

RODRIGO ACHILLES SCHILLER

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM NAVIOS MERCANTES E
ESTUDO DE CASO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM NAVIO
ALVIADOR DO TIPO SUEZMAX**

São Paulo

2016

RODRIGO ACHILLES SCHILLER

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM NAVIOS MERCANTES E
ESTUDO DE CASO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM NAVIO
ALIVIADOR DO TIPO SUEZMAX**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Ciências**

**Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica**

**Orientador:
Prof. Dr. Kazuo Nishimoto**

**São Paulo
2016**

Catálogo-na-publicação

Schiller, Rodrigo Achilles

Análise da eficiência energética em navios mercantes e estudo de caso do consumo de combustível em navio aliviador do tipo Suezmax / R. A. Schiller -- São Paulo, 2016.

111 p.

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

1.Controle de emissões 2.Redução de velocidade 3.Eficiência energética 4.Navio petroleiro Suezmax 5.Operações de alívio I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Pedro e Mariza e à minha
namorada Audrey que são os alicerces da
minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Kazuo Nishimoto pela orientação e pelo apoio ao meu desenvolvimento profissional.

Aos professores Claudio Muller e Bernardo pela ajuda e conselhos na elaboração do trabalho.

Aos amigos do TPN Piter, Dotta, Máximo, PG, Watai, Feitosa e Lavinho e a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

Particular agradecimentos a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, por me promover auxílio financeiro na forma de uma bolsa de estudos.

E em especial à minha namorada Audrey por todo o apoio e incentivo fornecidos.

RESUMO

A necessidade de reduzir o consumo de combustíveis fósseis, por conta do cenário atual de tentar frear os efeitos do aquecimento global e de reduzir a poluição atmosférica, vem ditando uma série de transformações no setor de transporte naval.

Este trabalho apresenta, inicialmente, as mudanças no âmbito normativo na questão do controle de emissões de poluentes e de eficiência de consumo de combustíveis em navios mercantes. Em seguida, com foco nas embarcações existentes, são apresentadas as principais técnicas operacionais com grande potencial de redução de consumo de combustível, destacando o método da redução da velocidade de navegação que, corretamente aplicado, tem impacto positivo tanto na redução dos custos operacionais, quanto no aumento expressivo de eficiência energética.

Por fim, foi realizada uma análise numérica da variação do consumo de combustível em função da velocidade de um navio petroleiro Suezmax, adaptado para operações de alívio dos FPSOs em águas brasileiras. Com isso, estimou-se o potencial de aumento da eficiência energética da embarcação a partir de pequenas reduções de velocidade, e discutiu-se as possíveis aplicações desta melhoria, a partir do perfil operacional característico do navio tipo, de modo a não causar impacto econômico na operação.

O estudo, ainda, avaliou a aplicação de duas metodologias numéricas diferentes, uma baseada apenas em equações de regressão, semi-empírica, e outra utilizando simulações de CFD para a estimativa de parâmetros sensíveis a forma do casco e de grande relevância para a determinação dos consumos característicos, analisando imprecisões e impactos no resultado final.

Apesar de apresentarem resultados com diferenças significativas, as duas metodologias utilizadas obtiveram índices semelhantes de redução de consumo por viagem, apontando grande potencial de redução a partir de pequenas variações de velocidade.

Palavras-chave: controle de emissões, redução de velocidade, eficiência energética, navio petroleiro Suezmax, operações de alívio.

ABSTRACT

The need to reduce fossil fuels consumption, due to the current scenario of trying to restrain global warming effects and reduce air pollution, is dictating a series of transformations in shipping.

This study presents, at first, the changes in the regulatory framework concerning pollutant emissions control and fuel consumption efficiency on merchant ships. Secondly, the main operational techniques with high potential of reducing fuel consumption are discussed, with focus on existing vessels, and the speed reduction method is highlighted, for it has a positive impact on both operating costs reduction and energy efficiency increase if correctly applied.

Finally, a numerical analysis of the fuel consumption variation with the speed was carried out for a Suezmax oil tanker, which has been adapted to offloading operations of FPSOs in Brazilian waters. Consequently, estimating the potential of the vessel energy efficiency increase from small speed rate reductions and discussing the possible applications of this improvement, taking into account the typical operating profile of the vessel in such a way to avoid economic impacts on the operation.

This analysis also evaluated the application of two different numerical methods, one based only on regression equations, semi-empirical, and another that used CFD simulations for estimating the hull shape parameters that are most relevant for determining fuel consumption, analyzing inaccuracies and impact on the final results.

Despite presenting results with significant differences, the two methodologies produced similar consumption reduction rates per trip, suggesting a high reduction potential from small variations in speed.

Key words: emissions control, speed reduction, energy efficiency, Suezmax oil tanker, offloading operations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Áreas de Controle de Emissão (ECA) (DuPont, 2015).....	11
Figura 2 - Regra para a redução de emissão de CO2 para novos projetos (IMO, 2016).....	15
Figura 3 - Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) (ABS, 2013).....	16
Figura 4 - Linha do tempo com as principais tendências de normas ambientais	18
Figura 5 - Nível de redução de velocidades e de <i>slow steaming</i> (Kowalak, 2012)....	30
Figura 6 - Modelo numérico baseado na metodologia de Holtrop e Mennen (1982).42	
Figura 7 - Metodologia proposta para a estimativa do consumo de combustível de navios	50
Figura 8 - Plano de linhas cotado a partir da perpendicular de ré	52
Figura 9 - Popa e proa da embarcação.....	52
Figura 10 - Modelo em escala 1:70 do casco da embarcação Nordic Spirit.....	53
Figura 11 - Layout do domínio computacional e condições de contorno.....	55
Figura 12 - Malha hexaédrica na região do bulbo da embarcação.....	56
Figura 13 - Definição dos casos para determinar a região de operação	57
Figura 14 - Definição da região de operação de navegação.....	58
Figura 15 - Região de operação com as curvas de nível de consumo.....	58
Figura 16- Operação de offloading ou de alívio [Fontes:Bluewater e PRN online]....	61
Figura 17- Bacia de Santos e seus principais campos de exploração [Fonte: Petrobras]	63
Figura 18 - Perfil operacional teórico do navio aliviador Suezmax considerado no caso exemplo.....	64
Figura 19 - Curva de consumo específico do motor selecionado (MAN, 2014)	66
Figura 20 - Malha de calados por velocidades representando os casos simulados para a determinação da região de operação	68
Figura 21 - Comparação da resistência ao avanço entre o modelo simulado em CFD e o ensaio de reboque realizado no IPT	69
Figura 22 - Resistência ao avanço estimada pelo método de Holtrop e Mennen (1982)	71

