarãs pelo menos uma ordem de grandeza acima (geralmente maiores que 10 *m*). Os critérios de estabilidade podem ser encontrados no anexo 7 do código de segurança para embarcações rápidas (IMO, 2008).

Em relação a estabilidade intacta, para um casco com costados subindo paralelamente a partir da linha d'água, como mostrado na figura 2.7(a), tem-se uma diminuição do braço de endireitamento quando um dos cascos laterais sai da água (ver figura 2.7(c), e este só volta a aumentar quando o convés começa a submergir, criando uma situação desfavorável para navegação da embarcação.

Uma forma de corrigir o problema é a introdução de saia na parte interior dos cascos laterais, como mostra a figura 2.7(b). O ângulo de inclinação pode ser ajustado para que a curva de braço de endireitamento se assemelhe a curva de um monocasco. A figura 2.7(d) mostra a curva e braço de endireitamento após o ajuste do ângulo da saia.



Figura 2.7: Comparação das curvas de braço de endireitamento com e sem saia (ZHANG, 1997).

2.6 PROJETO ESTRUTURAL

A estrutura do trimarã é composta pelas estruturas dos cascos central e laterais e da estrutura cruzada (ZHANG, 1997). Os carregamentos podem ser calculados segundo a norma Lloyd's Register (2006), sendo que, de modo análogo ao projeto de monocascos, os carregamentos primários são responsáveis pelo dimensionamento da estrutura global (i.e. viga navio, estrutura cruzada, cavernas, etc.), e os carregamentos secundários e terciários pelo dimensionamento da estrutura local (i.e. painéis do casco, conexões entre cascos e estrutura cruzada, etc.).

Em embarcações multicascos, o estudo da resistência à fadiga é extremamente importante, pois devido a sua configuração, pontos como as conexões entre a estrutura cruzada e os cascos ficam sujeitos a cargas cíclicas de grande magnitude, o que não acontece com monocascos. Segundo Zhen et al. (2011), há dois métodos principais descritos em normas, o método simplificado e o método espectral. O primeiro depende do julgamento do projetista e o segundo permite o cálculo direto, baseado na teoria de dano cumulativo, com a pressão hidrodinâmica no casco e os movimentos da embarcação calculados pela teoria de escoamento potencial tridimensional linearizada, e os pontos de concentração de tensão calculados através da análise da estrutura por elementos finitos.

A figura 2.8 mostra um exemplo de seção mestra do trimarã utilizado em um estudo da University College London (ANDREWS, 2003).



Figura 2.8: Exemplo de seção mestra de um trimarã (ANDREWS, 2003).

2.7 COMPORTAMENTO NO MAR

De acordo com Zhang (1997), o método de faixas (SALVESEN et al., 1970) não é adequado para o cálculo dos movimentos de uma embarcação do tipo trimarã nos seis graus de liberdade, embora o seja para catamarãs e *SWATH*'s simétricos, pois o método assume que seja possível converter o casco tridimensional em seções bidimensionais hidrodinamicamente independentes. Os cascos do trimarã possuem comprimentos muito diferentes, de modo que a descontinuidade das seções ao longo do comprimento, além de fazerem com que a modelagem numérica seja mais complicada, pode tornar a interação hidrodinâmica entre seções relevantes. Sendo assim, deve-se usar a teoria de escoamento potencial tridimensional linearizada (WU; TAYLOR, 1987; WU; TAYLOR, 1989).

Dessa forma, é possível prever com acurácia os movimentos da embarcação em ondas com velocidade de avanço, para ambos movimentos: simétricos e assimétricos. Deve-se, no entanto, levar em consideração o amortecimento viscoso, que pode ser obtido a partir de ensaios de decaimento, para prever corretamente os movimentos de balanço.

Os parâmetros com influência predominante no comportamento em ondas de um trimarã são a razão de deslocamento do casco lateral, as áres de linha d'água de cada casco e o seu posicionamento relativo.

O comportamento no mar de um trimarã é, em geral, melhor que o de um monocasco de deslocamento equivalente, sendo que a rigidez do movimento em balanço experimentada por catamarãs pode ser evitada. As figuras de 2.9(a) a 2.9(d) mostram uma comparação da redução de velocidade necessária para que um trimarã e um monocasco de mesmo deslocamento atendam aos critérios da tabela 2.1, em função do estado de mar.

Tabela 2.1: Critérios para avaliação do comportamento em ondas

Impacto na proa	< 20 eventos por hora
Embarque de água no convés	<~20 eventos por hora
Aceleração vertical no passadiço	$< 2,0 m/s^2$
Aceleração vertical no heliponto	$< 1,0 m/s^2$



Figura 2.9: Redução de velocidade em função do estado de mar (ZHANG, 1997).

Nota-se que o trimarã está sujeito a uma redução menor de velocidade para manter as mesmas condições de navegação que o monocasco, sendo tal diferença mais acentuada no heliponto devido a diferença de posicionamento deste em cada embarcação. Evidenciase mais uma vez a vantagem relativa ao espaço de convés e flexibilidade de arranjo, pois no trimarã, o heliponto é posicionado próximo ao centro da embarcação, sujeito a menores acelerações, enquanto no monocasco, é posicionado mais próximo a proa, devido às limitações de arranjo do convés.

2.8 MANOBRABILIDADE

A manobrabilidade pode ser avaliada por um método que combina teoria e experimentos (JACOBS, 1964), no qual o trimarã é modelado por um monocasco com aletas representando os cascos laterais, desprezando possíveis interações entre os cascos. Como pode ser visto na figura 2.10, o trimarã precisa de uma área de leme cerca de 1,6 vezes maior que a de um monocasco de mesmo deslocamento para atingir o mesmo diâmetro tático, e da ordem de 1,4 vezes maior para atingir a mesma razão de diâmetro tático por comprimento.



Figura 2.10: Comparação do diâmetro tático em função da área de leme, para um ângulo de leme fixo (ZHANG, 1997).

A instalação de propulsores nos cascos laterais garante excelente capacidade de manobra em baixa velocidade, mas se mostra ineficiente para manobra em alta velocidade, como pode ser visto na figura 2.11.



Figura 2.11: Raio de giro com propulsores em sentidos opostos (ZHANG, 1997).

Das variáveis que descrevem a embarcação, o calado e a posição longitudinal dos cascos laterais são as que mais influenciam na manobrabilidade do trimarã.

3 PROPOSTA DE MODELAGEM DO PROBLEMA DE PROJETO

3.1 INTRODUÇÃO

O problema de projeto de uma embarcação trimarã de alta velocidade para o transporte de passeiros é abordado com base em modelos de síntese e otimização, tendo sido construídos dois modelos em paralelo, um em Matlab[®]e outro no FriendShip[®], para que os resultados possam ser comparados. O objetivo deste modelo é encontrar as dimensões principais da embarcação que atenda às funções de mérito estabelecidas e respeite todas as restrições.

O modelo de síntese, ilustrado na figura 3.1, foi construído nos moldes dos modelos estudados por Lyon e Mistree (1985), Parsons e Scott (2004), Xuebin (2009), Andrade e Simões (2010). A abordagem do problema é análoga à proposta por Cerqueira e Ribeiro (2011).



Figura 3.1: Fluxograma do modelo de síntese.

Cada bloco representa uma etapa do dimensionamento da embarcação, sendo que para sua resolução, pode-se usar diferentes métodos ou modelos, de acordo com o objetivo do modelo de síntese.

3.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO

Inicialmente, uma forma de descrever o casco de uma embarcação trimarã é usando as dimensões principais (comprimento, boca e calado) e o coeficiente de bloco de cada casco e as distâncias que definem o posicionamento relativo entre os cascos no plano da linha d'água. Porém, de acordo com o que foi discutido no capítulo 2, a resistência ao avanço é influenciada principalmente pela razão de L/B, pelo posicionamento relativo entre os cascos e pela área molhada, que, por sua vez, é influenciada pela razão de B/T. A estabilidade é afetada principalmente pelas razões de comprimento e de deslocamento do casco lateral e, para o comportamento em ondas, predominam os parâmetros de posicionamento dos cascos laterais, a razão de deslocamento do casco lateral e a área de linha d'água.

Dessa forma, conforme proposto por Andrade (2001), serão utilizados para descrever a solução os coeficientes e razões mostrados a seguir:

- $L_{ch} \rightarrow \text{Comprimento do casco central};$
- $(L/B)_{ch} \rightarrow$ Razão de comprimento por boca do casco central;
- $(B/T)_{ch} \rightarrow$ Razão de boca por calado do casco central;
- $(C_b)_{ch} \rightarrow$ Coeficiente de bloco do casco central;
- $(L/B)_{sh} \rightarrow$ Razão de comprimento por boca dos cascos laterais;
- $(C_b)_{sh} \rightarrow$ Coeficiente de bloco dos cascos laterais;
- $SP \rightarrow$ Coeficiente de separação lateral dos cascos;
- $ST \rightarrow Coeficiente de separação longitudinal dos cascos;$
- $\gamma \to {\rm Razão}$ entre o deslocamento de um casco lateral e o deslocamento total da embarcação;
- $\lambda \rightarrow \text{Razão entre o comprimento do casco lateral e o comprimento do casco central;}$

O coeficiente de separação lateral é a distância interna entre os cascos lateral e central, adimensionalizada pela meia boca do casco central (equação 3.1), de modo que para um valor de SP igual a zero, os cascos se tocam.

$$SP = \frac{2 \cdot Y_0 - B_{ch} - B_{sh}}{B_{ch}} \tag{3.1}$$

Enquanto o coeficiente de separação longitudinal é a distância entre os espelhos de popa dos cascos lateral e central, adimensionalizada pela diferença de comprimento entre os cascos lateral e central (equação 3.2, de modo que para ST igual a zero, tem-se os espelhos de popa alinhados e para ST igual a um, tem-se as proas alinhadas. Valores fora dessa faixa colocam os cascos laterais excedendo os limites longitudinais definidos pelo casco central.

$$ST = \frac{X_0}{L_{ch} - L_{sh}} \tag{3.2}$$

A razão representada pela letra grega γ é o volume deslocado por um casco lateral adimensionalizado pelo volume deslocado total, e λ é o comprimento do casco lateral adimensionalizado pelo comprimento do casco central.

$$\gamma = \Delta_{SH} / \Delta \tag{3.3}$$

$$\lambda = L_{sh}/L_{ch} \tag{3.4}$$

A figura 3.2 mostra a representação a vista de topo da linha d'água do trimarã.



Figura 3.2: Modelo paramétrico do trimarã (corte da linha d'água).

Esta proposição de variáveis de projeto é semelhante a do modelo desenvolvido por Hefazi et al. (2005), no qual se baseou o cálculo do peso em aço dos cascos.

3.3 MODELAGEM EM MATLAB®

3.3.1 Geração do casco

O casco é representado com uma descrição do NURBS¹, sendo as balizas do casco central obtidas a partir da serie 64 (YEH, 1965), desenvolvida para embarcações esbeltas de alta velocidade, e as balizas dos cascos laterais obtidas a partir do casco *Wigley* (JOURNEE, 2003).

 $^{^1}Non$ -Uniform Rational Basis Spline

A série 64 foi desenvolvida para cascos mais esbeltos, navegando em regime de transição. Dessa forma, foi escolhida para representar o casco central da embarcação com o propósito garantir, além da boa aproximação em relação aos modelos de cálculo dos diferentes atributos, uma boa aproximação das dimensões finais do casco, de modo a permitir a verificação automática do arranjo preliminar da praça de máquinas. Como não está prevista a instalação de equipamentos nos cascos laterais, estes podem ter uma forma mais simples, motivo pelo qual se escolheu a representação por cascos do tipo *Wigley* parabólico.

As limitações da série 64 são mostradas na tabela 3.1, mas, como o cálculo de resistência ao avanço não fará uso da série, foi escolhido um casco para cada valor de C_b da série de modo que fosse possível realizar a interpolação entre eles para se obter o coeficiente de bloco desejado. Obtém-se as dimensões principais por escalonamento unidimensional em cada direção.

Tabela 3.1: Intervalos de validade da série 64.

Parâmetro	Intervalo
$\Delta/L^3 \cdot 10^5$	50-200
B/T	2-4
C_b	$0,\!35\text{-}0,\!55$

O casco Wigley é obtido a partir da sua representação matemática (3.5), que dá o valor da meia boca y em função da baliza x e da elevação z, no sistema de coordenadas local, cuja origem está a meia nau, no plano de simetria transversal e na linha d'água.

$$y = \frac{B}{2} \cdot \left[1 - \left(2 \cdot \frac{x}{L}\right)^2\right] \cdot \left[1 - \left(2 \cdot \frac{z}{D}\right)^2\right] \cdot \left[1 + a_2\left(2 \cdot \frac{x}{L}\right)^2 + a_4\left(2 \cdot \frac{x}{L}\right)^4\right]$$
(3.5)

Onde:

- $a_2 = t/2 1 a_4;$
- $a_4 = 105/8 \cdot (t/15 C_P + 8/15);$
- $t = L/B \cdot \tan \alpha$;
- α é o meio ângulo de entrada da pro
a no plano de linha d'água.
- L, B, eD são as dimensões principais do casco, respectivamente, comprimento, boca e pontal.

Um exemplo de casco gerado em NURBS é ilustrado na figura 3.3.



Figura 3.3: Vistas do casco gerado em NURBS.

3.3.2 Resistência ao avanço

O cálculo da resistência ao avanço em águas calmas é realizado dividindo-a em parcelas (HAFEZ; EL-KOT, 2011), sendo consideradas apenas as parcelas de resistência viscosa e de geração de ondas. As parcelas relativas a resistência do ar, dos apêndices e da geração de vórtices são desprezadas, assim como a variação da superfície molhada, devido aos movimentos de afundamento e arfagem.

A resistência viscosa é calculada a partir da resistência de arrasto de uma placa plana equivalente multiplicada por um coeficiente de forma da embarcação, para levar em conta os efeitos de descolamento da camada limite, de acordo com a ITTC de 1957, como mostram as equações (3.6) e (3.7)

$$R_{\nu} = 0, 5 \cdot C_{\nu} \cdot \rho \cdot S_{w} \cdot V_{s}^{2}$$

$$(3.6)$$

$$C_{\nu} = (1+k) \cdot C_f \tag{3.7}$$

Onde:

- S_w é a área molhada da embarcação;
- V_s é a velocidade de avanço;
- ρ é a densidade da água;
- k é o fator de forma, estimado para cada casco segundo Armstrong (2003); e
- C_f é o coeficiente de placa plana, dado por $C_f = \frac{0.075}{(log(Rn)-2)^2}$

A resistência viscosa total do trimarã é calculada pela soma simples das resistências de cada casco individualmente, pois os cascos são bastante esbeltos e há pouco descolamento

das camadas limite, de modo que uma possível interação viscosa entre os cascos pode ser desprezada.

$$R_{\nu}^{total} = R_{\nu}^{ch} + 2 \cdot R_{\nu}^{sh} \tag{3.8}$$

Já para a parcela de ondas, há uma significativa interação entre os padrões de onda gerados por cada casco, de modo que esta parcela da resistência deve ser calculada para a embarcação como um todo.

Para isso, é feita a integral do padrão de ondas em um plano ao longe, com as ondas irradiadas pelo casco calculadas pela teoria de navio fino, inicialmente proposta por Michell (1898), e aplicável a embarcações com elevadas razões de L/B. Diversos autores já verificaram a aplicabilidade dessa teoria para o estudo de multicascos, sendo utilizado o método proposto por Insel e Molland (1990), também apresentado em Couser et al. (1998), Molland et al. (1994), Insel e Doctors (1995). O apêndice A traz a validação do modelo implementado para monocascos, catamarãs e trimarãs, além de um estudo sobre as zonas de interferência construtiva e destrutiva para o coeficiente de resitência de ondas da embarcação como um todo, em função do número de Froude.

Tal método permite a avaliação dos efeitos de profundidade finita e paredes laterais, e assume que o escoamento é potencial, o fluido ideal (invíscido, isotrópico e homogêneo) e que as ondas irradiadas têm baixa declividade. Desse modo o cálculo inicial da resistência ao avanço em águas calmas fica:

$$R_t = R_v + R_w \tag{3.9}$$

A este valor, adiciona-se uma estimativa preliminar da resistência adicional em ondas, R_{aw} , calculada por uma regressão que leva em conta a área frontal projetada, a velocidade da embarcação, a altura significativa e o período da onda incidente (MATULJA et al., 2011). Para este cálculo foi adotado o valor de 2 m para a altura significativa de onda e de 12 s para o período.

3.3.3 Integração casco-propulsor

A integração casco-propulsor foi realizada considerando o uso de hidrojatos instalados no casco central. A maneira mais direta de se determinar o empuxo e a potência necessários é a partir de diagramas fornecidos pelos fabricantes (FALTINSEN, 2005), cujo procedimento de utilização é bastante simples e direto. Dadas a curva de resistência ao avanço da embarcação e a velocidade de projeto, encontra-se os possíveis pontos de operação (ver figura 3.4(a)), levando em consideração as 3 zonas de operação com seus respectivos tem-

pos limite de operação. A rotação do eixo é obtida a partir do diagrama da figura 3.4(b), e com isso pode-se determinar o arranjo da praça de máquinas.



Figura 3.4: Diagramas de integração casco-hidrojato, adaptado de Faltinsen (2005).

No entanto, os valores das ordenadas nos diagramas apresentados são usualmente omitidos, de modo que deve-se fazer uso de um procedimento alternativo de cálculo, baseado na geometria e nos fundamentos de funcionamento de um sistema hidrojato, a partir da avaliação da quantidade de movimento produzida pela bomba e das perdas de carga sofridas ao longo do sistema, conforme detalhado em Ruggeri et al. (2012a). Tal procedimento foi inicialmente proposto por Allison (1993) e posteriormente complementado na ITTC de 2005 e por Faltinsen (2005), entre outros.

3.3.4 Arranjo geral

Com o objetivo de realizar uma análise preliminar que permita a avaliação inicial da disposição dos principais espaços e sistemas da embarcação, do seu centro de massa e dos momentos de inércia de massa nos três graus de liberdade angulares, o arranjo geral do trimarã foi baseado no arranjo de embarcações semelhantes, a exemplo do *Dolphin Ulsan* (ver figura 3.5).



Figura 3.5: Exemplo de arranjo Dolphin Ulsan (One2three Naval Architects, 2013).

São considerados para esta primeira avaliação do arranjo o convés de passageiros, passadiço, motores principais, hidrojatos e tanques de combustível. Sendo os motores e os tanques de combustível alocados no casco central, o convés de passageiros no primeiro convés a ocupar toda a extensão lateral da embarcação, da popa até 70% do comprimento do casco central, e o passadiço no segundo convés, com 30% do comprimento do primeiro convés, da proa para popa, conforme ilustrado na figura 3.6.



Figura 3.6: Arranjo dos sistemas e espaços considerados.

A escolha preliminar dos hidrojatos e motores é feita a partir dos catálogos dos fabricantes, HamiltonJet e MJP para os hidrojatos e MTU, Wärtsilä e Rolls-Royce para os motores. O arranjo considera a instalação de 2, 3 ou 4 unidades, tanto para motores quanto para hidrojatos, sendo que os hidrojatos são escolhidos em função de sua eficiência e os motores em função do peso. A figura 3.7 mostra os possíveis arranjos de motores considerados, e podem ser vistos na figura 3.8, os possíveis arranjos dos hidrojatos.



Figura 3.7: Configurações de motores avaliadas.



Figura 3.8: Configurações de hidrojatos avaliadas.

As distâncias mínimas entre motores, hidrojatos e o casco da embarcação foram calculadas também com base na embarcação semelhante *Dolphin Ulsan*, cujo arranjo da praça de

máquinas é mostrado na figura 3.9.



Figura 3.9: Vista superior do casco central: Arranjo dos motores da embarcação Dolphin Ulsan.

3.3.5 Pesos & Centros

Uma vez determinado o arranjo geral da embarcação, é feita a estimativa de peso de cada sistema considerado na modelagem preliminar do trimarã, determinado de acordo com o modelo paramétrico proposto por (WATSON; GILFILLAN, 1977), segundo a análise realizada por (PARSONS, 2003), no qual o deslocamento total da embarcação é dividido (equação (3.10)) entre peso leve e *deadweight* total, que corresponde ao pesos dos passageiros e demais carregamentos variáveis.

$$\Delta = W_{LS} + DWT_T \tag{3.10}$$

O peso leve corresponde a todo o peso do navio pronto para ir ao mar, sem nenhuma carga ou carregamentos, e pode ser subdividido (equação (3.11)) em peso estrutural (soma do peso dos cascos, da superestrutura e da estrutura cruzada), do maquinário de propulsão e de acabamento, além de uma margem de projeto aplicada para compensar as aproximações feitas nos modelos de cálculo do peso. Já o *deadweight* (equação (3.12)) é a soma dos pesos dos passageiros, das bagagens, do combustível e dos itens de serviço, que inclui o peso da tripulação e seus pertences, provisões, água potável e óleo lubrificante.

$$W_{LS} = W_S + W_M + W_A + W_{margem} \tag{3.11}$$

$$DWT_T = W_{pas} + W_{bag} + W_{comb} + W_{serv}$$

$$(3.12)$$

O cálculo de pesos e centros é detalhado no Apêndice B.

3.3.6 Estabilidade

Inicialmente, faz-se apenas uma verificação da estabilidade inicial, baseada no valor de GM_0 (equação (3.13)), pois o tempo necessário para calcular a curva de braço de endireitamento tornava demasiado lento o processo de otimização, sem contribuir significativamente para a obtenção dos resultados finais. Os parâmetros do casco escolhidos como variáveis de projeto pouco influenciam o comportamento da curva, dado que este depende majoritariamente das formas do casco acima da linha d'água, cujo estudo não faz parte do escopo deste trabalho.

$$GM_0 = KB + BM - KG \tag{3.13}$$

Onde:

- KB é a altura do centro de flutuação, obtida a partir da superfície do casco gerado;
- BM é o raio metacêntrico, aproximado pela equação (3.14); e
- KG é a altura do centro de massa, obtida em função do arranjo preliminar dos espaços e sistemas.

$$BM = I_{wl} / \nabla \tag{3.14}$$

Sendo que o momento transversal de inércia de área do plano de linha d'água pode ser estimado por:

$$I_{wl} = C_{wl}^{ch} \cdot \frac{L_{ch} \cdot B_{ch}^3}{12} + 2 \cdot C_{wl}^{sh} \cdot \left(\frac{L_{sh} \cdot B_{sh}^3}{12} + L_{sh} \cdot B_{sh} \cdot Y_0^2\right)$$
(3.15)

Sendo os coeficientes de área de linha d'água do casco central e lateral iguais a, respectivamente, 18/25 e 16/25.

3.3.7 Comportamento em ondas e avaliação do conforto a bordo

O comportamento em ondas é avaliado pelo estudo do movimento (amplitudes de deslocamentos, velocidades e acelerações) nos seis graus de liberdade: avanço, desvio, afundamento, balanço, arfagem e guinada, mostrados na figura 3.10. Dependendo da operação que se deseja realizar, pode-se ter um ou outro grau de liberdade mais importante.



Figura 3.10: Graus de liberdade de uma embarcação.

Inicialmente, os movimentos serão avaliados com o programa $WAMIT^{\textcircled{B}}$, com a velocidade de avanço considerada no cálculo, de forma simplificada, pela correção da frequência de encontro (BECK et al., 1989). Tal formulação apresenta uma singularidade quando a velocidade da embarcação se aproxima da velocidade de grupo das ondas, cujo tratamento pode ser evitado ao se trabalhar diretamente com a integral do cálculo dos momentos espectrais corrigidos. Entretanto, tal integral é capaz apenas de avaliar os movimentos para a embarcação como um todo, e não permite a separação de suas componentes individuais. Isto impede a utilização de critérios que utilizem porções do espectro, de modo que deve-se adotar critérios definidos em função de valores significativos ou máximos de deslocamento, velocidade, aceleração, etc.

Nessa abordagem, a frequência de encontro leva em consideração o efeito Doppler das ondas através da expressão (3.16).

$$\boldsymbol{\omega}_{e} = \left| \boldsymbol{\omega} - \left(\frac{\boldsymbol{\omega}^{2} U_{0}}{g} \right) \cos \boldsymbol{\mu}_{0} \right|$$
(3.16)

Onde ω_e é a frequência de encontro, ω a frequências das ondas em relação a um referencial inercial fixo, U_0 é a velocidade da embarcação, g a aceleração da gravidade e μ_0 o ângulo relativo entre as ondas e a direção de avanço da embarcação.

Através desse procedimento, o espectro das ondas do mar corrigido pela frequência de encontro pode ser obtido pela expressão (3.17), devendo-se ressaltar que o tratamento do espectro depende essencialmente do sinal da parcela $\cos(\mu_0)$. Se a embarcação avança em mar de través (*beam seas*), então o espectro considerando a frequência de encontro se reduz ao próprio espectro de mar, não sendo necessário nenhum tratamento especial.

$$S_{\zeta}(\omega_e, \mu_o, U_0) = \frac{S_{\zeta}}{|1 - (2\omega U_0/g) \cos \mu_0|}$$
(3.17)

Na situação na qual a embarcação avança contra as ondas (*head seas* ou *bow seas*) a frequência de encontro é unicamente determinada, transformando o espectro de resposta do casco para um dado grau de liberdade na equação (3.18).

$$S_j^H(\boldsymbol{\omega}_e) = |\bar{\boldsymbol{\eta}}_j(\boldsymbol{\omega}_e, \boldsymbol{\mu}_0, \boldsymbol{U}_0)|^2 S_{\boldsymbol{\zeta}}(\boldsymbol{\omega}_e, \boldsymbol{\mu}_0, \boldsymbol{U}_0)$$
(3.18)

Onde $S_j^H(\omega_e)$ é o espectro de resposta no grau de liberdade j para a frequência de encontro, considerando o RAO também corrigido no grau de liberdade j $(|\bar{\eta}_j(\omega_e, \mu_0, U_0)|)$, sendo que o sobrescrito H é utilizado para lembrar que essa expressão somente é válida para incidências de proa até través.

A análise das demais incidências (following seas e quartering seas) é mais complexa, já que a variação da frequência das ondas faz com que a frequência de encontro inicialmente cresça, encontre um ponto máximo de inflexão e depois descresça até se anular, voltando a crescer indefinidamente, conforme ilustrado na Figura 3.11, em que V_c é a celeridade das ondas. Essa figura já permite verificar um dos grandes problemas em avaliar o espectro do mar de encontro, já que para um dado valor de frequência de encontro, a frequência de onda correspondente pode tanto ser única como possuir três valores distintos, neste caso bastante difícil separá-las sem que alguma informação adicional (velocidade da embarcação e ângulo relativo) seja fornecida, já que a embarcação pode tanto estar "fugindo" das ondas, como as ondas podem estar ultrapassando a embarcação.



Figura 3.11: Variação da frequência de encontro com a frequência das ondas do mar para mares de popa (BECK et al., 1989).

Os espectros de mar corrigidos obtidos para essas incidências de mar podem ser vistos na Figura 3.12, na qual se pode observar uma singularidade quando a velocidade da embarcação relativa as ondas se aproxima da velocidade de grupo.



Figura 3.12: Espectros de encontro calculados, retirado de Beck et al. (1989).

O tratamento dessa singularidade seria bastante complexo de ser realizado, principalmente

quando se pretende avaliar diversas embarcações de forma sistemática, já que pequenos erros numéricos no passo de integração do espectro produziriam grandes variações no valor deste e, consequentemente, grandes variações na resposta significativa de movimento, o que poderia induzir conclusões errôneas na comparação entre embarcações.

Uma forma de evitar o tratamento dessa singularidade é trabalhar diretamente com a expressão (3.19) para cálculo dos momentos espectrais e, consequentemente, das respostas que a embarcação apresentará.

$$m_n = \int_0^\infty |\boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega}^2 U_0/g) \cos \mu_0|^n |\bar{\boldsymbol{\eta}}_j(\boldsymbol{\omega}, \mu_0, U_0)|^2 S_{\zeta}(\boldsymbol{\omega}) d\boldsymbol{\omega}$$
(3.19)

Entretanto, embora essa integral seja suficiente para avaliar os movimentos da embarcação como um todo, as componentes individuais não podem ser adotadas para avaliação do conforto a bordo, já que a sensação de uma pessoa dentro da embarcação seria aquela devida a frequência de encontro e não àquela mostrada na expressão (3.19). Esse fato é bastante importante, pois devido a essa simplificação, os critérios de conforto que trabalham com porções do espectro não podem ser adotados, somente aqueles que dizem respeito a valores significativos ou máximos de deslocamento, aceleração, etc.

Como grande parte dos critérios de conforto dizem respeito a acelerações e deslocamentos em pontos específicos da embarcação, a transferência entre os pólos deve ser realizada na avaliação dos momentos espectrais pela expressão (3.19), utilizando a equação (3.20) para avaliação do RAO de um ponto genérico P (x_p, y_p, z_p) , o qual pode pertencer ao convés de passageiros, por exemplo.

$$\{RAO_P\} = \left\{\begin{array}{c} x_G \\ y_G \\ z_G \end{array}\right\} + \left[\begin{array}{cc} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{array}\right] \left\{\begin{array}{c} x_p - x_G \\ y_p - y_G \\ z_p - z_G \end{array}\right\}$$
(3.20)

Onde:

- (x_G, y_G, z_G) são as coordenadas do centro de gravidade; e
- α , β e γ são, respectivamente, as rotações em balanço, arfagem e guinada.

3.3.7.1 Índices de conforto e disponibilidade

A disponibilidade da embarcação é calculada em função das possíveis combinações de mar (T_P, H_S) e incidências, verificando para cada uma se a embarcação é viável ou não. Para definir se a embarcação será viável, são analisados os critérios de conforto em uma matriz

de pontos cobrindo o convés de passageiros, e esta deve apresentar um número mínimo de pontos nos quais os critérios são atendidos para ser possível alocar todos os passageiros.

$$\frac{n}{N} \ge \frac{A_{pas}^{min}}{A_{conv\acute{e}s}} \tag{3.21}$$

Onde:

- *n* é o número de pontos que atendem aos critérios de conforto;
- N é o número total de pontos distribuídos no convés de passageiros;
- A_{pas}^{min} é a área mínima necessária para acomodar todos os passageiros e;
- $A_{convés}$ é a área total do convés de passageiros.

A figura 3.13 mostra a disponibilidade em função da incidência e da altura significativa de onda, para um dado período de pico.



Figura 3.13: Exemplo de gráfico polar gerado pela análise de comportamento no mar para avaliação de disponibilidade.

A área colorida representa as condições de mar existentes, às quais a embarcação estará submetida quando em operação. A região verde representa as condições nas quais a embarcação é capaz de atender os critérios de conforto, enquanto a região vermelha representa as condições em que isso não ocorre.

Para obter-se o valor da disponibilidade da embarcação para aquele T_P , faz-se o cruzamento dos pontos (que representam um par $[H_S; incidência]$) com a probabilidade de ocorrência de cada par para este T_P . A disponibilidade total é então obtida pela ponderação da disponibilidade calculada para cada T_P pela probabilidade de ocorrência de mares com aquele período de pico. No caso usado como exemplo, tem-se que os mares da área verde representam 88,3% dos mares registrados com período de pico de 9,5 s, que por sua vez representam 8,3% do total de mares registrados.

São analisados três critérios que podem ser usados para se calcularem os índices de de conforto e disponibilidade de cada embarcação: Nordforsk, ABS COMF e ABS COMF+.

Nordforsk

Para embarcações não mercantes, a Nordforsk considera principalmente quatro requisitos fundamentais para determinar sua disponibilidade, para uma determinada condição ambiental: ângulo de balanço, acelerações verticais máximas em pontos específicos do casco, probabilidade crítica de impacto no casco (*slamming*) e probabilidade crítica de embarque d'água no convés (*deck wetness*). Os valores adotados para esse requisitos podem ser vistos na Tabela 3.2

Tabela 3.2: Critérios adotados pela NORDFORSK (19	1987) para avaliação	de movimento.
---	------	------------------	---------------

Critério	Valor
Aceleração vertical RMS	$0,275 \cdot g$
Ângulo de balanço RMS	4^o
Probabilidade crítica de impacto na proa (slamming)	$0,\!03$
Probabilidade crítica de embarque de água no convés	$0,\!05$

COMF e COMF+ da ABS

A ABS sugere duas formas distintas de se avaliar o conforto, segundo as notações COMF e COMF+. A primeira considera os valores de aceleração ponderada sentida pelo passageiro/tripulante, e a segunda, além de ter um limite mais rigoroso para a aceleração ponderada, considera também uma dosagem limite de exposição a movimentos oscilatórios, chamada MSDV - *Motion sickness dose value*, em tradução livre. Seu cálculo é descrito na equação (3.22), em que: $a_z(t)$ é a aceleração vertical e T o tempo de exposição.

$$MSDV_z = \sqrt{\int_0^T a_z(t)^2 dt}$$
(3.22)

A aceleração ponderada pode ser obtida através da equação (3.23), em que os índices descrevem as componentes nas direções x, y e z, compondo dessa forma a aceleração média, cujo cálculo pode ser realizado diretamente através da equação (3.24), que corresponde

ao valor RMS da aceleração ponderada. O valor RMS pode ser convertido, para um registro suficientemente longo (tipicamente superior a 3h), do domínio do tempo para a frequência, provendo a expressão (3.25), que permite calcular o valor da aceleração ponderada a partir dos cálculos realizados no domínio da frequência, mais conveniente para os dados de entrada e métodos empregados neste modelo paramétrico.

$$a_w = \sqrt{a_{xw}^2 + a_{yw}^2 + a_{zw}^2} \tag{3.23}$$

$$a_{w} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} a_{w}(t)^{2} dt}$$
(3.24)

$$\lim_{T \to \infty} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w(t)^2 dt} = \sqrt{\int_0^\infty \omega_e^4 |RAO_z(\omega_e)|^2 S(\omega_e) dw}$$
(3.25)

Ressalta-se que o $MSDV_z$ possui uma relação direta com o tempo de exposição, como mostrado na equação (3.26), enquanto que a aceleração ponderada não possui essa influência.

$$MSDV_z = a_z \cdot T^{(1/2)} \tag{3.26}$$

Os valores aplicáveis pela ABS (2001) para avaliação de conforto podem ser vistos na tabela 3.3.