Figura 23 - Resistência ao avanço estimada a partir do fator de forma obtido em CFD	71
Figura 24 - Campo de velocidades no plano dos hélices dos modelos.....	73
Figura 25 - Linhas de fluxo na região da popa do navio e o campo de velocidades na região do propulsor	73
Figura 26 - Comparação do coeficiente de esteira (w) estimado a partir do CFD com o obtido pela regressão de Holtrop e Mennen (1982) para a velocidade de 14 nós.....	74
Figura 27 - Comparação entre os coeficientes propulsivo (cP) obtido através da aplicação das equações de regressão de Holtrop e Mennen (1982) (HM) e a metodologia proposta (MP) que utiliza simulações em CFD para as estimativas de k e w	75
Figura 28 - Curvas de potência de máquinas estimada pelo método de Holtrop e Mennen (1982) para o hélice de diâmetro 7,2m	77
Figura 29 - Curvas de potência de máquinas estimada pela metodologia proposta para o hélice de diâmetro 7,2m.....	77
Figura 30 - Curvas de potência de máquinas estimada pelo método de Holtrop e Mennen (1982) para o hélice de diâmetro 8,6m	78
Figura 31 - Curvas de potência de máquinas estimada pela metodologia proposta para o hélice de diâmetro 8,6m.....	78
Figura 32 - Região de operação do modelo com propulsor 7,2m estimada a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM)	80
Figura 33 - Região de operação do modelo com propulsor de 7,2m estimada a partir da metodologia proposta (MP).....	80
Figura 34 - Região de operação do modelo com propulsor 8,6m estimada a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM)	81
Figura 35 - Região de operação do modelo com propulsor de 8,6m estimada a partir da metodologia proposta (MP).....	81
Figura 36 - Avaliação da variação do consumo por viagem no modelo com propulsor 7,2m estimada a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM).....	83
Figura 37 - Avaliação da variação do consumo por viagem no modelo com propulsor de 7,2m estimada a partir da metodologia proposta (MP)	83

Figura 38 - Avaliação da variação do consumo por viagem no modelo com propulsor 8,6m estimada a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM).....	84
Figura 39 - Avaliação da variação do consumo por viagem no modelo com propulsor de 8,6m estimada a partir da metodologia proposta (MP)	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de medidas consideradas no SEEMP (Lloyds, 2012)	20
Tabela 2 – Principais fatores operacionais que podem gerar uma maior eficiência no consumo de combustível de embarcações em operação (ABS, 2013).....	21
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do slow steaming (IMO, 2016b)	31
Tabela 4 - Avaliação da redução de consumo por velocidade de um navio Aframax petroleiro.....	34
Tabela 5 - Avaliação da redução de consumo por velocidade de um navio VLCC petroleiro.....	35
Tabela 6 - Fatores de escala.....	53
Tabela 7- Dimensões principais da embarcação Nordic Spirit e do modelo em escala 1:70.....	54
Tabela 8 - Dados dimensionais e geométricos do casco em função da variação do calado	65
Tabela 9 - Características dos propulsores.....	66
Tabela 10 - Relação entre os calados em escala real e 1:70.....	68
Tabela 11 - Relação entre as velocidades de avanço em escala real e 1:70.....	68
Tabela 12 - Diferenças entre as resistências ao avanço calculadas na simulação em CFD e o ensaio de reboque realizado no IPT	69
Tabela 13 - Comparação entre os fatores de forma obtidos nas simulações em CFD com os estimados pela regressão de Holtrop e Mennen (1982).....	70
Tabela 14 - Resultados de consumos e de <i>IRC</i> para o modelo de propulsor com $D=7,2m$ estimados a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM).....	86
Tabela 15 - Resultados de consumos e de <i>IRC</i> para o modelo de propulsor com $D=7,2m$ estimados a partir da metodologia proposta (MP).....	87
Tabela 16 - Resultados de consumos e de <i>IRC</i> para o modelo de propulsor com $D=8,6m$ estimados a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM).....	88
Tabela 17 - Resultados de consumos e de <i>IRC</i> para o modelo de propulsor com $D=8,6m$ estimados a partir da metodologia proposta (MP).....	89

Tabela 18 - Resistência ao avanço para $T=8m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	99
Tabela 19 - Resistência ao avanço para $T=10m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	100
Tabela 20 - Resistência ao avanço para $T=12m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	100
Tabela 21 - Resistência ao avanço para $T=14m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	100
Tabela 22 - Resistência ao avanço para $T=16m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	101
Tabela 23 - Resistência ao avanço para $T=8m$ considerando o fator de forma calculado pelo CFD.....	101
Tabela 24 - Resistência ao avanço para $T=10m$ considerando o fator de forma calculado pelo CFD.....	102
Tabela 25 - Resistência ao avanço para $T=12m$ considerando o fator de forma calculado pelo CFD.....	102
Tabela 26 - Resistência ao avanço para $T=14m$ considerando o fator de forma calculado pelo CFD.....	102
Tabela 27 - Resistência ao avanço para $T=16m$ considerando o fator de forma calculado pelo CFD.....	103
Tabela 28 - Potência de maquina para $T=8m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	104
Tabela 29 - Potência de maquina para $T=10m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	105
Tabela 30 - Potência de maquina para $T=12m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	105
Tabela 31 - Potência de maquina para $T=14m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	105
Tabela 32 - Potência de maquina para $T=16m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	106
Tabela 33 - Potência de maquina para $T=8m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982).....	106

Tabela 34 - Potência de maquina para $T=10m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)	106
Tabela 35 - Potência de maquina para $T=12m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)	107
Tabela 36 - Potência de maquina para $T=14m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)	107
Tabela 37 - Potência de maquina para $T=16m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)	107
Tabela 38 - Potência de maquina para $T=8m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	108
Tabela 39 - Potência de maquina para $T=10m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	108
Tabela 40 - Potência de maquina para $T=12m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	109
Tabela 41 - Potência de maquina para $T=14m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	109
Tabela 42 - Potência de maquina para $T=16m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	109
Tabela 43 - Potência de maquina para $T=8m$ e $D=8.6m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	110
Tabela 44 - Potência de maquina para $T=10m$ e $D=8.6m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	110
Tabela 45 - Potência de maquina para $T=12m$ e $D=8.6m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	110
Tabela 46 - Potência de maquina para $T=14m$ e $D=8.6m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	111
Tabela 47 - Potência de maquina para $T=16m$ e $D=8.6m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - *American Bureau of Shipping*
CFD - *Computational Fluid Dynamics*
DNV - *Det Norske Veritas*
DP - *Dynamic Positioning*
EEDI - *Energy Efficiency Design Index*
EEOI - *Energy Efficiency Operational Indicator*
ECA - *Emission Control Area*
FPSO - *Float Production Storage and Offloading unit*
FSO - *Float Storage and Offloading unit*
GEE - Gases de Efeito Estufa
HFO - *Heavy Fuel Oil*
HM - Holtrop e Mennen 1982
IMO - *International Maritime Organization*
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IRC - Índice de Redução de Consumo
ITCC - *International Towing Tank Conference*
MARPOL - *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*
MEPC - *Marine Environment Protection Committee*
MGO - *Marine Diesel Oil*
MP - Metodologia Proposta
NMVOC - *Non-Methane Volatile Organic Compounds*
PM - *Particulate Matters*
SECA - *Sulphur Emission Control Area*
SEEMP - *Ship Energy Efficiency Management Plan*
VLCC - *Very Large Crude Carriers*
UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

CH₄ - Metano
CO - Monóxido de carbono

CO_2 - Dióxido de carbono

NO - Óxido nítrico

NO_2 - Dióxido de nitrogênio

NO_x - Óxidos de nitrogênio

N_2O - Óxido nitroso

O_3 - Ozônio

SO_x - Óxidos de enxofre

SO_2 - Dióxido de enxofre

SO_4^{2-} - Sulfato

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_0 - Área do disco do hélice (m^2)
- A_{BT} - Área transversal do bulbo de proa (m^2)
- A_E - Área expandida (m^2)
- A_T - Área submersa da popa (m^2)
- B - Boca (m)
- $Cons$ - Consumo de combustível (t/d)
- C_A - Coeficiente de correlação modelo-navio
- C_B - Coeficiente de bloco
- C_F - Coeficiente friccional
- c_P - Coeficiente propulsivo
- C_P - Coeficiente prismático
- C_{Stern} - Coeficiente referente ao tipo da popa
- C_V - Coeficiente de resistência viscosa
- c_{vent} - Coeficiente de ventilação
- C_{wp} - Coeficiente de linha d'água
- C_x - Coeficiente de seção mestra
- D - Diâmetro do hélice (m)
- F_n - Número de Froude
- g - Aceleração da gravidade (m/s^2)
- h_B - Posição do centro da área transversal do bulbo de proa (m)
- h_v - Altura do centro do propulsor até a superfície da água (m)
- J - avanço (m)
- k - Fator de forma
- k_{APP} - Fator de forma dos apêndices
- K_Q - Coeficiente de torque
- K_T - Coeficiente de empuxo
- lcb - Posição do centro de carena (m)
- L_{WL} - Comprimento da linha d'água (m)

MR - Margem de resistência
 P - Passo (m)
 P_E - Potência efetiva (MW)
 P_S - Potência de máquina (MW)
 R - Raio do propulsor (m)
 R_A - Resistência de correlação modelo-navio (kN)
 R_{APP} - Resistência dos apêndices (kN)
 R_B - Resistência de pressão adicional do bulbo de proa próximo a linha d'água (kN)
 R_e - Número de Reynolds
 R_F - Resistência friccional (kN)
 R_T - Resistência total (kN)
 R_{TR} - Resistência de pressão adicional da popa transon imersa (kN)
 R_W - Resistência de formação e quebra de ondas (kN)
 S - Área da superfície molhada do casco (m^2)
 S_{APP} - Área molhada dos apêndices (m^2)
 t - Fator de redução da força propulsora
 T - Calado (m)
 T_A - Calado na região da popa (m)
 V - Velocidade de navegação (nós)
 w - Coeficiente de esteira
 y^+ - Distância normal a parede
 Z - Número de pás
 λ - Escala
 η_0 - Eficiência do hélice em águas abertas
 η_H - Eficiência do casco
 η_R - Eficiência relativa rotativa
 η_T - Eficiência de transmissão
 ρ - Densidade da água do mar (kg/m^3)

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Panorama e Motivação	1
1.2	Identificação do Problema.....	3
1.3	Abordagem do Problema	5
1.4	Objetivos.....	7
1.5	Organização do Trabalho.....	7
2	Normas e Regulamentos - GEE e Poluição Atmosférica.....	9
2.1	Óxidos de Enxofre (SO _x) e Materiais Particulados (PM).....	10
2.2	Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	12
2.3	Dióxido de Carbono (CO ₂)	13
2.3.1	Objetivos e Abrangência do EEDI	14
2.3.2	Gestão Energética Operacional - SEEMP	15
2.4	Tendência das Normas de Emissões de Gases Poluentes e GEE	17
3	Eficiência Energética para Embarcações em Operação.....	20
3.1	Velocidade do Navio na Viagem	22
3.2	Seleção da Rota	24
3.3	Otimização do Trim e do Calado.....	25
3.4	Rugosidade do Casco.....	25
3.5	Rugosidade do Hélice.....	27
3.6	Avaliação da Eficiência Operacional	27
4	Redução da Velocidade de Navegação (<i>Slow Steaming</i>).....	29
4.1	Vantagens e Desvantagens do <i>Slow Steaming</i>	31
4.2	Redução do Consumo de Combustível com o <i>Slow Steaming</i>	33
4.3	<i>Slow Steaming</i> Aplicado em Navios Petroleiros	34