Notação	Faixa de frequência	Medida de aceleração	Nível máximo
COMF	$0{,}5$ - $80~\mathrm{Hz}$	a_w	$0,315 m/s^2$
COMF+	0,1 - 0,5 Hz	MSDV	$30 m/s^{1,5}$
	$0{,}5$ - $80~\mathrm{Hz}$	a_w	$0,20 m/s^2$

Tabela 3.3: Critérios da ABS COMF e ABS COMF+.

3.4 MODELAGEM NO FRIENDSHIP®

Com o objetivo verificar os resultados obtidos no Matlab[®], foi implementado um modelo análogo no programa FriendShip[®], pois este, além de apresentar uma modelagem mais detalhada da superfície do casco, dispõe de métodos de otimização diferentes daqueles do Matlab[®].

A geração do casco é feita com uma metasuperfície, e o comportamento em ondas é calculado pelo Seakeeper[®], que também estima a resistência adicional em ondas. Os demais cálculos, resistência ao avanço (viscosa, ondas e fator de forma), integração casco-

propulsor, arranjo geral e pesos e centros são feitos pelo Matlab[®].

A integração entre o FriendShip e os programas externos se dá por meio de *features*, uma ferramenta na qual se pode, através de linhas de comando, automatizar rotinas de cálculo e *scripts* capazes de interagir com tais programas.

3.4.1 Geração do casco

A metasuperfície é construída a partir da definição de uma seção do casco, dada em função de curvas longitudinais, que percorre o casco de popa a proa. Para os cascos laterais, mostrados na figura 3.14, utiliza-se apenas as curvas de linha d'água e da quilha, uma vez que a meia boca da superfície, y, é dada pela equação (3.5) para cada ponto do plano central (x, z), conforme explicado na seção 3.3.1.



Figura 3.14: Visualização do casco lateral gerado no FriendShip®.

Já a geração do casco central é feita a partir de uma *spline* com três pontos: na quilha, no bojo e na linha d'água. Ademais, são utilizadas quatro curvas auxiliares: duas para as tangentes de chegada e saída nos pontos extremos, uma para definir a área total da seção e uma para dar o peso do ponto intermediário na ponderação da *spline*, fazendo com que a curvatura do bojo seja mais ou menos suave. As curvas utilizadas podem ser vistas na figura 3.15.



Figura 3.15: Curvas utilizadas para geração do casco central no FriendShip®.

A superfície gerada pode ser visualizada na figura 3.18, na qual inclui-se um plano para fechar o casco na região do espelho de popa.



Figura 3.16: Visualização do casco central gerado no FriendShip[®].

Em seguida, são feitas imagens dessas superfícies, que serão espelhadas e deslocadas para o correto posicionamento relativo entre os cascos, para formar o casco completo, como pode ser visto na figura 3.17.



Figura 3.17: Vista isométrica da superficie do trimarã gerado no FriendShip[®].

3.4.2 Cálculos hidrostáticos

Após constituir o casco, calculam-se suas propriedades hidrostáticas, dado que o cálculo da resistência ao avanço precisa do valor da área molhada de cada casco, e a avaliação da estabilidade inicial depende dos valores do centro vertical de flutuação, da inércia de área da linha d'água e do volume deslocado pelos cascos.

Este cálculo é feito pelo módulo de hidrostática do FriendShip[®], a partir das seções do casco, mostradas na figura 3.18.



Figura 3.18: Visualização das seções do casco gerado no FriendShip®.

3.4.3 Comportamento em ondas

O comportamento em ondas é avaliado pela média da aceleração RMS calculada em diferentes pontos distribuídos pelo convés de passageiros, com o auxílio do programa Seakeeper[®], para um mar segundo o espectro da ITTC de dois parâmetros (Bretschneider), com altura significativa de onda de 2 metros e período modal de 10 segundos.

Para tanto, usa-se uma malha de painéis exportada automaticamente pelo FriendShip[®], como a mostrada na figura 3.19, e um arquivo de configurações previamente configurado para a simulação desejada. Neste arquivo são salvos as velocidades de projeto que serão avaliadas, os espectros de mar, o número de seções do casco, o modelo de aproximação a ser usado, os raios de giração, os coeficientes de amortecimento da embarcação e o tipo

de casco.



Figura 3.19: Vista isométrica da malha exportada para o Seakeeper®.

Para cada combinação de velocidade, espectro de mar e aproamento, o programa Seakeeper resolve as equações do método de faixas, considerando seções bidimensionais do casco. Para que este método possa ser usado para embarcações do tipo trimarã, cujos cascos têm comprimento diferentes, foi considerado apenas mar de proa. Isto é necessário pois mares com aproamentos desalinhados com o comprimento da embarcação fazem com que a premissa de que a interação entre seções é negligenciável seja falsa (ZHANG, 1997).

4 O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

4.1 VISÃO GERAL

Otimização é o processo de maximizar ou minimizar uma dada função objetivo satisfazendo o conjunto de restrições vigentes (BELEGUNDU; CHANDRUPATLA, 1999). Pode-se encontrar na natureza uma quantidade abundante de exemplos nos quais buscase o estado ótimo do sistema (RAO, 2009): em ligas metálicas, os átomos se arranjam na forma com menor energia para compor a estrutura cristalina do material; uma gota d'água em gravidade zero é uma esfera perfeita, que é a forma geométrica com menor área de superfície para um volume fixo; a estrutura de um favo de mel é o arranjo mais compacto que se pode ter para armazenamento; etc.

Em termos matemáticos, um problema de otimização consiste em encontrar o valor de $\bar{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ que minimiza ou maximiza a função $f = f(\bar{x})$, sujeito às restrições de igualdade $G_i(x) = 0$; $(i = 1, \ldots, m_e)$ e de desigualdade $G_i(x) \le 0$; $(i = m_e + 1, \ldots, m)$. Os valores de \bar{x} podem ainda estar sujeitos a intervalos definidos por \bar{x}_{inf} e \bar{x}_{sup} .

O problema pode ser reduzido apenas a minimização da função, pois, como mostra a figura 4.1, maximizar $f(\bar{x})$ é equivalente a minimizar $-f(\bar{x})$ e vice-versa, uma vez que o \bar{x}^* ótimo para os dois casos é o mesmo.



Figura 4.1: Comparação entre minimização de $f(\bar{x})$ e maximização de $-f(\bar{x})$, adaptado de Rao (2009).

Genericamente, pode-se definir o problema de otimização por:

$$\min f(\bar{x}) \tag{4.1}$$

Sujeito à:

$$G_i(\bar{x}) = 0; i = 1, \dots, m_e$$

 $G_i(\bar{x}) \le 0; i = m_e + 1, \dots, m$
 $\bar{x}_{inf} \le \bar{x} \le \bar{x}_{sup}$

Ainda, as operação de soma e multiplicação (ou subtração e divisão) da função objetivo com uma constante positiva, não alteram a solução ótima \bar{x} *, como pode ser visto na figura 4.2.



Figura 4.2: Solução ótima de $c \cdot f(\bar{x}) \in c + f(\bar{x})$, retirado de Rao (2009).

Isso é importante pois em problemas conceituais há ainda pouca informação sobre o projeto, de modo que os modelos descrevem, em geral, o comportamento da solução, mas com baixa acurácia sobre os valores dos atributos. Sendo assim, se o modelo captar a tendência qualitativa dos objetivos, o erro sobre os valores ótimos de \bar{x} será mínimo e, em fases posteriores do projeto, métodos mais acurados podem ser utilizados para explorar apenas a região em torno daquele ponto.

Em problemas de engenharia, os sistemas ou componentes são definidos por um conjunto de grandezas, das quais algumas são vistas como variáveis durante o processo de projeto e outras são mantidas fixas. As grandezas mantidas fixas são chamadas de parâmetros e as demais de variáveis de projeto ou de decisão. O conjunto de variáveis de projeto pode ser representado pelo vetor \bar{x} e, se for considerado um espaço cartesiano *n*-dimensional no qual cada dimensão represente uma das variáveis de projeto, tem-se o chamado espaço das variáveis de projeto ou espaço de soluções. Cada ponto neste espaço representa uma solução do problema de projeto, podendo ser uma solução viável ou inviável, de acordo com as restrições aplicáveis.

Existem diversas definições para os tipos de restrições, segundo Arora (1989), estas podem ser classificadas quanto a sua relação com as variáveis e projeto em implícitas ou explicitas, lineares ou não-lineares e de igualdade ou desigualdade. De acordo com Rao (2009), as restrições podem ainda ser classificadas quanto a sua aplicação, em restrições de comportamento ou funcionais, quando representam limitações de funcionamento, e restrições geométricas, quando representam limitações de transporte, fabricação, disponibilidade, etc.

Para que seja possível realizar um processo de otimização, falta ainda definir um objetivo. Convencionalmente, busca-se uma solução viável, ou seja, que apenas satisfaça os requisitos de projeto, mas em geral, há mais de uma solução que atenda a todos os requisitos, de modo que um critério de escolha precisa ser usado. Tal critério depende do sistema que é projetado, podendo, inclusive, haver mais de um critério aplicados simultaneamente.

A figura 4.3 ilustra as curvas de nível da função objetivo e as curvas representando as restrições no espaço de soluções para um problema de otimização com duas variáveis de projeto.



Figura 4.3: Curvas de nível e restrições para um problema com duas variáveis de projeto, adaptado de Rao (2009).

4.2 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Para resolver este problema utilizam-se métodos de otimização, que podem ser divididos em dois grandes grupos (SILVA, 2000): métodos analíticos e numéricos. Uma breve descrição dos principais métodos de otimização analíticos e numéricos é feita no apêndice D.

Dada a natureza não linear do objetivos e a impossibilidade de escrevê-los como uma função direta das variáveis de projeto, deve-se adotar um método numérico. E como não se tem precisão sobre os valores das derivadas da função objetivo, tal método deve ser de ordem zero, que depende apenas do valor da própria função objetivo, sem contar com as derivadas.

Métodos de primeira ordem, que utilizam o valor da função juntamente com o valor das primeiras derivadas (gradiente) e métodos de segunda ordem, que contam adicionalmente com os valores das segundas derivadas (hessiano) da função, são capazes de chegar a solução final em um número bastante reduzido de iterações, mas estão condicionados à obtenção precisa do gradiente e da matriz hessiana da função. Caso seja aplicado um método de ordem mais alta do que permite a construção do problema, não se pode ter confiança no resultado obtido.

4.2.1 Métodos adotados

Para o modelo implementado em Matlab[®], adotou-se o algoritmo genético com base no método do lagrangiano aumentado (*ALGA - Augmented Lagrangian Genetic Algorithm*, em tradução livre), conforme detalhado por Srivastava e Kalyanmoy (2010), para a otimização mono-objetivo, com restrições implicitas não lineares.

Para a otimização multiobjetivo, o Matlab[®] não dispõe de um método que aceite restrições não lineares, então as restrições foram transformadas em penalidades na função objetivo, conforme será descrito na seção 4.3. Este método padrão foi também testado para a otimização mono-objetivo, bastando para isso utilizar as funções de penalização aplicadas à otimização multiobjetivo.

Para o modelo implementado no FriendShip[®], o método adotado é o algoritmo genético com triagem de soluções não dominadas e elitismo (*NSGA II - Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*, em tradução livre), desenvolvido por Kalyanmoy et al. (2000), tanto para a otimização mono quanto para a multiobjetivo.

Os dados gerados foram processados e analisados com o auxílio do próprio Matlab[®] e do ModeFrontier[®].

Observou-se que o modelo do Matlab[®] é altamente dependente da escolha da população inicial e do tamanho da população, problemas discutidos por Diaz-Gomez e Hougen (2007) e Gotshall e Rylander (2001), entre outros. Devido a grande complexidade do problema (grande número de variáveis de projeto), a geração automática desta primeira população pelo Matlab[®] não é adequada ao problema, dado que diversos procedimentos de otimização resultam em soluções diferentes ou mesmo não encontram solução viável.

Para resolver este problema, há duas alternativas: a primeira é aumentar o número de indivíduos de cada geração, e com uma população maior, há maior chance do procedimento chegar ao resultado ótimo; e a segunda é fornecer uma população inicial já constituída apenas de indivíduos viáveis. A primeira alternativa elevaria demasiadamente o custo computacional, a título de comparação, uma rodada com 30 indíviduos por geração e 100 gerações demora em torno de 36 horas para completar, ao aumentar o número de indivíduos por geração para 40, o tempo passou para mais de uma semana.

A solução adotada foi aplicar a técnica SOBOL¹ para gerar uma população inicial viável

¹SOBOL é uma sequência quasi-randômica de baixa discrepância, cuja principal característica é a capacidade de distribuir as soluções de maneira mais homogênea pelo espaço de soluções do que uma sequência pseudorandômica tradicional.
homogeneamente distribuída pelo espaço de soluções.

O FriendShip[®] é capaz de lidar melhor com a geração da população inicial, de modo que não foi necessário nenhuma intervenção como a feita no Matlab[®].

4.3 APLICAÇÃO A UM PROBLEMA DE PROJETO

O procedimento proposto foi aplicado a um problema de projeto hipotético, no qual foram estabelecidos como requisitos:

- Capacidade para transportar seiscentos passageiros;
- Autonomia de setecentas milhas náuticas;
- Velocidade de cruzeiro de trinta e cinco nós e;
- Condições de mar $(H_S, T_P \text{ e incidência})^2$ da bacia de Santos.

As funções de mérito devem ser escolhidas em acordo com os objetivos da embarcação, que no caso estudado pode se traduzir por transportar um dado número de passageiros com o máximo conforto, gastando o mínimo de combustível, em um curto espaço de tempo.

A definição da velocidade de cruzeiro ótima, e portanto do tempo que levaria cada viagem, faz parte de um problema logístico e depende da definição de uma rota e uma demanda a serem atendidas, não estando, portanto, no escopo deste trabalho. Deste modo, as funções objetivo escolhidas foram a potência requerida e o conforto dos passageiros. Para o procedimento implementado em Matlab[®], o conforto é medido de acordo com o critério COMF da ABS, descrito na seção 3.3.7.1, resultando em um valor de disponibilidade operacional. Já para o modelo no FriendShip[®], o conforto é avaliado indiretamente através da média da aceleração vertical RMS de diferentes pontos distribuídos pelo convés de passageiros.

Os limites de variação das variáveis de projeto são mostrados na tabela 4.1.

²No modelo implementado no FriendShip[®], estas condições foram simplificadas para um espectro de mar com os valores médios de H_S e T_P médio para a bacia de Santos e incidência de proa, devido às diferenças nos programas usados em cada modelo

$50 \leq L_{ch} \leq 100$	$0,45 \le (C_b)_{sh} \le 0,55$
$12 \leq (L/B)_{ch} \leq 18$	$1 \leq SP \leq 3$
$1,5 \leq (B/T)_{ch} \leq 2,5$	$0 \leq ST \leq 1$
$0,45 \le (C_b)_{ch} \le 0,55$	$0,02 \leq \gamma \leq 0,05$
$12 \leq (L/B)_{sh} \leq 18$	$0,3\leq~\lambda~\leq0,4$

Tabela 4.1: Limites de variação das variáveis de projeto.

As restrições implícitas adotadas em todos os modelos foram:

- Altura metacêntrica inicial mínima: $GM_0 \ge 0, 5$, referente a estabilidade inicial da embarcação;
- Disponibilidade mínima de 75%;
- Lastro positivo, relativo a reserva de flutuação necessária para que possa ser mantido o calado de projeto determinado a partir das variáveis de projeto. O lastro é calculado pela equação (4.2).

$$Lastro = \Delta - W_{total} \tag{4.2}$$

Onde:

- Δ é o deslocamento da embarcação, em toneladas; e
- W_{total} é o peso total da embarcação, também em toneladas.

Para se transformar estas restrições em penalidade das funções objetivo, estas precisam apresentar uma ordem de grandeza compatível com o problema de projeto proposto, sob o risco de tornarem o processo de otimização ineficiente e ineficaz. Sejam as penalidades subestimadas, a otimização pode tornar-se ineficaz no sentido de que não será capaz de encontrar uma solução ótima viável, e sejam elas superestimadas, o processo de otimização pode tornar-se ineficiente, uma vez que qualquer solução ligeiramente inviável teria pouca chance de participar da geração das próximas gerações, pois esta chance é atribuída a cada solução proporcionalmente aos valores dos seus objetivos.

Sendo assim, após testes com diferentes valores de penalização, chegou-se aos coeficientes da tabela 4.2, que são incorporados às funções objetivos como dado na expressão (4.3).

$$f_{obj} = f_{obj} + abs(C_{rest} \cdot \delta_{rest}) \tag{4.3}$$

Onde δ_{rest} representa a diferença entre o valor do atributo que está sendo restrito e o limite imposto pela restrição.

Restrições	Potência requerida	Disponibilidade operacional
GM_0^{min}	10 ⁷	$2 \cdot 10^{2}$
Disp _{min}	10 ⁶	N/A
Lastro	10^{4}	$5 \cdot 10^{-1}$

Tabela 4.2: Coeficientes de penalização (C_{rest}) das funções objetivo.

Desta forma, o valor da função objetivo é atualizado para cada restrição violada, de maneira proporcional a distância entre o valor do atributo e o valor limite, e independentemente de outras restrições terem sido também violadas. Isto faz com que soluções que tenham todas as restrições violadas contribuam pouco para a criação das gerações subsequentes, mas soluções que violem ligeiramente alguma restrição ainda apresentem uma chance de contribuir para a escolha dos genes dos próximos indivíduos.

Para cada problema mono-objetivo, aplicam-se apenas as penalidades referentes ao objetivo em questão, enquanto que para o problema multiobjetivo, aplica-se cada penalidade a seu respectivo objetivo.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresentará os principais resultados obtidos, começando por uma discussão a respeito do posicionamento dos cascos laterais e sua influência nos objetivos. Em seguida são mostrados os resultados dos procedimentos de otimização implementados no Matlab[®] e no FriendShip[®], e por fim faz-se um estudo do espaço de soluções representado através de mapas auto-organizáveis e uma análise estatística das populações geradas pelo FriendShip[®].

5.1 AVALIAÇÃO DA POSIÇÃO DOS CASCOS LATERAIS

Para avaliar a posição dos cascos laterais, escolheu-se arbitrariamente uma solução de projeto padrão, cujas dimensões principais são dadas na tabela 5.1

Tabela 5.1: Dimensões do casco padrão para avaliação do posicionamento relativo entre os cascos.

Parâmetro	Casco central	Casco lateral
Comprimento (m)	70,0	24,5
Boca (m)	4,375	1,531
Calado (m)	2,188	0,776
Coeficiente de bloco	0,5	00

Foram avaliadas 289 posições dos cascos laterais, para 4 velocidades de projeto. As posições foram tomadas, sendo 17 na longitudinal e 17 na transversal, com os coeficientes de separação variando entre [0;1] e entre [1;3], respectivamente. As velocidades consideradas foram 25, 30, 35 e 40 nós, que representam números de Froude de 0,5 a 0,8.

A figura 5.1 mostra a variação da resistência de ondas para os casos analisados.



Figura 5.1: Resistência de ondas em função do posicionamento relativo entre os cascos, representada em [kN] pela escala de cores de cada gráfico.

Na figura 5.2 é mostrado o resultado da mesma análise para uma embarcação de 90 metros de comprimento, com as demais variáveis de projeto mantidas iguais, o que representa uma embarcação semelhante a de 70 metros, escalonada tridimensionalmente em função do comprimento.

A partir da observação exclusiva da figura 5.1, poderia-se concluir que o padrão da resistência de ondas varia de acordo com a velocidade de projeto, mas, ao se observar a figura 5.2, confirma-se a dependência desta parcela da resistência com o número de Froude, pois o padrão observado para a embarcação de 90 metros à velocidade de 35 nós é o mesmo que o da embarcação de 70 metros à velocidade de 30 nós (ver figura 5.4(b)), e ambas situações apresentam número de Froude de aproximadamente 0,6.



Figura 5.2: Resistência de ondas em função do posicionamento relativo entre os cascos para a embarcação de 90 metros de comprimento.

Nestas análises, a única parcela da resistência que depende do posicionamento relativo entre os cascos é a resistência de ondas, pois não se considerou nenhuma interação viscosa entre os cascos, e a aproximação da resistência adicional em ondas depende apenas da área frontal submersa, de modo que o valor da resistência viscosa, incluindo o fator de forma, e o valor da resistência adicional em ondas são os mesmos para todas as posições consideradas na análise.

Portanto, os gráficos da resistência total apresentam o mesmo padrão que os da resistência em ondas, mudando apenas a escala de cores dado que as parcelas de resistência viscosa e adicional em ondas aumentam com o aumento da velocidade da embarcação. O mesmo acontece para a estimativa de potência requerida, calculada a partir da potência efetiva conforme a equação 5.1:

$$Pot_{req} = \frac{Pot_{efet}}{Margem_{MCR} \cdot cp}$$
(5.1)

Onde:

- *Pot_{efet}* é a potência efetiva, calculada pela equação 5.2;
- $Margem_{MCR}$ é a margem de projeto em relação a potência máxima contínua, adotada igual a 90%; e
- cp é o coeficiente propulsivo, adotado igual a 0,7.

$$Pot_{efet} = (1 + Margem_{casco}) \cdot R_t \cdot V \tag{5.2}$$

Sendo a margem de casco adotada igual a 0,15, sem considerar margem de mar, uma vez que o cálculo de resistência já conta com uma estimativa preliminar da resistência em ondas.

Como pode ser visto na figura 5.3, a potência requerida segue o mesmo padrão da resistência de onda, mas há um aumento significativo dos valores absolutos conforme se aumenta a velocidade de projeto.



Figura 5.3: Potência requerida em função do posicionamento relativo entre os cascos [MW].

A figura 5.4 mostra a disponibilidade operacional da embarcação em função do posicionamento relativo entre os cascos. Para facilitar a visualização e comparação das regiões das melhores soluções, a disponibilidade teve o sinal invertido, de modo que regiões de interesse são representadas em azul, tanto nos gráficos de potência/resistência quanto nos de disponibilidade.



Figura 5.4: Disponibilidade operacional em função do posicionamento relativo entre os cascos [MW].

Uma constatação interessante é o aumento das regiões avermelhadas, que representam soluções com baixa disponibilidade (em torno dos 20%), conforme aumenta-se a velocidade de projeto. Nota-se, ainda, que a função de disponibilidade operacional é altamente não linear, o que corrobora a utilização do método de otimização adotado.

5.2 OTIMIZAÇÃO: MATLAB®

5.2.1 Otimização mono-objetivo

Foram realizados dois processos de otimização mono-objetivo, um para minimizar a potência instalada e outro para maximizar a disponibilidade operacional. A tabela 5.2 mostra os resultados obtidos para cada um dos processos, enquanto as dimensões finais dos respectivos cascos podem ser vistas na tabela 5.3.

	Minimização	Maximização da
Atributos	da potência	disponibilidade
Potência requerida (MW)	5,45	19,8
Disponibilidade operacional (%)	76,7	93,8

Tabela 5.2: Resultados da otimização mono-objetivo: disponibilidade e potência.

Variáncia do presisto	Minimização	Maximização da
variaveis de projeto	da potência	disponibilidade
Comprimento do casco central (m)	67,5	99,5
Razão de L/B do casco central	$15,\!5$	$12,\!6$
Razão de B/T do casco central	1,82	$2,\!16$
Coeficiente de bloco do casco central	$0,\!47$	0,53
Razão de comprimento do casco lateral (λ)	0,33	$0,\!37$
Razão de L/B do casco lateral	14,7	$14,\!0$
Razão de deslocamento do casco lateral (γ)	0,037	0,033
Coeficiente de bloco do casco lateral	$0,\!50$	0,52
Coeficiente de separação lateral	2,59	1,74
Coeficiente de separação longitudinal	0,51	0,94

Tabela 5.3: Variáveis de projeto para cada solução.

As vistas frontal e superior de cada solução podem ser vistas, na mesma escala, nas figuras 5.5 e 5.6.



Figura 5.5: Comparação entre as vistas frontais para as soluções mono-objetivo de minimização da potência requerida e maximização da disponibilidade operacional.



Figura 5.6: Comparação entre as vistas superiores para as soluções mono-objetivo de minimização da potência requerida e maximização da disponibilidade operacional.

5.2.2 Otimização multiobjetivo

Em seguida, foram realizados processos de otimização multiobjetivo, no qual ambos os critérios, previamente analisados em processos de otimização distintos, são verificados simultaneamente. Como resultado obtém-se uma fronteira com as soluções de projeto não dominadas, chamada fronteira de Pareto, como mostra a figura 5.7.



Figura 5.7: Fronteira de Pareto da otimização multiobjetivo.

Os resultados obtidos com os processos de otimização mono-objetivo, representados pelos pontos em vermelho na figura 5.7, recuperam, com razoável aproximação, os extremos da fronteira de Pareto. A diferença máxima entre os valores das variáveis de projeto é da

ordem de 7%, e pode ser explicada pelo fato de que os processos de otimização mono e multiobjetivo foram realizados com base em versões diferentes do algoritmo genético: a otimização multiobjetivo utiliza a função padrão do Matlab[®], que não aceita restrições não lineares, e a otimização mono-objetivo utiliza o algorítimo ALGA, que aceita tais restrições, conforme discutido na seção 4.3.

As soluções na região de mínima potência apresentam casco semelhante ao casco da otimização mono-objetivo, como pode ser visto nas figuras 5.8(a) e 5.9(a). Enquanto as soluções da região de máxima disponibilidade apresentam dimensões parecidas com o resultado da mono-objetivo, porém com os cascos laterais próximos a popa, como mostra a figura 5.9(b).



Figura 5.8: Otimização multiobjetivo: Comparação entre as vistas frontais para as soluções representativas das regiões de potência mínima e disponibilidade máxima.



Figura 5.9: Otimização multiobjetivo: Comparação entre as vistas superiores para as soluções representativas das regiões de potência mínima e disponibilidade máxima.

Os resultados dos extremos da fronteira de Pareto da otimização multiobjetivo são mostrados na tabela 5.4, e os valores das variáveis de projeto encontram-se na tabela 5.5. São apresentadas as soluções dos extremos para que possa ser feita a comparação entre estas e as obtidas pelas otimizações mono-objetivos, mas cabe ressaltar que as soluções próximas aos extremos apresentam variáveis de projeto com valores semelhantes.

Atributos	Minimização	Maximização da	
Atributos	da potência	disponibilidade	
Potência requerida (MW)	4,04	22,8	
Disponibilidade operacional (%)	75,4	96,4	

Tabela 5.4: Resultados da otimização multiobjetivo sem restrições não lineares (penalização da função objetivo): disponibilidade e potência.

Tabela 5.5: Variáveis de projeto para as soluções dos extremos da fronteira de Pareto.

Variáncia da presista	Minimização	Maximização da
variaveis de projeto	da potência	disponibilidade
Comprimento do casco central (m)	69,0	96,7
Razão de L/B do casco central	$16,\! 6$	12,8
Razão de B/T do casco central	$2,\!39$	1,90
Coeficiente de bloco do casco central	$0,\!51$	$0,\!52$
Razão de comprimento do casco lateral (λ)	$0,\!35$	$0,\!39$
Razão de L/B do casco lateral	14,8	$12,\!6$
Razão de deslocamento do casco lateral (γ)	0,021	0,036
Coeficiente de bloco do casco lateral	$0,\!51$	$0,\!52$
Coeficiente de separação lateral	1,39	$2,\!30$
Coeficiente de separação longitudinal	$0,\!39$	0,09

A título de verificação, foi então aplicada uma penalização da função objetivo semelhante a utilizada para a otimização multiobjetivo, de modo a permitir a utilização do algorítimo padrão do Matlab[®] também para as rodadas mono-objetivo. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 5.6, e os valores das variáveis de projeto podem ser vistos na tabela 5.7.

Tabela 5.6: Resultados da otimização mono-objetivo sem restrições não lineares (penalização da função objetivo): disponibilidade e potência.

	Minimização	Maximização da	
Atributos	da potência	disponibilidade	
Potência requerida (MW)	4,03	29,1	
Disponibilidade operacional (%)	77,3	99,2	

Variáncia da presista	Minimização	Maximização da
vanavels de projeto	da potência	disponibilidade
Comprimento do casco central (m)	70,8	97,1
Razão de L/B do casco central	$17,\!6$	12,3
Razão de B/T do casco central	$2,\!41$	1,64
Coeficiente de bloco do casco central	$0,\!52$	$0,\!51$
Razão de comprimento do casco lateral (λ)	$0,\!33$	0,36
Razão de L/B do casco lateral	$14,\!1$	13,8
Razão de deslocamento do casco lateral (γ)	0,021	0,044
Coeficiente de bloco do casco lateral	$0,\!52$	0,48
Coeficiente de separação lateral	$1,\!17$	$2,\!35$
Coeficiente de separação longitudinal	0,98	$0,\!45$

Tabela 5.7: Variáveis de projeto para cada solução da otimização mono-objetivo sem restrições não lineares.

A figura 5.10 traz uma comparação para as três situações analisadas, podendo ser observado que a otimização com as restrições não lineares transformadas em penalização das funções objetivo recupera com maior precisão o extremo da fronteira de Pareto na região de mínima potência, mas não na região de máximo desempenho. Para esta região, obtém-se um ponto que extrapola os resultados da fronteira, chegando a disponibilidade de praticamente 100%.

Decidiu-se então realizar mais dois processos de otimização multiobjetivo, para verificar a possibilidade de melhorar a fronteira encontrada a partir da inclusão, na população inicial, dos resultados obtidos. O primeiro destes processos foi realizado incluindo-se na população inicial as soluções das otimizações mono-objetivo realizadas com o algoritmo padrão do Matlab[®] (penalização), representadas pelos quadrados pretos na figura 5.10.



Figura 5.10: Fronteira de Pareto da otimização multiobjetivo.

A figura 5.11 traz os resultados obtidos, sendo possível observar que há uma melhora significativa da fronteira, em especial nas regiões central e de máxima disponibilidade.



Figura 5.11: Fronteira de Pareto da otimização multiobjetivo, incluindo os resultados do processo de otimização mono-objetivo na população inicial.

O segundo dos processos incluiu na população inicial os resultados obtidos no primeiro processo, e as soluções encontradas são mostradas na figura 5.12.



Figura 5.12: Fronteira de Pareto da otimização multiobjetivo, incluindo os resultados obtidos na otimização da figura 5.11 na população inicial.

Pode-se observar que há um preenchimento maior da fronteira anterior, mas com pouca melhora, indicando a convergência para a fronteira de Pareto final do problema.

Como será discutido na seção 5.5, as variáveis com maior influência nas funções objetivo escolhidas são, por ordem de importância, o comprimento e a razão de comprimento por boca do casco central. E, em todos os casos analisados, obteve-se valores bastante próximos. Para a minimização da potência requerida, o comprimento da embarcação é de aproximadamente 70 m, e os cascos são bastante esbeltos, com L/B entre 16 e 18. Já para a maximização da disponibilidade operacional, o comprimento é de aproximadamente 100 m, e os cascos centrais são bem menos esbeltos, com L/B da ordem de 12,5.

5.2.3 Otimização com velocidade reduzida para 30 nós

A fronteira de Pareto obtida para o problema de projeto proposto foi comparada também com um problema análogo, porém com a velocidade de cruzeiro reduzida para 30 nós. O resultado é mostrado na figura 5.13



Figura 5.13: Comparação entre as fronteiras de Pareto para diferentes velocidades.

As soluções ao longo da fronteira de Pareto para o problema com velocidade de 30 nós são semelhantes às do problema com velocidade de 35 nós, o deslocamento da fronteira para regiões de menor potência efetiva deve-se, principalmente, à diferença de velocidade, já que a potência é diretamente proporcional ao cubo da velocidade. Deve-se notar também que a redução de velocidade contribui ainda para a diminuição do movimento da embarcação, melhorando o seu comportamento em ondas e, portanto, a disponibilidade operacional.

Observa-se ainda que as soluções de ambas velocidades de avanço se agrupam na região de potência mínima. Este comportamento faz com que as soluções da fronteira com velocidade de avanço de 30 nós, nesta região, sejam dominadas pelas soluções da fronteira de 35 nós, uma vez que é possível obter a mesma disponibilidade operacional navegando mais rápido e consumindo a mesma potência.

Caso seja de interesse aprofundar o estudo sobre variações da velocidade de projeto, devese realizar a análise de convergência da fronteira de Pareto para todas as velocidades consideradas, da mesma forma que feito para a velocidade de 35 nós.