4.4	Variação dos Custos de Transporte com a Redução de Velocidade	35
5	Metodologias Numéricas para a Estimativa Preliminar do Consumo de Combustível de Embarcações durante a Navegação	38
5.1	Estimativa do Consumo de Combustível Utilizando o Método de Predição de Potência Proposto por Holtrop e Mennen (1982).....	39
5.1.1	Estimativa da Resistência ao Avanço.....	42
5.1.2	Estimativa dos Coeficientes de Propulsão	45
5.1.3	Integração Casco-Hélice	46
5.1.4	Estimativa da Ventilação no Propulsor	47
5.2	Estimativa do Consumo de Combustível com Aplicação de CFD para a Obtenção do Fator de Forma e do Coeficiente de Esteira Nominal.....	48
5.2.1	Configuração do Modelo de CFD	50
5.2.2	Modelo do Casco	51
5.2.3	Domínio Computacional e Condições de Contorno.....	54
5.2.4	Malha Computacional.....	55
5.3	Definição da Região de Operação e das Curvas de Consumo.....	56
6	Caso Exemplo - Navio Aliviador	60
6.1	O Navio Aliviador	60
6.1.1	Perfil Operacional.....	62
6.1.2	Características do Navio	64
6.2	Resultados Numéricos.....	67
6.2.1	Resistência ao Avanço.....	67
6.2.2	Potência de Máquina.....	72
6.2.3	Regiões de Operação e Curvas de Consumo	79
6.3	Discussão e Aplicação dos Resultados	90
6.3.1	Possíveis Aplicações para o Navio Aliviador.....	91
7	Conclusões.....	93

8	Referências Bibliográficas	96
	APÊNDICE A.....	99
1.	Resultados Numéricos da Resistência ao Avanço.....	99
1.1	Resultados de Resistência ao Avanço Utilizando o Método de Predição de Potência Proposto por Holtrop e Mennen (1982).....	99
1.2	Resultados de Resistência ao Avanço com a Aplicação de CFD para a Obtenção do Fator de Forma.....	101
	APÊNDICE B.....	104
1.	Resultados Numéricos da Potência de Máquina.....	104
1.1	Resultados da Potência de Máquina Utilizando o Método de Predição de Potência Proposto por Holtrop e Mennen (1982).....	104
1.2	Resultados da Potência de Máquina com a Aplicação de CFD para a Estimativa do Fator de Forma e da Esteira Nominal	108

1 Introdução

1.1 Panorama e Motivação

A Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2009, realizada em Copenhague, reconheceu que a mudança climática é um dos maiores desafios da atualidade e que ações devem ser tomadas para manter o aumento da temperatura global abaixo de 2°C. Neste contexto, o relatório elaborado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) em 2007, já estimava que os gases de efeito estufa deveriam ser reduzidos de 50 a 85% dos níveis atuais, em 2050.

Por definição, os gases de efeito estufa (GEE) são gases integrantes da atmosfera, de origem natural ou antrópicos (produzidos pelo homem), que absorvem e reemitem radiação infravermelha para a superfície da terra e para a atmosfera, causando o efeito estufa. Os principais GEE presentes na atmosfera são o vapor d'água, o dióxido de carbono (CO₂), o óxido nitroso (N₂O), o metano (CH₄) e o ozônio (O₃). Também existem outros GEE introduzidos por atividades humanas como, por exemplo, hidrocarbonetos e outras substâncias com cloro e bromo.

No transporte marítimo, a emissão de GEE está relacionada, em sua grande parte, ao CO₂ emitido através dos gases de exaustão provenientes da queima de combustíveis fósseis. O principal combustível utilizado neste ramo é o óleo diesel residual (HFO), mais conhecido como *bunker*. O fato de ser intitulado de residual significa que é um material restante após a separação dos combustíveis mais valiosos do petróleo bruto, contendo altos níveis de impurezas, como, por exemplo, o enxofre. Por isso, a sua queima resulta, não apenas na emissão de CO₂, como também na emissão, em grandes quantidades, de óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e materiais particulados, que são nocivos ao meio ambiente e a saúde humana.

Os óxidos de enxofre, decorrentes da queima de combustíveis com alto teor de enxofre, são compostos, basicamente, de dióxido de enxofre (SO₂) e pelo ânion

sulfato (SO^{-2}_4) e seu principal efeito nocivo é a chuva ácida. Já os óxidos de nitrogênio, com origem na queima de combustíveis fósseis a elevadas temperaturas, são compostos essencialmente de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2) e seus principais efeitos nocivos são a chuva ácida e graves problemas respiratórios. Por fim, os materiais particulados, decorrentes da queima incompleta de combustíveis fósseis, são partículas finas suspensas no ar, conhecidas como fuligem, que também podem causar graves problemas respiratórios.

Neste contexto, a IMO (*International Maritime Organization*) - que é uma organização responsável por regulamentar o transporte marítimo mundial, incluindo a segurança, preocupações ambientais, questões legais, cooperação técnica, segurança marítima e eficiência energética - vem estabelecendo regulamentações mitigadoras para o transporte marítimo mundial, com o objetivo de reduzir as emissões de gases poluentes e, principalmente, de GEE.

A entidade (IMO) publicou, em 2014, o terceiro estudo referente às emissões de GEE (IMO, 2014), levando em consideração dados da frota mundial de embarcações comerciais, no período entre 2007 e 2012, abordando, não apenas as emissões de GEE, mas também poluentes como os óxidos de enxofre e nitrogênio (SO_x e NO_x), os materiais particulados (PM), o monóxido de carbono (CO) e os compostos orgânicos voláteis, desconsiderando o metano (NMVOC).