5.3 OTIMIZAÇÃO: FRIENDSHIP®

Da mesma forma que para a otimização realizada em Matlab[®], realizou-se os processos de otimização mono e multiobjetivo no programa FriendShip[®]. A figura 5.14 mostra o gráfico de bolhas 4D da fronteira de Pareto, isto é, além da potência requerida¹ e da aceleração média RMS no convés de passageiros, o gráfico mostra também a variação do comprimento do casco central, na escala de cores, e a variação do deslocamento, no diâmetro dos círculos que representam cada solução.



Figura 5.14: Otimização multiobjetivo FriendShip.

Os losangos mostram os resultados para as rodadas mono-objetivos. A otimização da aceleração (losango azul) aproxima com razoável precisão o final da fronteira naquela região, já a otimização da potência requerida (losango vermelho), apesar de aproximar com bastante precisão o valor da potência, apresenta um valor muito mais elevado de aceleração. Isto ocorre porque soluções naquela região apresentam comprimento e razão de comprimento por boca bastante semelhantes, que são as variáveis com maior influência na resistência ao avanço, como será visto na seção 5.6, e o valor da aceleração não é monitorado, de modo que, devido a natureza arbitrária do algorítimo genético, poderia-se chegar a qualquer solução naquele intervalo.

 $^{^{1}}$ A função objetivo adotada no FriendShip, por questão de simplicidade, foi a resistência total, mas, como mostrado na equação (5.1), há uma relação direta entre potência requerida e resistência total, de modo que ambas podem ser intercambiadas sem alteração para os resultados do problema.

Os valores das funções de mérito para os procedimentos mono-objetivo de aceleração e resistência total (equivalente a potência requerida, conforme equação (5.1)), são mostrados na tabela 5.8, enquanto as variáveis de projeto podem ser vistas na tabela 5.9.

AtributosMinimização
da potênciaMinimização
da aceleraçãoPotência requerida (MW)5,2327,07Aceleração vertical RMS (m/s^2)1,480,47

Tabela 5.8: Resultados da otimização mono-objetivo no FriendShip[®]: Aceleração vertical e potência requerida.

Tabela 5.9: Variáveis de projeto para cada solução da otimização mono-objetivo no FriendShip[®].

Atributes	Minimização	Minimização
Attibutos	da potência	da aceleração
Comprimento do casco central (m)	$59,\!5$	99,8
Razão de L/B do casco central	$17,\!9$	$12,\!1$
Razão de B/T do casco central	1,74	2,4
Coeficiente de bloco do casco central	$0,\!54$	$0,\!49$
Razão de comprimento do casco lateral (λ)	$0,\!31$	$0,\!32$
Razão de L/B do casco lateral	$17,\!3$	17,9
Razão de deslocamento do casco lateral (γ)	0,021	$0,\!045$
Coeficiente de bloco do casco lateral	$0,\!53$	$0,\!53$
Coeficiente de separação lateral	2,00	1,07
Coeficiente de separação longitudinal	0,32	0,94

Para as soluções representativas das regiões dos extremos da fronteira de Pareto do problema multiobjetivo, os valores das funções objetivo e das variáveis de projeto são dados, respectivamente, nas tabelas 5.10 e 5.11.

Atributos	Minimização	Minimização
Attibutos	da potência	da aceleração
Potência requerida (MW)	4,81	23,25
Aceleração vertical RMS (m/s^2)	$0,\!95$	0,47

Tabela 5.10: Resultados da otimização multiobjetivo no FriendShip®: Aceleração vertical e potência requerida.

Tabela 5.11: Variáveis de projeto para cada solução da otimização multi
objetivo no FriendShip®.

Atributos	Minimização	Minimização
Atributos	da potência	da aceleração
Comprimento do casco central (m)	57,0	99,0
Razão de L/B do casco central	$15,\!0$	$12,\!6$
Razão de B/T do casco central	$2,\!48$	$2,\!40$
Coeficiente de bloco do casco central	$0,\!52$	0,54
Razão de comprimento do casco lateral (λ)	$0,\!31$	0,33
Razão de L/B do casco lateral	$17,\!3$	17,7
Razão de deslocamento do casco lateral (γ)	0,020	0,030
Coeficiente de bloco do casco lateral	$0,\!54$	$0,\!52$
Coeficiente de separação lateral	1,02	$1,\!01$
Coeficiente de separação longitudinal	$0,\!93$	$0,\!93$

5.3.1 Otimização com velocidade reduzida para 30 nós

Ao se comparar a fronteira de Pareto obtida para o problema original com a do problema com velocidade reduzida para 30 nós, observa-se a mesma tendência vista no Matlab[®]. Como pode ser visto na figura 5.15, há melhora nos valores de ambas funções objetivo, para soluções com características semelhantes, em toda extensão da fronteira.



Figura 5.15: Comparação entre as fronteiras de Pareto para diferentes velocidades.

5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS: MATLAB® E FRIENDSHIP®

Os resultados obtidos pelos procedimentos de otimização implementados em ambos programas se mostraram bastante coerentes entre si, sendo possível observar a reprodução das tendências gerais do projeto de embarcações trimarã, mesmo com a utilização de funções objetivo diferentes para representar o conforto dos passageiros em cada modelo.

Os valores das funções objetivo adotadas no Matlab[®] e no FriendShip[®] para as soluções dos extremos da fronteira de Pareto foram mostrados, respectivamente, nas tabelas 5.4 e 5.10, e reproduzidos na tabela 5.12.

Tabela 5.12: Comparação dos resultados de potência requerida entre os procedimentos multiobjetivo do Matlab[®] e do FriendShip[®].

	Minimização	Maximização	
	da potência	do conforto	
$\mathrm{Matlab}^{\circledast}(MW)$	4,04	22,8	
$\operatorname{FriendShip}^{\circledast}(MW)$	4,81	$23,\!25$	

Pode-se observar que, em ambos os casos, os valores de potência requerida têm a mesma ordem de grandeza. O termo conforto é usado para simbolizar as duas funções objetivo escolhidas para representá-lo em cada modelo: disponibilidade operacional e aceleração vertical RMS.

As variáveis de projeto foram mostradas, respectivamente, nas tabelas 5.5 e 5.11, e aqui reproduzidas na tabela 5.13

Nota-se a mesma tendência para o porte da embarcação tanto no Matlab[®] quanto no FriendShip[®], com embarcações menores para o mínimo de potência, com deslocamentos da ordem de 220t, e embarcações maiores para o máximo de conforto, com deslocamentos da ordem de 1550t.

	Minimização da potência		Maximização do conforto	
Atributos	Matlab®	FriendShip [®]	Matlab®	FriendShip®
Comprimento do casco central (m)	69,0	57,0	96,7	99,0
Razão de L/B do casco central	$16,\! 6$	15,0	12,8	12,6
Razão de B/T do casco central	$2,\!39$	$2,\!48$	$1,\!90$	$2,\!40$
Coeficiente de bloco do casco central	$0,\!51$	0,52	0,52	$0,\!54$
Razão de comprimento do casco lateral (λ)	$0,\!35$	0,31	$0,\!39$	$0,\!33$
Razão de L/B do casco lateral	14,8	$17,\!3$	$12,\!6$	17,7
Razão de deslocamento do casco lateral (γ)	0,021	0,020	0,036	0,030
Coeficiente de bloco do casco lateral	$0,\!51$	$0,\!54$	0,52	0,52
Coeficiente de separação lateral	1,39	1,02	2,30	1,01
Coeficiente de separação longitudinal	0,39	0,93	0,09	0,93

Tabela 5.13: Comparação das variáveis de projeto para os extremos da fronteira de Pareto do Matlab[®] e do FriendShip[®].

Para comparar as soluções obtidas em cada modelo do ponto de vista do conforto, as soluções do FriendShip[®] foram rodadas com o modelo de síntese do Matlab[®], e os resultados são mostrados na figura 5.16.



Figura 5.16: Comparação das fronteiras de Pareto obtidas no Matlab[®] e no FriendShip[®].

A fronteira de Pareto do FriendShip[®] está contida na região delimitada pela fronteira do Matlab[®], ou seja, apresenta tanto indivíduos sobre a fronteira quanto indivíduos na região das soluções dominadas. Sendo assim, a utilização da aceleração vertical RMS, da maneira implementada no FriendShip[®], não é equivalente ao cálculo da disponibilidade operacional realizado no Matlab[®].

Uma possível explicação para tanto é a limitação do modelo do FriendShip[®], no qual foi considerado apenas um expectro de mar, com período e altura significativa médios para a bacia de Santos e incidência de proa. Portanto, soluções com aceleração mínima nestas condições podem apresentar um aumento da aceleração vertical quando são considerados mares com diferentes incidências, por exemplo, levando a uma piora no índice de disponibilidade operacional, calculado no Matlab[®].

5.5 MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS

Mapas auto-organizáveis são uma técnica de rede neural que permite a visualização de dados multidimensionais em um número reduzido de dimensões, formando um mapa to-pográfico (FINCKE et al., 2008). Usualmente, tem-se mapas de uma ou duas dimensões, que são construídos a partir de uma rede de nós treinada para representar as soluções, organizando-as ordenadamente no mapa. Cada nó do mapa é associado a um neurônio da rede, que contém uma variável "peso" para cada atributo considerado. Ao número total de pesos, dá-se o nome de dimensionalidade.

As soluções são então agrupadas em função dos seus respectivos vetores "peso". Os gráficos da figura 5.17 mostram as matrizes U e P, que ajudam a descrever o comportamento geral do mapa. A matriz U traz a distância média entre cada nó e seus adjacentes, enquanto a matriz P traz a densidade de pontos em torno de cada nó. A utilização conjunta das matrizes U e P permite a identificação mais precisa de aglomerações e suas fronteiras (ULTSCH, 2003)



(a) Distância média entre nós (Matriz U)

(b) Densidade (Matriz P)

Figura 5.17: Mapas auto-organizáveis: Características gerais.

Nota-se que a região inferior esquerda apresenta grande distância entre os nós, e também baixa densidade de nós. A parte mais clara da matriz U poderia levar a interpretação de que há ali uma aglomeração de nós, mas ao analisar a matriz P, percebe-se que a região de maior densidade não coincide com a de menor distância.

A figura 5.18 mostra os mapas topológicos para as funções objetivo consideradas: Resis-

tência ao avanço (figura 5.18(a)) e Aceleração vertical RMS (figura 5.18(b)). No mapa de resistência, pode-se observar regiões de mínimo no quarto superior esquerdo e regiões de máximo na lateral direita e na extremidade inferior esquerda. Já para o mapa de aceleração, a região de mínimo está na lateral esquerda e a região de máximo no centro da lateral inferior, confirmando que a solução final escolhida será um compromisso entre a potência requerida, diretamente proporcional à resistência total, e a disponibilidade operacional.



Figura 5.18: Mapas auto-organizáveis: Funções objetivo.

As figuras 5.19(a) e 5.19(b) mostram os mapas para as duas restrições explícitas consideradas, respectivamente, a de lastro positivo e a de altura metacêntrica inicial mínima.



Figura 5.19: Mapas auto-organizáveis: Restrições.

Pode-se concluir que as soluções com resistência mínima apresentam também lastro mí-

nimo, enquanto as de aceleração mínima apresentam grande quantidade de lastro. Isso se deve ao fato de que as soluções que minimizam a resistência são embarcações menores e mais esbeltas, enquanto as soluções que minimizam as acelerações são embarcações maiores e menos esbeltas, o que leva a um superdimensionamento da solução face ao problema proposto, de transportar 600 passageiros.

A conclusão acima é feita a partir da análise da figura 5.20, que mostra os mapas para as quatro variáveis que definem as dimensões do casco central. Pode-se observar, nas figuras 5.20(a) e 5.20(b), que as soluções com mínima resistência têm comprimento mínimo e razão de comprimento por boca entre intermediário e alto. Já para o objetivo de aceleração mínima, as soluções apresentam comprimento máximo e razão L/B mínima.









Figura 5.20: Mapas auto-organizáveis: Variáveis de Projeto - casco central.

Para a razão de boca por calado (B/T) e o coeficiente de bloco (C_b) , nas figuras 5.20(c) e 5.20(d), respectivamente, não se observa uma clara correlação entre as variáveis e os

objetivos escolhidos, dado que se pode encontrar valores elevados de B/T tanto na região de mínima resistência quanto na região de mínima aceleração.

A figura 5.21 traz os mapas para as variáveis que definem as dimensões dos cascos laterais, e a figura 5.22 os mapas para as variáveis de posicionamento relativo entre os cascos.



Figura 5.21: Mapas auto-organizáveis: Variáveis de Projeto - casco lateral.

Como pode-se observar, não há nenhuma correlação direta expressiva entre as variáveis dos cascos laterais e os objetivos. A única variável que apresenta uma leve concordância é a razão de deslocamento do casco lateral, γ , para a qual valores baixos estão associados ao mínimo de resistência e valores elevados relacionados ao mínimo de aceleração. Isso pode ser explicado pelo fato de que valores baixos levam a cascos laterais menores, e portanto há menor área molhada e menor calado, de modo que a contribuição para a resistência total dos cascos laterais fica reduzida. Por outro lado, valores maiores de γ levam a cascos laterais maiores e, portanto, com maior inércia, contribuindo para a redução das

acelerações.



Figura 5.22: Mapas auto-organizáveis: Variáveis de Projeto - posicionamento relativo.

Em relação ao posicionamento relativo entre os cascos, não se observa nenhuma relação direta entre estes e os objetivos, corroborando o trabalho de Kurultay (2003), no qual o autor conclui que, dependendo do caso analisado, das condições de projeto (velocidade, carga) e das condições de mar consideradas, um determinado posicionamento pode tanto ser benéfico do ponto de vista de resistência quanto do ponto de vista de comportamento (acelerações).

No entanto, se fixadas as dimensões principais de cada casco, é clara a dependência entre os objetivos e o posicionamento relativo entre os cascos, como visto na seção 5.1 deste capítulo, e conluído por Migali et al. (2001). Tal resultado é compatível com a complexidade do problema, expressa pelo número de variáveis de projeto necessárias para descrever unicamente cada solução.

5.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Primeiramente, são analisados os gráficos de correlação das funções objetivo e das restrições com as variáveis de projeto, que medem o grau de associação entre duas variáveis, resultando em valores entre 1 e -1. A figura 5.23 mostra as matrizes de correlação para as formulações de *Pearson* e de *Spearman*.

A correlação de *Pearson* é também conhecida como coeficiente de correlação produtomomento e mede a dependência linear entre duas variáveis. Valores igual a um significam que todos os pontos recaem sobre uma mesma linha com declividade positiva e valores igual a menos um, com declividade negativa. Caso a correlação seja igual a zero, diz-se que as variáveis são linearmente desassociadas ou não correlatas.

A correlação de *Spearman*, também chamado de coeficiente de correlação de postos de *Spearman*, é uma medida não paramétrica da dependência estatística entre duas variáveis, dizendo o quão bem a relação entre elas pode ser descrita por uma função arbitrária monotônica.



Figura 5.23: Correlação estatística.

De ambas as matrizes, nota-se que a variável mais correlata à restrição de lastro, à resistência total e à aceleração vertical é o comprimento do casco central, sendo que para os dois primeiros há uma relação direta, e para o terceiro, indireta. Em relação à restrição de estabilidade, a variável com maior correlação é a separação lateral, pois o raio metacêntrico depende diretamente da inércia de área da área de linha d'água, cuja maior contribuição provém da inércia de transferência da área de linha d'água dos cascos laterais, que aumenta com o quadrado da separação.

As demais variáveis para as quais se observa uma correlação significativa em relação à restrição de GM inicial são o coeficiente de bloco dos cascos laterais (\bigcirc), sua razão de comprimento por boca (\bigcirc) e a razão λ (\oplus), que define o comprimento dos cascos laterais.

Para a restrição de lastro, tem-se o coeficiente de bloco (\oplus) , o comprimento (\oplus) e a razão de comprimento por boca (\odot) do casco central e o coeficiente de separação lateral (\odot) como variáveis com maior correlação.

Em relação aos objetivos, há maior correlação da resistência total com o comprimento (\oplus) e com a razão de comprimento por boca (\odot) do casco central, com a razão γ (\oplus) e com o coeficiente de bloco (\odot) do casco lateral; e da aceleração vertical RMS com o comprimento (\odot) e com a razão de boca por calado (\odot) do casco central, com o coeficiente de separação longitudinal (\odot) e lateral (\oplus) .

Em seguida, analisam-se os histogramas de significância de Student, que mostram o efeito de cada variável de projeto x em determinado atributo y, em ordem de importância. O efeito da variável x é calculado dividindo-se as soluções em dois grupos, um com os menores valores de x e outro com os maiores, e tomando a diferença entre a média do atributo y no grupo dos maiores valores de x e a media no grupo dos menores valores.

Esta análise é importante para se encontrar quais variáveis são relevantes ao problema, e quais podem ser excluídas do grupo de variáveis de projeto. As figuras de 5.24 a 5.27 mostram os histogramas para as funções objetivo de resistência total e aceleração vertical RMS média, e para as restrições de lastro e de altura metacêntrica inicial.

As mesmas quatro variáveis de maior correlação com cada um dos quatro atributos analisados, objetivos e restrições, são as quatro variáveis que exercem maior influência nos resultados, ou seja, variáveis cujas variações acarretam maiores mudanças nos atributos. Mas, como será descrito, ocorrem algumas inversões de ordem nas quais uma variável com maiores índices de correlação exercem uma influência menor.



Figura 5.24: Histogramas de significância de Student para resistência total.

Observa-se que há maior correlação da resistência com L/B_{ch} do que que com Cb_{sh} , no entanto, ambas variáveis de projeto apresentam uma influência semelhante, sendo que o coeficiente de bloco do casco lateral exerce uma influência ligeiramente superior à da razão de comprimento por boca do casco central.



Figura 5.25: Histogramas de significância de Student para aceleração vertical RMS.

Apesar da correção da aceleração com o comprimento do casco central ser consideravelmente superior à do coeficiente de separação transversal, variações deste último são ligeiramente mais influentes que variações do primeiro.



Figura 5.26: Histogramas de significância de Student para a restrição de Lastro.

Na restrição de lastro, nota-se que o coeficiente de bloco do casco central tem maior influência que o a razão L/B_{ch} , embora a correlação se dê na ordem contrária.



Figura 5.27: Histogramas de significância de Student para a restrição de GM inicial.

Por último, para a restrição de estabilidade inicial, tem-se que as variáveis Cb_{sh} , L/B_{sh} e λ , embora apresentem correlação semelhante, têm influência consideravelmente distinta.

Conclui-se, portanto, que apesar de algumas variáveis apresentarem pouca ou nenhuma importância para o cálculo dos objetivos, estas são importantes para o cálculo das restrições do problema, de modo que não podem ser prontamente eliminadas² do problema de

²Eliminar uma variável de projeto equivale a transformá-la em parâmetro fixo ou variável dependente,

projeto sem um estudo mais detalhado.

As dez variáveis de projeto aparecem entre as quatro mais importantes em pelo menos um dos objetivos ou restrições, sendo as razões γ , $\lambda \in B/T_{ch}$, as únicas que aparecem apenas em quarto lugar.

de acordo com o que se mostrar mais adequado à modelagem do problema.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme proposto nos objetivos deste trabalho, uma metodologia de projeto de embarcações trimarã de alta velocidade para o transporte de passageiros foi desenvolvida, tendo sido implementado um procedimento de otimização multiobjetivo com base no modelo de síntese criado, conforme descrito nos capítulos 3 e 4.

Os mecanismos que governam o projeto deste tipo de embarcações são estudados a priori com base na literatura, conforme apresentado no capítulo 2, e a posteriori, com base nos resultados obtidos durante esta pesquisa, apresentados no capítulo 5. Capítulo no qual são descritas novas descobertas sobre o comportamento do problema estudado, que não estavam claras a partir do estudo da literatura.

A construção de dois procedimentos em paralelo propiciou um melhor entendimento de tal problema, a partir das diferentes análises realizadas. O modelo no Matlab[®] permitiu, por exemplo, o estudo do posicionamento relativo entre os cascos e uma análise mais completa do conforto a bordo da embarcação, ao permitir a consideração dos mares anuais para a bacia de Santos; já o modelo no FriendShip[®] permitiu, por exemplo, análises estatísticas sobre as relações entre variáveis de projeto, funções objetivos e restrições.

Foi possível identificar a influência e a importância das variáveis de projeto nos diferentes atributos tomados como função objetivo e como restrições, concluindo que não é recomendável retirar nenhuma das variáveis de projeto. Ademais, o conjunto de variáveis escolhido para representar uma solução de projeto, apoiado pelos trabalhos de Zhang (1997), Andrews (2003), Hefazi et al. (2005), Andrade (2001) e Cerqueira e Ribeiro (2011), se mostrou bastante adequado ao problema estudado, pois, além de serem relevantes para os objetivos e restrições, garantiram uma boa representação geométrica das soluções, sem a nessecidade de restrições implícitas para tanto.

Confirmou-se que a resistência de ondas, dependente do número de Froude, é fortemente influenciada pelo posicionamento relativo entre os cascos, pois há grande interação do escoamento potencial entre os cascos central e laterais. A interferência entre as ondas geradas por cada casco pode levar tanto ao aumento quanto à redução do coeficiente de resistência de ondas da embarcação, em comparação ao coeficiente dos cascos isolados, como explicado no apêndice A, seção A.2.3, e ilustrado na figura A.7.

As soluções que minimizam a potência requerida apresentam também lastro praticamente nulo, isto é, as embarcações de menor potência têm o porte mínimo capaz de acomodar os passageiros, bagagens, tripulação, combustível e demais cargas necessárias ao funcionamento da embarcação.

Para a maximização do conforto, as soluções obtidas, considerando a operação na bacia de Santos, foram embarcações de porte muito maior que o necessário para acomodar a quantidade de passageiros do caso de estudo, dada a quantidade de lastro necessária para manter tais soluções no calado de projeto.

A escolha do algorítimo genético para realização do processo de otimização se mostrou adequada, sendo capaz de tratar corretamente as funções de mérito e restrições não lineares. Os resultados mono e multiobjetivos estão coerentes, sendo que a otimização mono-objetivo para cada função recuperou com precisão os valores para as respectivas funções na otimização multiobjetivo, ainda que a outra função objetivo, não monitorada durante a otimização mono-objetivo, tenha se distanciado do ponto de extremo da fronteira de Pareto.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A construção de um procedimento de projeto de embarcações trimarã é algo extremamente complexo e amplo, e neste trabalho foi abordada de um ponto de vista particular, que não pressupõe esgotar o assunto.

Sendo assim, diversos trabalhos podem seguir a este, complementando e estendendo-o. Algumas sugestões são feitas a seguir.

Melhorar os modelos Aprimorar os modelos adotados nos diferentes módulos de cálculo apresentados no fluxograma da figura 3.1, em particular os modelos de:

- Pesos e centros;
- Inércia de massa (raios de giração nos 3 graus de liberdade);
- Resistência adicional em ondas e;
- Integração casco-propulsor (hidrojato).

Validação numérica - CFD Realizar uma validação dos modelos adotados para o cálculo de resistência e comportamento no mar através de um programa de fluidomecânica computacional.

Ensaios em escala reduzida Ademais da validação numérica, é possível também realizar um procedimento de validação dos modelos através de ensaios em escala reduzida.

Variáveis de projeto Apesar deste estudo ter mostrado que as variáveis de projeto representarem bem o problema e serem importantes ora para as funções objetivo ora para as restrições, isto não exclui a possibilidade de se reduzir o seu número sem perda de qualidade do modelo.

Nesse sentido, pode-se estudar a redução das variáveis de projeto, que pode ser a simples exclusão de uma variável - tornando-a um parâmetro ou uma variável dependente - ou uma redefinição do conjunto de variáveis como um todo.

Alternativas para o problema de projeto A construção modular da metodologia desenvolvida facilita sua adaptação a outros problemas de projeto, cujo propósito da embarcação seja diferente do estudado neste trabalho. Cita-se, por exemplo:

- Variar o número de passageiros transportados;
- Transportar cargas de alto valor agregado;
- Transportar veículos leve e/ou pesados e;
- Estudar combinações dos itens acima, passageiros, veículos e cargas.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABS. Guide for passenger comfort on ships. [S.l.]: American Bureau of Shipping, 2001.

ALLISON, J. e. a. Marine water propulsion. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, p. 275–335, 1993.

ANDRADE, B. L. R. Modelo de síntese e otimização por múltiplos critérios para o projeto preliminar de embarcações. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

ANDRADE, B. L. R.; SIMÕES, F. A. C. Modelo de síntese e otimização para o projeto preliminar de embarcações de planeio. In: 23° Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2010.

ANDREWS, D. Multi-hulled vessels. In: *Ship design and construction*. [S.l.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003.

ARMSTRONG, T. Catamarans. In: *Ship design and construction*. [S.l.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003.

ARORA, J. S. Introduction to optimum design. [S.I.]: Book-mart Press Ltda., 1989.

BASIN, A. M. Performance and maneuverability of ships. Transport Pub. House, 1977.

BECK, R. F. et al. *Principles of Naval Architecture - Volume III - Motions in Waves and Controllability.* [S.I.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989.

BELEGUNDU, A. D.; CHANDRUPATLA, T. R. *Optimization concepts and applications in engineering*. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall Editora, 1999.

BOYD, J. C. M. Analysis of non-linear vessel motions using modified linear strip theory. Dissertação (MSc Thesis) — Curtin University of Technology, 1995.

BRIZZOLARA, S.; BRUZZONE, D. Hydrodynamic optimisation of high-speed trimaran hull forms. In: *Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vancouver, BC, Canada: [s.n.], 2008.

CERQUEIRA, L. L. de; RIBEIRO, R. M. C. Modelo de síntese e processo de otimização para o projeto conceitual/preliminar de um navio CNG. Dissertação (Trabalho de Formatura) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3 nº 380 - CEP 05508-010 - São Paulo - SP, 2011.

COUSER, P. R.; WELLICOME, J. F.; MOLLAND, A. F. An improved method for the theoretical predicition of the wave resistance of transom-stern hulls using a slender body approach. *International Shipbuilding Progress*, v. 45, n. 444, 1998.

DAVIS, R. *The Trybrid Project*. 2007. Disponível em: ">http://www.trybrid.org-/trimaran/>.

DIAZ-GOMEZ, P. A.; HOUGEN, D. F. Initial population for genetic algorithms: a metric approach. In: *International Conference on Genetic and Evolutionary Methods*. [S.l.: s.n.], 2007.

DOMINGUES, J. S. Critérios de Resistência. [S.l.], Abril 2003.

DUBROVSKY, V.; LYAKHOVITSKY, A. *Multi-Hull Ships*. [S.1.]: Backbone Publishing Company, 2001.

FALTINSEN, O. M. *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. [S.I.]: Cambridge University Press, 2005.

FINCKE, T.; LOBO, V.; BAçãO, F. Visualizing selg-organizing maps with gis. In: *GI Days 2008*. Munster: [s.n.], 2008.

FORMSYS. Seakeeper User Manual. [S.I.], 2011.

GALE, P. A. The ship design process. In: *Ship design and construction*. [S.l.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003.

GOTSHALL, S.; RYLANDER, B. Optimal population size and the genetic algorithm. [S.l.], 2001.

HAFEZ, K.; EL-KOT, A.-R. Comparative analysis of the separation variation influence on the hydrodynamic performance of a high speed trimaran. *Journal of Marine Science and Application*, v. 10, p. 377–393, 2011.

HEFAZI, H.; SCHIMITZ, A.; SHIDE, R. Automated multidisciplinary design optimization method for multi-hull vessels. California State University, Long Beach Foundation, 2005.

HORNELL, J. Water Transport: Origins & Early Evolution. [S.l.]: The University Press, 1946.

IMO. Annex 7 - Stability of multihull craft. In: International code of safety for high-speed craft (2000), 2008 edition. [S.l.: s.n.], 2008.

INSEL, M. Design Techniques for Advanced Marine Vehicles: Characteristics and Relative Merits of Advanced Marine Vehicles Types. [S.l.: s.n.], 2000.

INSEL, M.; DOCTORS, L. J. Wave pattern prediction of monohulls and catamarans in a shallow-water canal by linearised theory. In: *Twelfth Australian Fluid Mechanics Conference*. Sydney, NSW, Australia: [s.n.], 1995.

INSEL, M.; MOLLAND, A. F. An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans. [S.l.]: University of Southampton, 1990.

JACOBS, W. R. Estimation of stability derivatives and indices of various ship forms and comparison with experimental results. [S.1.], Setembro 1964.

JOURNEE, J. M. J. *Experiments and calculations on 4 wigley hull forms in head waves*. Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands, Novembro 2003. KALYANMOY, D. et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: Nsga-ii. In: *6th International conference on parallel problem solving from nature*. Paris, France: [s.n.], 2000.

KURULTAY, A. A. Sensitivity analysis of the seakeeping behavior of trimaran ships. Dissertação (Trabalho de Formatura) — Naval Postgraduate School, Monterey, Califórnia, Dezembro 2003.

Lloyd's Register. *The development of trimaran rules.* 71 Fenchurch Street, London, EC3M 4BS, UK: [s.n.], 2006.

LYON, T. D.; MISTREE, F. A computer-based method for the preliminary design of ships. *Journal of ship research*, v. 29, n. 4, Dezembro 1985.

MATULJA, D. et al. Estimation of added resistance of a ship in regular waves. *Brodogradnja Shipbuilding*, v. 62, n. 3, p. 259–264, 2011.

MICHELL, J. H. The wave resistance of a ship. *Philosophical Magazine*, v. 5, n. 45, p. 106–123, 1898.

MIGALI, A.; MIRANDA, S.; PENSA, C. Experimental study on the efficiency of trimaran configuration for high-speed very large ships. In: *International conference on fast sea transportation*. Southampton, UK: [s.n.], 2001.

MOLLAND, A. F.; WELLICOME, J. F.; COUSER, P. R. Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms: Variation of length-displacement ratio and breadth-draught ratio. [S.1.], 1994.

MOLLAND, A. F.; WELLICOME, J. F.; COUSER, P. R. Resistance experiments on a symmetric series of high speed displacement catamaran hull forms: Variation of length-displacement ratio and breadth-draugth ratio. *Transactions of RINA*, p. 55–72, 1996.

NORDFORSK. Assessment of ship performance in a seaway. [S.l.]: NORDFORSK, 1987.

One2three Naval Architects. 55 meters passenger ferry. 2013. Disponível em: http://www.one2three.com.au/t55.html>.

PARSONS, M. G. Parametric design. In: *Ship design and construction*. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003.

PARSONS, M. G.; SCOTT, R. L. Formulation of multicriterion design optimization problems for solution with scalar numerical optimization methods. *Journal of ship research*, v. 48, n. 1, Março 2004.

PAVLENKO, G. E. Selected papers. Naukova Dumka Pub. House, 1978.

RAO, S. S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Ltda., 2009.

RUGGERI, F. et al. Avaliação de embarcações rápidas para transporte de passageiros: Modelo de síntese. Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo, Agosto 2012. RUGGERI, F. et al. Avaliação de embarcações rápidas para transporte de passageiros: Revisão bibliográfica. Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo, Maio 2012.

SALVESEN, N.; TUCK, E. O.; FALTINSEN, O. Ship motions and sea loads. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Novembro 1970.

SAVITSKY, D. Panel on high speed marine vehicles. In: *Proceedings of the Sixteenth International Towing Tank Conference*. Leningrad: [s.n.], 1981.

SILVA, E. C. N. Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos. [S.l.], 2000.

SRIVASTAVA, S.; KALYANMOY, D. A genetic algorithm based augmented lagrangian method for computationally fast constrained optimization. In: *First international conference on swarm, evolutionary, and memetic computing.* Chennais, India: [s.n.], 2010.

TARAFDER, S. bin; KHALIL, G. bin; MAHMUD, S. M. Ikhtiar bin. Computation of wave-making resistance of wigley hull form using michell's integral. *The Institution of Engineers*, v. 68, n. 4, 2006.

TUTTLE, J.; KUEGELGEN, T. Biodiesel Handling and Use Guidelines. [S.I.], 2004.

ULTSCH, A. U*-matrix: a tool to visualize clusters in high dimensional data. In: *University of Marburg*. Marburg, Alemanha: [s.n.], 2003.

VOYTKUNSKY, Y. I. Resistance of water to ship motion. *Sudostroenie Pub. House*, 1988.

WATSON, D. G. M.; GILFILLAN, A. W. Some ship design methods. *Transactions RINA*, v. 119, 1977.

WU, G. X.; TAYLOR, R. E. A green's function form for ship motions at foward speed. International shipbuilding progress, v. 34, 1987.

WU, G. X.; TAYLOR, R. E. The numerical solution of the motions of a ship advancing in waves. In: 5th International conference on numerical ship hydrodynamics. Hiroshima: [s.n.], 1989.

XUEBIN, L. Multiobjective optimization and multiattribute decision making study of ship's principal parameters in conceptual design. *Journal of Ship Research*, v. 53, n. 2, Junho 2009.

YEH, H. Y. H. Series 64 resistance experiments on high speed displacement forms. In: *Marine Technology*. [S.l.: s.n.], 1965. p. 248–272.

YEUNG, R. W.; POUPARD, G.; TOILLIEZ, J. O. Interference resistance prediction and its application to optimal multi-hull configuration design. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, v. 112, p. 142–169, 2004.