Em relação aos gases de efeito estufa, o estudo indicou que, neste período, o comércio marítimo foi responsável por emitir uma média anual de 1.036 milhões de toneladas de GEE (referente às emissões combinadas de CO_2 , CH_4 e N_2O), representando 2,8% das emissões globais, e, deste montante, 1.015 milhões de toneladas referem-se às emissões de CO_2 , que representam 3,1% da emissão global.

O estudo também estimou as emissões de SO_x e NO_x no transporte marítimo comparado com as emissões globais. O resultado foi bastante expressivo, com uma média anual de 20,9 milhões de toneladas de NO_x e 11,3 milhões de toneladas de SO_x , representando 15% e 13% das emissões globais, respectivamente.

Como cenário futuro, a entidade apontou que as emissões de óxidos de enxofre e materiais particulados devem reduzir, em números absolutos, a partir de 2020 devido as normas ambientais que entrarão em vigor nos próximos anos. Já em relação as emissões de CO_2 , NO_x e CH_4 , o estudo mostrou que, apesar das normas ambientais

atuais serem efetivas e reduzir as emissões destes gases por embarcação, em valor absoluto, é esperado um aumento expressivo das emissões até 2050, devido à estimativa da taxa de crescimento da economia global.

Este cenário apresentado pela IMO foi alarmante, pois segue o sentido contrário apontado pela Conferência de 2009 sobre as emissões de GEE. Em resumo, a entidade afirmou que as normas e tecnologias atuais não são suficientes para atingir o objetivo apontado em Copenhague, sinalizando a necessidade de novas normas, maiores investimentos em novas tecnologias e soluções operacionais que resultem em menor consumo de combustíveis fósseis pela frota mundial de navios mercantes.

1.2 Identificação do Problema

O crescimento do setor de transporte marítimo, basicamente, acompanha o crescimento econômico mundial (nível de produção, importação e exportação). Entre os principais meios de transporte (rodoviário, ferroviário e aéreo), destaca-se pelo baixo custo e baixo consumo de combustível (por quantidade de carga transportada e distância percorrida), sendo o meio mais utilizado, se disponível, no transporte da maioria dos tipos de carga.

Por questões econômicas, o setor vem recebendo grandes investimentos estruturantes desde a segunda metade do século XX, tanto na área de construção naval, quanto na área de desenvolvimento portuário. Todavia, até o início do século XXI, a principal preocupação no desenvolvimento do setor era em reduzir os custos de transporte de carga, deixando o meio ambiente em segundo plano.

Como resultado deste descaso com o meio ambiente, pode ser destacado o naufrágio do petroleiro Prestige, em 2002, na costa da Espanha, despejando 11.000m³ de óleo litoral da Galícia; o desequilíbrio de ambientes marinhos, principalmente em regiões costeiras, por invasão de espécies exóticas introduzidas pela água de lastro de navios; e o alto nível de poluição atmosférica em regiões portuárias provocado pela baixa qualidade e o alto nível de impurezas do combustível utilizado no transporte naval.

Unido a esses fatos, o início deste século foi marcado pela apresentação ao mundo do que talvez seja o maior desastre ambiental provocado pelo homem, o aquecimento global. Esse fenômeno é provocado pelo efeito estufa, que é um fenômeno natural responsável por manter a vida na terra em equilíbrio, porém está sofrendo grandes alterações devido à algumas atividades humanas, como o desmatamento e a queima de combustíveis fósseis.

Com isso, todos os setores produtivos e a eles relacionados, como no caso do setor de transporte, estão sendo pressionados a aderirem uma ideologia que está em destaque em todos os meios de comunicação atual, o desenvolvimento sustentável. Neste novo contexto, entidades governamentais e regulamentadoras foram impulsionadas a por um fim no descaso ambiental no setor de transporte marítimo, com o objetivo de reduzir a poluição marinha e atmosférica e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Além de normas regionais, que visam controlar as emissões de gases poluentes, qualidade da água de lastro e segurança no transporte de carga, principalmente, na região da costa europeia e norte americana, ficou sob a responsabilidade da organização internacional marítima (IMO) regulamentar a frota mundial e direcionar este mercado para um novo conceito, colocando o desenvolvimento sustentável e a eficiência econômica no mesmo patamar.

A IMO vem criando uma série de normas ambientais que estão gerando grandes desafios no mercado de construção naval, buscando novas tecnologias afim de aumentar a eficiência energética, introduzir fontes alternativas e mais limpas de energia e reduzir os níveis de poluição, tanto para as novas embarcações, quanto para aquelas que já estão em operação.

O potencial de melhorias em novos projetos é indiscutível, projetos mais eficientes, fontes mais limpas de energia, tratamento da água de lastro e dos gases de escape, são alguns exemplos de medidas que estão cada vez mais presentes e direcionam o futuro do mercado de transporte naval à um novo e mais adequado rumo.

No entanto, um navio é projetado para operar, no mínimo, 25 anos e o processo de renovação da frota é bastante lento. As embarcações construídas no início do século irão operar por mais 15 a 20 anos e a entidade (IMO) não poderia ignorar os

impactos ambientais causado pela ineficiência operacional de uma parcela da frota mundial que será maioria ainda por muitos anos.

Esses são os motivos pelos quais a entidade e o mercado de transporte naval não poupam esforços para tentar corrigir, ou mesmo reduzir os impactos, dos descasos cometidos no passado. A IMO vem regulamentando a qualidade do combustível, a instalação de equipamentos e o controle no gerenciamento operacional de navios, e o mercado de transporte naval está implementando novas tecnologias e soluções que aumentem a eficiência operacional reduzindo o consumo de combustível.

1.3 Abordagem do Problema

O mercado de transporte naval está passando por importantes mudanças para atender este novo cenário. Com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes atmosféricos e marítimos, a IMO vem estabelecendo regulamentações que estão impactando em novos projetos e em embarcações em operações.

Estas regulamentações, seus objetivos e principais impactos no setor são apresentados no capítulo 2 deste trabalho. De maneira geral, elas podem ser enquadradas em duas categorias distintas.