ZHANG, J. W. Design and hydrodynamic performance of trimaran displacement ships. Tese (Doutorado) — University College London, 1997. ZHEN, C. bo et al. Study on fatigue strength of trimaran cross-deck structure based on spectral method. In: *Applied Mechanics and Materials*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 148-149, p. 393–396.

APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DA TEORIA DE NAVIO FINO

A.1 EFEITO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CASCO

O estudo realizado por Tarafder et al. (2006) avaliou a resistência de ondas de três cascos esbeltos com seções transversais parabólica, triangular e retangular, como mostrado na figura A.1, sendo os resultados inicialmente validados com o experimento realizado por Lackenby em 1965 para o casco *Wigley* parabólico.



Figura A.1: Tipos de cascos investigados por Tarafder et al. (2006).

Os resultados obtidos mostraram (ver figura A.2) que a forma do casco é importante no cálculo de resistência e não pode ser qualquer, no entanto, pequenas variações não levam a mudanças significativas do coeficiente de resistência de ondas, como pode ser visto na comparação dos cascos parabólico e triangular.



Figura A.2: Comparação do coeficiente de resistência de ondas para os três tipos de cascos (TARAFDER et al., 2006).

A.2 APLICAÇÃO DA TEORIA A CASCOS Wigley

A.2.1 Monocascos

Inicialmente, foi realizada a implementação numérica da teoria para uma embarcação monocasco, a fim de verificar a precisão das estimativas oferecidas pela sua aplicação. Para tanto escolheu-se o casco *Wigley* parabólico, descrito pela equação (A.1), na qual B é a boca do casco, L o comprimento e T o calado; $x \in z$ são as posições longitudinal e vertical, respectivamente. As dimensões do casco simulado são dadas na tabela A.1, e os resultados podem ser vistos na figura A.3, em que a linha preta contínua representa os resultados de Yeung et al. (2004) e os pontos em azul os resultados do método implementado. A concordância obtida é bastante satisfatória para toda a faixa de números de Froude estudada.

$$y(x,z) = \frac{B}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{L}\right)^2\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{T}\right)^2\right]$$
(A.1)

Tabela A.1: Dimensões principais do casco Wigley parabólico.

Dimensão	Valor
Comprimento (m)	6,0960
Boca (m)	$0,\!6096$
Calado (m)	$0,\!3810$



Figura A.3: Comparação do coeficiente de resistência de onda para o casco *Wigley*: Pontos azuis (método implementado); Linha preta contínua (YEUNG et al., 2004).

A.2.2 Catamarãs

Em seguida, para verificar que a extensão do método para multicascos é capaz de captar as interferências entre os cascos, este foi aplicado às embarcações catamarã, cujas dimensões podem ser vistas na tabela A.2, para dois valores de separação entre os cascos e comparados com a contribuição individual de cada casco (equivalente a separação infinita).

Tabela A.2: Dimensões principais do casco Wigley parabólico da embarcação catamarã.

Dimensão	Valor
Comprimento (m)	20,0
Boca (m)	$1,\!0$
Calado (m)	$1,\!0$

Os resultados podem ser vistos na figura A.4, em que os pontos em azul e em vermelho correspondem aos resultados do método implementado para os catamarãs com separação de, respectivamente, 5 e 9 metros.



Figura A.4: Comparação de coeficiente de resistência de onda para embarcação catamarã com cascos individuais *Wigley*, com diferentes valores de separação entre os cascos (RUG-GERI et al., 2012b).

A concordância entre os resultados é bastante satisfatória e corroboram as observações experimentais de Molland et al. (1996), de que, para configurações de catamarãs simétricos, a interferência entre os cascos sempre leva ao aumento da resistência ao avanço.

A.2.3 Trimarãs

E, por fim, foi realizada uma validação do modelo para embarcações do tipo trimarã. A figura A.5, mostra o coeficiente C_w calculado para um trimarã com os três cascos do tipo Wigley, em comparação com os resultados obtidos por Hafez e El-Kot (2011), cujo trabalho traz uma validação da rotina implementada e do programa *Hullspeed*, utilizado pelo autor.



Figura A.5: Validação da rotina de cálculo da resistência de ondas para um trimarã.

Nota-se que há uma uma boa concordância para números de Froude no intervalo [0, 15; 0, 45], e a partir de aproximadamente 0, 45, há um leve descolamento para menos, da ordem de 8%. Porém, dado que o objetivo do trabalho é comparar diferentes soluções usando a mesma ferramenta de cálculo, considera-se adequada a rotina implementada.

O casco utilizado para a validação é composto por três cascos do tipo Wigley, como ilustrado na figura A.6, e suas dimensões principais são dadas na tabela A.3.



Figura A.6: Casco utilizado para validação da rotina de cálculo do coeficiente de resistência de ondas (C_w) .

Parâmetro	Casco central	Casco lateral
Comprimento (m)	50,0	25,0
Boca (m)	5,00	2,50
Calado (m)	3,1250	1,5625
Coeficiente de bloco	0,4	44
Separação lateral (m)	6,	58
Separação longitudinal(m)	0,0	00

Tabela A.3: Dimensões do casco de validação.

A figura A.7 mostra uma comparação do coeficiente de resistência de ondas calculado para os cascos isolados, de acordo com a equação (A.2), e do coeficiente obtido para a embarcação como um todo.

$$C_w^{tri} = \frac{1}{S_w^{tri}} \cdot \left(C_w^{ch} \cdot S_w^{ch} + 2 \cdot C_w^{sh} \cdot S_w^{ch} \right)$$
(A.2)

Onde:

- C_w^{ch} é o coeficiente de resistência de ondas para o casco central isolado;
- C_w^{sh} é o coeficiente de resistência de ondas para um casco lateral isolado;
- S_w^{tri} é a área da superfície molhada total do trimarã, dada por $S_w^{tri} = S_w^{ch} + 2 \cdot S_w^{sh}$;
- $\bullet \; S^{ch}_w$ é a área da superfície molhada do casco central; e
- $\bullet \, S^{sh}_w$ é a área da superfície molhada de um casco lateral;



Figura A.7: Comparação entre o C_w da embarcação completa com o C_w dos cascos isolados (soma ponderada pela área molhada do C_w de cada casco.

Pode-se perceber que há regiões de interferência destrutiva e construtiva, conforme varia o número de Froude, ressaltando a importância de se avaliar corretamente o efeito da posição dos cascos laterais, de modo a se obter uma interferência destrutiva para o número de Froude de projeto.

APÊNDICE B – CÁLCULO DE PESOS E CENTROS

B.1 PESO LEVE

B.1.1 Estrutura

O peso estrutural é a soma do peso dos cascos, da superestrutura e da estrutura cruzada, que mantém os cascos unidos. A expressão do peso do casco foi adaptada do trabalho de Hefazi et al. (2005), mostrada na equação B.1.

$$W_{cascos_tri} = W_{ch} + 2 \cdot W_{sh} \tag{B.1}$$

Sendo a parcela referente a cada casco individual dada por:

$$W_{ch} = (0, 1 \cdot Sl_{ch} + 0, 2) \cdot (\nabla_d)_{ch} \cdot K_{ch}$$
(B.2)

$$W_{sh} = (0,05 \cdot Sl_{sh} + 0,6) \cdot (\nabla_d)_{sh} \cdot K_{sh}$$
(B.3)

Onde:

- Sl é o fator de esbeltez, dado por: $Sl = L/\nabla^{31}$;
- ∇_d é o volume definido para o casco até o pontal hidrodinâmico, dado pela expressão: $\nabla_d = Cb_{DR} \cdot L \cdot B \cdot DH;$
- DH é o pontal hidrodinâmico, dado por: $DH = T + \delta_{DH}$;
- Cb_{DH} é o coeficiente de bloco calculado até o pontal hidrodinâmico, dado por: $Cb_{DH} = C_b/C_m \cdot T/\delta_{DH} \cdot (C_m + (\delta_{DH} - T)/T);$
- $\delta_{DH} = (1 + K_{\delta_{DH}}) \cdot T$, sendo que a constante δ_{DH} é dada na tabela B.1.

¹Nota: O fator de esbeltez é calculado em função do volume deslocado do casco no calado de projeto, ∇ , que não deve ser confundido com o volume até o pontal hidrodinâmico, ∇_d .

O peso da superestrutura, que leva em consideração passadiço, sala de bagagens e convés de passageiros, é estimado por:

$$W_{SS} = [(N_{pas} + N_{trip})/470 + 0,94] \cdot K_{SS} \cdot \nabla$$
(B.4)

E para finalizar o cálculo do peso estrutural, o peso da estrutura cruzada, que unirá os cascos e dará suporte aos conveses e a superestrutura, é estimado de maneira preliminar através do dimensionamento de uma estrutura equivalente, composta por cilindros de aço dispostos transversalmente na região que conecta os diferentes cascos. Tal hipótese se faz necessária para que o peso da estrutura possa ser facilmente avaliado, através de equações analíticas simples, mas não significa que a estrutura final será assim construída.

Os cilindros são de tamanho fixo, em função do pontal da embarcação, e o seu número é incrementado até que se atinja uma tensão equivalente aceitável, calculada pelo critério de Tresca, mais conservador que o de Von Mises, conforme explicado por Domingues (2003). Os momentos são calculados de acordo com as recomendações da Lloyd's (Lloyd's Register, 2006) e a espessura do cilindro é de 10% do seu diâmetro. A tensão de escoamento do aço naval considerado foi de 355 MPa, e foi adotado um coeficiente de segurança igual a 1,15.

As constantes retiradas do trabalho de (HEFAZI et al., 2005) são apresentadas na tabela B.1.

Coeficiente	Valor
K_{ch}	$0,\!075$
K_{sh}	0,100
K _{casco}	0,075

0,04

0,080

1

K_{SS}

 K_A

 $K_{\delta_{DH}}$

Tabela B.1: Constantes de peso e air gap.

A expressão para o peso estrutural fica então dada pela equação B.5:

$$W_S = W_{cascos} + W_{SS} + W_{st} \tag{B.5}$$

B.1.2 Máquinário

O peso do maquinário é dado pela equação B.6, sendo os pesos individuais de cada motor, W_{motor} , e hidrojato, $W_{hidrojato}$, obtidos a partir dos catálogos dos frabricantes.

$$W_M = N_{hidro\,jatos} \cdot W_{hidro\,jato} + N_{motores} \cdot W_{motor} + W_{aux} \tag{B.6}$$

O peso dos sistemas auxiliares, W_{aux} , foi estimado por:

$$W_{aux} = K_m \cdot (MCR)^{0,7} \tag{B.7}$$

Onde a constante K_m vale 0,83 para navios de passageiros e balsas, e a potência MCR está em kW.

B.1.3 Acabamento

No trabalho de (HEFAZI et al., 2005), são considerados três divisões de peso que foram unificadas em peso de acabamento no presente trabalho. São elas o peso de variedades do casco, variedades da embarcação e acabamento propriamente dito. As variedades do casco e da embarcação levam em consideração rampas de aceso, escadas, vigas de sustentação dos conveses, balaustradas, etc., enquanto o acabamento leava em consideração tubulações, âncoras, leme e máquina do leme, sistema de ventilação, etc.

Assim sendo, o peso do acabamento é dado pela equação B.8, com a constante relacionada igual a soma das constantes utilizadas no trabalho original.

$$W_A = K_A \cdot \nabla \tag{B.8}$$

B.1.4 Margem

A margem de projeto adotada para o peso leve, dado que o modelo estudado é ainda bastante preliminar, foi de 10%. A margem média sugerida por (PARSONS, 2003) é de 5,9%, com um desvio padrão de +11, 1/-5, 9%.

B.2 DWT

B.2.1 Passageiros e bagagens

Tanto o peso dos passageiros quanto das bagagens são função do número de passageiros e do peso médio respectivo adotado por passageiros, \overline{W}_{pas} e \overline{W}_{bag} , conforme mostrado nas equações B.9 e B.10.

$$W_{pas} = N_{pas} \cdot \overline{W}_{pas} \tag{B.9}$$

$$W_{bag} = N_{pas} \cdot \overline{W}_{bag} \tag{B.10}$$

Os valores adotados, de acordo com as recomendações da (IMO, 2008), são $\overline{W}_{pas} = 80 \, kg$ e $\overline{W}_{bag} = 40 \, kg$.

B.2.2 Combustível

Uma vez calculado o volume de combustível necessário, o peso pode ser encontrado pela simples multiplicação do volume pelo peso específico do combustível.

$$W_{comb} = Vol_{comb} \cdot \rho_{comb} \tag{B.11}$$

Adotou-se que o combustível utilizado será o diesel naval #2, cujo peso específico médio é $0.85 t/m^3$, de acordo com (TUTTLE; KUEGELGEN, 2004).

B.2.3 Serviço

Foram unificados em peso de serviço todos os pesos variáveis essenciais para o funcionamento correto da embarcação, mas cuja significância individual é baixa. São estes os pesos da tripulação e seus pertences, provisões, água potável e óleo lubrificante, conforme a equação B.12.

$$W_{serv} = W_{trip} + W_{prov} + W_{\acute{a}gua} + W_{lub}$$
(B.12)

Onde cada parcela é dada por (PARSONS, 2003):

$$W_{trip} = 0,17 \cdot N_{trip} \tag{B.13}$$

$$W_{prov} = 0,01 \cdot N_{trip} \cdot N_{dias} \tag{B.14}$$

$$W_{água} = (0, 17 \cdot N_{trip} + 0, 01 \cdot N_{pas}) \cdot N_{dias}$$
(B.15)

Nas equações acima, N_{trip} é o número de tripulantes, N_{pas} é o número de passageiros e N_{dias} é a autonomia em dias, isto é, o número de dias entre um reabastecimento e outro. A parcela de peso do óleo lubrificante é de 20 t.

B.3 CENTROS

Os centros longitudinais dos cascos foram adotados a meio comprimento entre perpendiculares de cada casco. Para o casco central, o centro vertical foi adotado a meio pontal, enquanto para os cascos laterais, adotou-se o centro vertical na linha d'água. Tais aproximações são razoáveis pois os cascos são bastante esbeltos, com uma razão de comprimento por boca em geral superior a 14.

Em relação ao sistema de propulsão, conhecidas as posições dos motores e hidrojatos, os centros de massa são facilmente calculados. Assumiu-se que tanto os motores quanto os hidrojatos tem uma distribuição homogênea de massa no interior do bloco que os representa, e que o peso dos sistemas auxiliares da praça de máquinas é distribuído igualmente ao longo da mesma.

Os espaços foram todos representados por paralepípedos, tendo sido assumida uma distribuição homogênea de peso, de forma que os centros de massa coincidem com os centros geométricos de cada espaço considerado.

B.4 INÉRCIAS

A determinação das inércias de massa é fundamental para obtenção do comportamento em ondas da embarcação. A expressão B.16 apresenta as inércias consideradas.

$$I_{t} = I_{motores} + I_{hidrojatos} + I_{comb} + I_{pas} + I_{bag} + I_{carga}$$
$$+ I_{leo} + I_{gua} + I_{ss} + I_{st} + I_{cascos}$$
(B.16)

Sendo as inércias dos cascos estimadas preliminarmente a partir do raio de giração da embarcação, dados na tabela B.2, conforme a equação B.17.

$$I_{cascos} = \left[(I_{cascos})_x, (I_{cascos})_y, (I_{cascos})_z \right]$$
$$I_{cascos} = W_{cascos} \cdot \left[R_x^2, R_y^2, R_z^2 \right]$$
(B.17)

Raio de giração	Fórmula adotada
R_{x}	$0,35 \cdot B_{oa}$
R_y	$0, 3 \cdot L_{oa}$
R_z	$0, 3 \cdot L_{oa}$

Tabela B.2: Raio de giração para estimativa de inércia dos cascos.

Os demais sistemas considerados foram todos modelados preliminarmente como paralelepípedos, facilitando as estimativas de pesos e centros e concomitantemente o cálculo das inércias, equação B.18.

$$I_{bloco} = I_0 + I_d \tag{B.18}$$

Onde I_0 é a inércia própria, em relação ao centro de massa do sistema em questão, e I_d é a inércia de translação ou deslocamento, em relação ao centro de massa da embarcação. As inércias próprias são calculadas para os eixos principais de inércia, que coincidem com os eixos x, y e z, e passam pelo centro de gravidade do sistema, de forma que não há termos cruzados de inércia. As inércias própria e de deslocamento são então dadas por três coordenadas I_x , $I_y I_z$, e podem ser cálculadas segundo as equações B.19 a B.24.

$$(I_0)_x = M \cdot (B^2 + H^2)/12 \tag{B.19}$$

$$(I_0)_y = M \cdot (L^2 + H^2) / 12 \tag{B.20}$$

$$(I_0)_z = M \cdot (L^2 + B^2) / 12 \tag{B.21}$$

$$(I_d)_x = M \cdot (d_y^2 + d_z^2)$$
(B.22)

$$(I_d)_y = M \cdot (d_x^2 + d_z^2)$$
(B.23)

$$(I_d)_z = M \cdot (d_x^2 + d_y^2)$$
(B.24)

Sendo L, B e H respectivamente o comprimento, a largura e a altura dos blocos e d_x , $d_y e d_z$ respectivamente as distâncias entre os pares de eixos x, y e z que passam pelo centro de gravidade do bloco e pelo centro de gravidade da embarcação, em cada direção x, y e z.

APÊNDICE C – Comparação do comportamento no Mar

C.1 OPERADORES DE AMPLITUDE DE RESPOSTA - RAO

Os operadores de amplitude de resposta representam a função de transferência da embarcação, isto é, mostram o quanto a embarcação irá se deslocar em função da onda incidente. Neste apêndice são comparados os resultados obtidos com o Wamit[®] e com o Seakeeper[®], para os movimentos de afundamento (*heave*) e arfagem (*pitch*) com mar de proa, como mostrado, respectivamente, nas figuras C.1 e C.2.

Os valores do movimento de afundamento são adimensionalizados pela altura de onda, ou seja, mostram quantos metros terá a amplitude do movimento para cada metro de altura da onda incidente, enquanto o movimento de arfagem é adimensionalizado pela declividade da onda, isto é, de quantos graus a embarcação irá girar em torno do eixo y para cada grau de declividade da onda.



Figura C.1: Comparação do RAO de afundamento (*heave*).

Há razoável concordância da tendência geral para o RAO de afundamento, embora o

primeiro pico seja capturado por cada programa com uma diferença de períodos bastante significativa. O Seakeeper[®] fornece uma estimativa ligeiramente superior à do Wamit[®], e com o aumento do período, as ondas se tornam mais longas e a embarcação tende a se movimentar juntamente com elas, o que é mostrado pelo fato de ambas as curvas tenderem para o valor unitário.



Figura C.2: Comparação do RAO de arfagem (*pitch*).

Para o RAO de arfagem, há boa concordância até aproximadamente 8 segundos, e depois o valor do Seakeeper[®] tende para 0,8, enquanto o Wamit[®] tende para 1, como seria esperado.

Boyd (apud FORMSYS, 2011) lista possíveis causas de comportamentos não lineares e outros efeitos que podem tornar a teoria de faixas imprecisa, dentre eles:

- Emersão ou submersão da proa ou popa;
- Costado não vertical na região da linha d'água; e
- Efeitos tridimensionais do fluxo e interação longitudinal, incluindo sustentação dinâmica em avanço.

Sendo assim, faz-se necessário um estudo mais detalhado para investigar as discrepâncias observadas entre os dois modelos.

APÊNDICE D – PRINCIPAIS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

D.1 MÉTODOS ANALÍTICOS CLÁSSICOS

Dentre os diversos métodos analíticos, pode-se citar como clássicos o cálculo diferencial e o cálculo variacional, além do método dos multiplicadores de Lagrange, para problemas com restrições. Tais métodos ilustram bem os conceitos básicos de otimização (SILVA, 2000).

D.1.1 Cálculo diferencial

A condição necessária para que uma função de uma variável tenha um ponto de mínimo é:

$$\frac{df}{dx} = 0 \tag{D.1}$$

No entanto, esta condição não é suficiente, pois o ponto em questão pode ser de mínimo ou de máximo. A condição suficiente é dada pela análise da segunda derivada da função:

- \bar{x} é ponto de mínimo se $\frac{d^2f}{dx^2}\Big|_{\bar{x}} > 0$ e;
- $\bullet \, \bar{x}$ é ponto de máximo se $\left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{\bar{x}} < 0$

Para funções multivariáveis $f(x_1, x_2, ..., x_n)$, a condição necessária para que \bar{x} seja ponto de mínimo ou máximo é dada pela equação:

$$df = \sum_{i} \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i = 0 \tag{D.2}$$

O que ocorrerá quando cada derivada parcial $\frac{\partial f}{\partial x_i}\Big|_{\bar{x}}$ for nula.

A condição suficiente é dada pela matriz Hessiana de f, que agrupa todas as segundas derivadas da função:

• \bar{x} é ponto de mínimo se \bar{H} (matriz hessiana avaliada no ponto \bar{x}) é positiva definida;

- \bar{x} é ponto de máximo se \bar{H} é negativa definida;
- \bar{x} é ponto de cela se \bar{H} é indefinida e;

Caso \bar{H} seja semi-definida (positiva ou negativa), são necessárias derivadas de maior ordem para determinar se é ponto de mínimo ou máximo.

D.1.2 Multiplicadores de Lagrange

D.1.2.1 Restrições de igualdade

A existência de restrições de igualdade em um dado problema faz com que as variáveis de projeto deixem de ser independentes entre si, de modo que não se pode mais garantir que o ponto de mínimo (ou máximo) ocorrerá quando a primeira derivada for nula.

Tomando um problema com n variáveis de projeto e n_r restrições de igualdade, com $n_r < n$, tem-se:

$$dh_j = \sum_i \frac{\partial h_j}{\partial x_i} dx_i = 0 \tag{D.3}$$

Multiplicando cada derivada dh_j por uma constante λ_j , e somando a df, tem-se:

$$df + \sum_{j=1}^{n_r} \lambda_j \cdot dh_j = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{\bar{x}} + \sum_{j=1}^{n_r} \lambda_j \cdot \frac{\partial h_j}{\partial x_i} \Big|_{\bar{x}} \right) dx_i = 0$$
(D.4)

Ou seja, transforma-se o problema de otimização com restrições em um problema sem restrições, cuja função objetivo passa a ser: $L(x, \lambda_j) = f(x) + \sum_j \lambda_j \cdot h_j(x)$.

A esta nova função L, dá-se o nome de Lagrangeano. O sistema de equações a ser resolvido, de $n + n_r$ equações com $n + n_r$ incógnitas $(x_1, \ldots, x_n, \lambda_1, \ldots, \lambda_{n_r})$, fica:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^{n_r} \lambda_j \cdot \frac{\partial h_j}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, \dots, n; \\ h_j(x) = \frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = 0 \qquad \qquad j = 1, \dots, n_r; \end{cases}$$
(D.5)

D.1.2.2 Restrições de desigualdade

Para considerar n_d restrições de desigualdade, da forma $g_k(x) \leq 0$, $k = 1, ..., n_d$, usa-se uma função auxiliar $t_k(x)$, transformando as restrições de desigualdade em restrições de igualdade, através da expressão:

$$g_k(x) - t_k^2(x) = 0$$
 (D.6)

Assim, o Lagrangeano fica:

$$L(x,\lambda_k,t_k) = f(x) + \sum_k \lambda_k \cdot \left(g_k(x) - t_k^2(x)\right)$$
(D.7)

O ponto de mínimo deve satisfazer:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 & i = 1, \dots, n; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_k} = g_k(x) - t_k^2(x) = 0 & k = 1, \dots, n_r; \\ \frac{\partial L}{\partial t_k} = -2 \cdot \lambda_k \cdot t_k = 0 & k = 1, \dots, n_r; \end{cases}$$
(D.8)

Como $t_k = 0 \Leftrightarrow g_k = 0$, tem-se da última equação que:

$$\lambda_k \cdot t_k = 0 \Rightarrow \lambda_k \cdot g_k = 0 \tag{D.9}$$

A equação (D.9) é denominada condição de complementaridade, e indica que:

$$\begin{cases} se \ \lambda_k = 0 \Rightarrow g_k \neq 0 & - \text{ restrição inativa} \\ se \ \lambda_k \neq 0 \Rightarrow g_k = 0 & - \text{ restrição ativa} \end{cases}$$
(D.10)

D.1.3 Cálculo variacional

O cálculo variacional é utilizado quando a variável que se deseja encontrar é uma função, e.g. a função que representa a distribuição de área seccional ao longo do comprimento de um navio.

Primeiramente, defini-se um funcional J como:

$$J(y(x)) = \int_{a}^{b} F(x, y(x), y'(x)) dx$$
 (D.11)

Onde:

•
$$y'(x) = dy(x)/dx;$$

• $y(a) = y_a e y(b) = y_b$ são as condições de contorno cinemáticas do problema. Quando constantes, o problema é dito de extremidades fixas;

Seja a função $\bar{y}_{(x)}$ a função que minimize (ou maximize) o funcional J e satisfaça as condições de contorno cinemáticas. Pode-se escrever:

$$y(x) = \bar{y}(x) + \varepsilon \cdot \eta(x) \tag{D.12}$$

Onde ε tem valor pequeno, e $\eta(a) = \eta(b) = 0$, para satisfazer as condições de contorno $y(a) = y_a e y(b) = y_b$.

A ideia básica por trás do cálculo é obter a função $\bar{y}(x)$, que extremiza o funcional, através da alteração de uma função inicial y(x) pela soma de uma função $\epsilon \eta(x)$. A figura D.1 ilustra tal procedimento.



Figura D.1: Variação da função y(x).

D.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

Para problemas de difícil solução analítica, utilizam-se métodos numéricos de otimização. Estes podem ser divididos em dois grandes grupos: os métodos de programação matemática e os métodos probabilísticos.

O métodos de programação matemática podem ser classificados em:

- Programação linear;
- Programação não-linear:
 - Problemas sem restrição; e
 - Problemas com restrição.
- Programação sequencial:
 - Linear (*PLS*); e
 - Quadrática (*PQS*).

Entre os métodos probabilísticos há o algoritmo genético e o recozimento simulado (*si-mulated annealing*).

Os métodos matemáticos se baseiam no cálculo das derivadas (gradiente) da função e fornecem um mínimo local, sendo indicados quando tal cálculo está disponível. Já os métodos probabilísticos buscam o mínimo global, utilizando-se de um processo de busca aleatória guiada por decisões probabilísticas. São ótimas ferramentas para tratar problemas com variáveis discretas.

D.2.1 Programação linear

São os métodos destinados a resolver os problemas de otimização lineares, isto é, problemas nos quais a função objetivo e as restrições são funções lineares das variáveis de projeto:

$$min(f(x)); f(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot x_i;$$
(D.13)
sujeito à
$$\begin{cases} h_j(x) = \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot x_i; \ j = 1, \dots, n_h; \\ g_k(x) = \sum_{i=1}^{n} c_i \cdot x_i; \ k = 1, \dots, n_g; \end{cases}$$

Devido a natureza linear da função objetivo, os gradientes são constantes não necessariamente nulas, o que implica que a solução encontrar-se-á na fronteira definida pelas equações de restrição (não há gradientes nulos no interior). A figura D.2 ilustra um problema tridimensional $f(x_1, x_2, x_3)$, na qual estão representadas as curvas de nível de fe o contorno que delimita o domínio viável, denominado polítope.



Figura D.2: Solução de um problema de otimização linear no espaço tridimensional.

Para resolver tal problema, citam-se dois métodos clássicos: 1) o *Simplex*, que transforma o problema em um problema de programação linear padrão, através da introdução de variáveis auxiliares quando necessário, procurando dessa forma a solução ótima a partir da análise dos vértices viáveis, como mostra a figura D.3(a); e 2) o *Algoritmo de Kamarkar*, que busca a solução ótima através do cálculo, a cada iteração, de uma direção a ser seguida



para minimizar a função objetiva, como mostrado na figura D.3(b).

Figura D.3: Comparação entre os caminhos seguidos pelos métodos Simplex e de Kamarkar.

D.2.2 Programação não-linear

São os métodos desenvolvidos para solução de problemas em que a função objetivo e/ou as restrições não são lineares, e podem ser divididos em dois grandes grupos: com e sem restrições.

D.2.2.1 Problemas de otimização sem restrições

Os métodos para solução de problemas de otimização não-lineares calculam, a cada iteração, uma direção (s) a ser seguida, e então realizam uma otimização unidimensional para encontrar o quanto devem andar (α) na dada direção antes de escolher uma nova direção, como descrito na equação (D.14):

$$x_{i+1} = x_i + \alpha \cdot s_i$$

$$f(x_{i+1}) = f(x_i + \alpha \cdot s_i) = f(\alpha) \qquad \Rightarrow \quad \min(f(\alpha)) \qquad (D.14)$$

Esses métodos são classificados em três ordens, com base na informação necessária da função objetivo:

Ordem zeroUtilizados quando se tem baixa precisão no valor obtido para a função objetivo, fazendo com que os valores dos gradientes não sejam confiáveis. Cita-se o método das direções conjugadas de Powell.

- **Primeira ordem**Utilizam as informações dos gradientes da função objetivo para encontrar o ponto de ótimo, e podem apresentar convergência linear ou superlinear (dependendo de como se comporta a diminuição da distância entre o ponto atual e o ótimo, ao longo das iterações). Citam-se os métodos *Steepest descent* e das direções conjugadas ou Fletcher-Reeves.
- Segunda ordemTais métodos utilizam o valor da função objetivo, seus gradientes e sua matriz Hessiana. Citam-se os métodos de Newton e de Quasi-Newton.

D.2.2.2 Problemas de otimização com restrições

Em problemas de otimização com restrições, não é mais possível garantir que o ponto de máximo ou mínimo irá se encontrar em uma região cuja derivada ou gradiente seja nulo, uma vez que tal ponto pode se encontrar sobre uma ou mais restrições (restrições ativas). Para resolver tais problemas, citam-se os conceitos e métodos listados a seguir:

- Condições KKT;
- Multiplicadores de Lagrange;
- Definição de problemas convexos;
- Ponto de sela;
- Dualidade;
- Programação quadrática;
- Métodos diretos:
 - Gradientes reduzidos e projeção dos gradientes;
 - Direções admissíveis;
- Métodos indiretos
 - Penalização exterior;
 - Penalização interior;
 - Penalização interior estendida;
 - Lagrange aumentado.

D.2.3 Programação sequencial

São métodos baseados em teoria de aproximações, cuja ideia é solucionar o problema inicial, no qual a função objetivo e as restrições não são lineares, através de sua aproximação por sucessivos subproblemas lineares ou quadráticos. A função objetivo e as restrições são aproximadas por séries de Taylor, e o processo de otimização é realizado com as variáveis de projeto limitadas à vizinhança do ponto em análise pelos chamados limites móveis. A figura D.4 ilustra o processo.



Figura D.4: Procedimento sequencial linear.

D.2.4 Algoritmo genético

O algoritmo genético é um método para resolução de problemas de otimização com ou sem restrições, baseado no processo de seleção natural, o mesmo processo que rege a evolução biológica, segundo Darwin. O algoritmo genético modifica uma população de soluções individuais repetidas vezes, e a cada iteração, seleciona ao acaso indivíduos dessa população para gerarem os indivíduos da próxima geração. Ao longo de sucessivas iterações, a população "evolui" para uma solução ótima.

Tal método pode ser aplicado a diversos problemas de otimização que de outra maneira não seriam bem avaliados pelos métodos de otimização clássicos, como por exemplo, problemas cuja função objetivo é descontinua, não-derivável, estocástica ou até mesmo altamente não-linear. O algoritmo genético faz uso de três regras básicas a cada iteração para criar a próxima geração:

- Regra de seleção: Seleciona os indivíduos que darão origem à próxima geração.
- Permutação (*crossover*): Combina dois dos indivíduos escolhidos para formar um indivíduo da próxima geração.

• Mutação: Aplica mudanças aleatórias a um dos indivíduos escolhidos para formar um indivíduo da próxima geração.

O algoritmo genético difere dos algoritmos baseados no gradiente de duas maneiras principais, como pode ser visto na Tabela D.1.

Algoritmo clássico	Algoritmo genético
Gera um único ponto a cada	Gera uma população de pontos a
iteração, e a sequência de pontos	cada iteração e o melhor indivíduo
tende à solução ótima	da mesma tende à solução ótima
Seleciona o próximo ponto na	Usa um gerador de números
sequência de maneira	aleatórios para gerar a próxima
determinística	população

Tabela D.1: Principais diferenças entre o algoritmo genético e os algoritmos clássicos.

D.2.5 Recozimento simulado (Simulated Annealing)

O recozimento simulado foi criado em analogia ao processo mecânico de recozimento, no qual um material, em geral um metal, é reaquecido e depois resfriado lentamente, de modo que os átomos tenham tempo para assumir as posições que minimizam a energia potencial. No processo de otimização, os valores da função objetivo são equivalentes aos estados de energia e as variáveis de projeto equivalem às configurações dos átomos. A temperatura inicial do recozimento está associada a um parâmetro que controla a convergência da solução, valores muito baixos permitem pouca movimentação dos átomos (variáveis de projeto), fazendo com que haja rápida convergência porém com baixa probabilidade de se atingir o mínimo global. Valores altos garantem uma alta probabilidade de se atingir o mínimo global, mas aumentam o custo computacional.