A primeira é referente a índices de emissão (CO_2 , NO_x , SO_x , PM, etc.), em que a entidade prefixou limites máximos, dependendo do porte e do tipo da embarcação, e o projetista e o construtor responsável pela implementação no navio são obrigados a atendê-los. A segunda categoria já é de caráter operacional e atinge, tanto as novas embarcações, quanto as que já estavam em operação antes mesmo da criação e oficialização da norma.

Essas normas operacionais visam reduzir o consumo de combustível das embarcações sem que os armadores tenham perdas econômicas e manutenção em excesso. Esta redução do consumo é baseado no gerenciamento operacional, em que o operador, com base em dados de navegação, escolhe a forma mais eficiente de operação. Com a possibilidade de apresentar resultados a curto prazo, a IMO estima que é possível reduzir na ordem de 20% as emissões de GEE apenas com

medidas de gerenciamento, sendo assim uma ferramenta muito importante na tentativa de reduzir os efeitos das emissões do transporte naval no efeito estufa.

Existem diversas possibilidades de melhorias operacionais que resultam na redução do consumo de combustível e, entre elas, as principais são: a redução de velocidade de navegação; a seleção da melhor rota; a navegação com o trim e o calado adequados; e a limpeza de casco e hélice.

Cada uma dessas possibilidades também são detalhadas e analisadas no capítulo 3 desta dissertação. A principal delas, que vem sendo amplamente utilizada por todos os tipos e portes de navios mercantes e com resultado expressivo de redução do consumo de combustível, é a redução da velocidade de navegação.

A desaceleração econômica mundial é uma das responsáveis pela redução da velocidade média da frota, a qual teve um crescimento acelerado na década passada e, hoje, possui muitas embarcações ociosas. No entanto, existem alguns tipos de operações que não há necessidade que o operador navegue em alta velocidade, como, por exemplo, a cabotagem e viagens de rotas curtas entre regiões portuárias com elevado tempo de espera de atracação, pois, muitas vezes, a embarcação fica mais tempo fundeada, aguardando uma janela portuária para o carregamento/descarregamento, do que navegando. Esses são os tipos de navegação em que a redução da velocidade apresenta resultados mais expressivos, podendo chegar em uma redução superior à 50% do consumo de combustível.

O resultado da aplicação desta solução é muito particular para cada embarcação, dependendo, não apenas do porte e do tipo, mas também de suas máquinas e equipamentos e de seu perfil operacional. Neste sentido, para o operador determinar uma previsão da redução do consumo de combustível que esta tomada de decisão (redução da velocidade) poderá trazer, ele necessitará de ferramentas devidamente calibradas, considerando as principais peculiaridades de seu navio que influenciam na operação, como a máquina principal, e, conseqüentemente, no seu consumo.

Com isto, dada a possibilidade que a redução da velocidade de navegação poderá reduzir, no curto prazo, as emissões de GEE, e a complexidade em determinar as possíveis reduções de combustível para diferentes modos de operação, este trabalho apresentará uma descrição e discussão completa e consistente de diferentes metodologias para a estimativa do consumo durante a

navegação e as principais ações que podem interferir na eficiência energética do navio.

1.4 Objetivos

Este trabalho tem como principais objetivos abordar, não apenas as mudanças normativas que visam reduzir as emissões de gás e algumas das principais medidas operacionais que podem trazer grande redução de consumo de combustíveis fósseis, mas também, entre elas, focar no estudo da redução de velocidade do navio, apresentando as principais particularidades que interferem no consumo de combustível e na eficiência energética em um navio.

Para isto, a dissertação apresentará dois métodos numéricos que possibilita avaliar o consumo de embarcações durante a navegação, discutindo suas bases teóricas e os possíveis resultados obtidos.

Por fim, as metodologias apresentadas serão aplicadas de forma adequada em um dos principais tipos de embarcações que operam no Brasil, em quantidade e importância econômica, que é o navio petroleiro utilizado para a realização de operações de alívio em FPSOs (*shuttle tanker*), avaliando o potencial de redução de consumo de combustível para diferentes modos de operação e apresentando como conclusão uma possível operação ideal.

1.5 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 apresentar-se-á as principais normas e regulamentos referentes à emissão de GEE e gases poluentes que estão entrando em vigor. Este capítulo detalhará as duas principais normas que visam a redução da emissão de CO₂, para novas embarcações e para aquelas que já encontram-se em operação.

Serão apresentadas, no capítulo 3, as principais soluções operacionais que resultam no aumento da eficiência energética do navio, visando a redução do consumo de combustível fósseis.

O Capítulo 4 apresentará o impacto da redução de velocidade no consumo de combustível de navios, trazendo diversos estudos sobre o assunto e avaliando as principais dificuldades em estimar o consumo de combustível, dadas as particularidades de cada embarcação.

No Capítulo 5 serão apresentadas as metodologias numéricas para a estimativa do consumo de combustível durante a navegação e suas principais aplicações e limitações. Depois será apresentada uma ferramenta gráfica que fornece a região de operação do navio, com as velocidades e calados de navegação possíveis e, também, o consumo de combustível esperado para cada condição, sendo esta a principal contribuição desta dissertação.

O capítulo 6 apresentará um estudo de caso da variação do consumo de combustível pela velocidade para o navio tipo escolhido, petroleiro Suezmax adaptado para operações de alívios em FPSOs. Primeiramente, serão apresentadas as características detalhadas do navio e da sua operação. Após esta especificação, serão estimadas e comparadas as curvas de consumo para as diferentes metodologias apresentadas e, em complemento, será definida a operação ideal para o navio tipo operando em águas brasileiras, bem como a estimativa de redução consumo de combustível para o modo de operação proposto.

Finalmente, as conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 7.

2 Normas e Regulamentos - GEE e Poluição Atmosférica

O óleo diesel residual ou pesado (HFO) é o combustível usado em 95% das embarcações comerciais do mundo. Combustível característico de grandes motores de baixa e média rotação, este derivado de petróleo apresenta baixa qualidade e só é o combustível mais utilizado no transporte naval por razões econômicas (Goldsworthy, 2003). Já o óleo diesel naval (MGO), que é um combustível de melhor qualidade, é mais utilizado em embarcações de pequeno e médio porte ou em motores auxiliares das embarcações comerciais.

O HFO tem como característica elevada viscosidade em comparação com o MGO e a sua densidade pode chegar à 991 kg/m^3 . O combustível também apresenta uma série de impurezas como asfaltenos, enxofre, vanádio, materiais inorgânicos e contaminantes como água, sódio, sedimentos, alumínio, lodo, fibras e produtos de oxidação (ABS, 2001). Com isto, o combustível não pode ser diretamente injetado no motor sem que antes passe por processos de purificação e pré-aquecimento.

Estes processos exigem um sistema bastante complexo e pesado contendo bombas, centrifugas, tanques de armazenamento e de decantação, que limitam o uso deste tipo de combustível a embarcações de grande porte.

A combustão do HFO gera produtos como CO_2 , NO_x , SO_x , CO, HC e materiais particulados. Os gases de escape são emitidos para a atmosfera a partir dos escapamentos das embarcações e se diluem com o ar ambiente. Estas emissões podem alterar regional e globalmente a composição da atmosfera, impactando no clima (Eyring et al., 2005).

A IMO estimou que o consumo de combustível utilizado pela frota mundial dobrou entre os anos de 1990 e 2007, variando de 170 milhões para mais de 340 milhões de toneladas por ano. Deste montante, cerca de 77% representam o consumo de HFO e 23% de MGO (IMO, 2008).

Diante do panorama atual sobre poluição ambiental e mudanças climáticas provocadas pelo homem, a entidade responsável pela regulamentação do transporte marítimo, IMO, adotou, em 2005, o Anexo VI da MARPOL 73/78 (DNV, 2009), que refere-se à prevenção de poluição do ar, como norma obrigatória global. A

Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) apresenta neste documento regras referentes aos limites de emissões de CO₂, NO_x, SO_x e PM (materiais particulados) que são o tema deste capítulo.

2.1 Óxidos de Enxofre (SO_x) e Materiais Particulados (PM)

As emissões de óxidos de enxofre (SO_x) causam acidificação do solo e da água resultando em sérios danos ao meio ambiente, com a morte de plantas e animais, e à edifícios e outras estruturas feitas pelo homem (Kageson, 1999), já os materiais particulados está relacionado mais à problemas de saúde do que ambientais.

As regras que impõe limites máximos de emissões de SO_x e PM são divididas em duas partes. A primeira é de abrangência global, limitando o teor de enxofre dos óleos combustíveis a níveis de:

- 4,50% m/m antes de 1º de janeiro de 2012;
- 3,50% m/m de 1º de janeiro de 2012 até 1º de janeiro de 2020; e
- 0,50% m/m a partir de 1º de janeiro de 2020.

Em que m refere-se à unidade de massa.

Já a segunda parte abrange as regiões denominadas de ECA (*Emission Control Area*), que são áreas em que é exigida a adoção de medidas especiais obrigatórias para as emissões de navios, para impedir, reduzir e controlar a poluição do ar por SO_x, NO_x e materiais particulados.

A figura 1 apresenta, em vermelho, as regiões que já aderiram a ECA - sendo que a região do Mar do Norte e do Mar Báltico limita a emissão apenas de SO_x (SECA-*Sulphur Emission Control Area*) e a região da América do Norte limitando SO_x, NO_x e PM - e, em laranja, as regiões que estão sinalizando futura adesão.

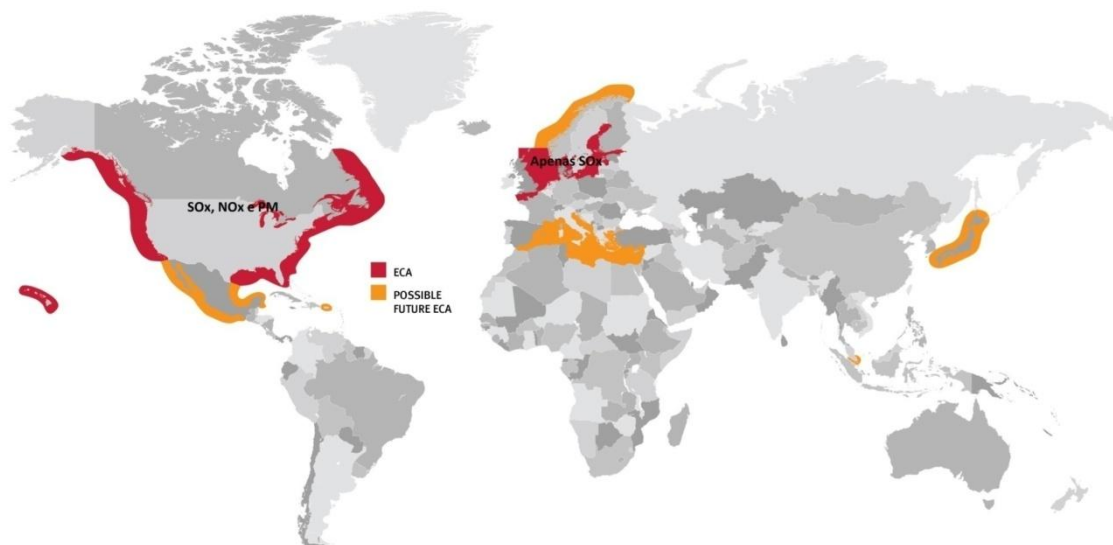


Figura 1 - Áreas de Controle de Emissão (ECA) (DuPont, 2015)

Para embarcações que estiverem operando dentro de áreas de controle de SO_x e/ou PM, o teor de enxofre do óleo combustível utilizado a bordo deve obedecer os seguintes limites:

- 1,50% m/m antes de 1º de julho de 2010;
- 1,00% m/m de 1º de julho de 2010 até 1º de janeiro de 2015; e
- 0,10% m/m a partir de 1º de janeiro de 2015.

Caso as embarcações utilizarem óleo combustível com teor de enxofre acima do mencionado nas regiões de controle de emissão, deverão utilizar procedimentos de bordo, devidamente documentados, que comprovem a baixa emissão durante toda a navegação dentro das ECAs (ou pela utilização de combustíveis alternativos ou por equipamentos de limpeza dos gases de escape).

As penalidades impostas às embarcações que infringirem as normas de emissão vão desde multas até a proibição operacional nas regiões da ECA.

2.2 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Os problemas ambientais provocados pela emissão de NO_x são os mesmos do SO_x, a chuva ácida. A sua formação está associada a temperatura de combustão no interior dos cilindros, sendo que quanto maior a temperatura, maior a emissão.

Os limites de emissão de óxidos de nitrogênio são aplicados a todas as embarcações que realizem viagens internacionais e com motor diesel marítimo com potência de saída superior a 130 kW.

A norma é aplicada em três categorias distintas, dependendo do ano de construção e da região de operação da embarcação. A primeira categoria abrange embarcações construídas de 1º de janeiro de 2001 até 1º de janeiro de 2011, que, dependendo da rotação do motor (n), apresenta os limites de emissão:

- 17,0 g/kWh, quando n for menos que 130 RPM;
- $45 n^{-0,2}$ g/kWh, quando n for de 130 RPM até 2.000 RPM; e
- 9,8 g/kWh, quando n for mais de 2.000 RPM.

Já a segunda categoria abrange embarcações construídas a partir de 2011, operando em qualquer região que não possua controle de emissão de NO_x. Essa norma também depende da rotação dos motores, apresentando-se como:

- 14,4 g/kWh, quando n for menos que 130 RPM;
- $44 n^{-0,23}$ g/kWh, quando n for de 130 RPM até 2.000 RPM; e
- 7,7 g/kWh, quando n for mais que 2.000 RPM.

Finalmente, a terceira categoria abrange apenas embarcações construídas a partir de 1º de janeiro de 2016, operando em áreas de controle de NO_x. Essas normas são muito mais rigorosas do que as das categorias anteriores, com limites de:

- 3,4 g/kWh, quando n for menos que 130 RPM;
- $9 n^{-0,2}$ g/kWh, quando n for de 130 RPM até 2.000 RPM; e
- 2,0 g/kWh, quando n for mais que 2.000 RPM.

Atualmente, fabricantes de motores diesel marítimo possuem tecnologias suficientes para reduzir as emissões da queima do óleo combustível até a exigência da segunda categoria apresentada. Nas regiões de controle de emissões de NO_x , no entanto, a solução foi substituir o óleo combustível pelo gás natural, que possui uma temperatura de combustão dentro do cilindro muito mais baixa do que o diesel marítimo, reduzindo em mais de 80% as emissões de óxidos de nitrogênio.

2.3 Dióxido de Carbono (CO_2)

Com o crescimento do transporte marítimo, atingir reduções de emissões de GEE no nível estimado pelo IPCC para 2050 será praticamente impossível. A Organização Marítima Internacional (IMO) está trabalhando para estabelecer regulamentos de GEE para o transporte internacional, e está sob pressão, a partir de organismos como a União Europeia e a UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), para aplicar os regulamentos que terão um impacto significativo sobre as emissões (DNV, 2010).

Com isso, a entidade foi responsável por acrescentar, em 2011, o capítulo 4 no Anexo VI da MARPOL 73/78, apresentando normas de emissão de CO_2 para novas embarcações e, também, aquelas que já encontram-se em operação (IMO, 2016).

As opções políticas mais relevantes foram avaliadas em termos de eficácia ambiental, relação custo-benefício, incentivo para a mudança tecnológica e viabilidade prática de implementação. Também foram avaliadas opções técnicas e operacionais que já estão estabelecidas no mercado.

As medidas técnicas são consideradas para embarcações novas e as melhorias devem ser avaliadas de acordo com o índice de eficiência energética de projeto (EEDI). As principais desvantagens deste índice são em relação ao custo-eficácia, pois as embarcações devem atingir as metas estabelecidas pela IMO levando em consideração apenas as alternativas técnicas.

Já as medidas operacionais são aplicadas a todas as embarcações, sendo avaliadas por um indicador de eficiência energética operacional (EEOI) através da adoção de um plano de gerenciamento de energia de navios (SEEMP). A principal

desvantagem destes mecanismos pode estar relacionada com a viabilidade prática de implementação, devido à necessidade de uma extensa administração das embarcações durante as suas operações.

2.3.1 Objetivos e Abrangência do EEDI

O EEDI (*Energy Efficiency Design Index*) foi desenvolvido para os maiores e mais intensos segmentos da frota marítima mundial. O MEPC (*Marine Environment Protection Committee*) desenvolveu esse índice para incentivar melhorias no consumo de combustível e os principais objetivos propostos pelo comitê são:

- Determinar um nível mínimo de eficiência energética para novos navios;
- Estimular o contínuo desenvolvimento técnico de todos os componentes que possam contribuir na eficiência do consumo de combustível;
- Separar as medidas técnicas e de projeto das medidas comerciais e operacionais;
- Permitir uma comparação da eficiência energética entre um navio semelhante, do mesmo porte, que poderia ter realizado o mesmo transporte, movendo a mesma carga.

O EEDI estabelece um requisito de mínima eficiência energética para novos navios, dependendo do seu tipo e porte, sendo um mecanismo para aumentar a eficiência energética de forma gradual ao longo de algumas décadas. O índice é um mecanismo não prescritivo, baseado em desempenho, que permite a escolha de qual tecnologia usar em um projeto de navio específico pela empresa responsável pelo projeto. Desde que o nível mínimo de eficiência energética necessário seja atingido, os projetistas e o estaleiro têm a liberdade de escolher a solução mais econômica para o navio.

Como ilustrado na figura 2, armadores, projetistas e construtores devem atender critérios cada vez mais rígidos de acordo com o ano de construção do navio, a partir de uma linha de referência que representa a eficiência média para navios

construídos entre 1999 e 2009 e com limites mínimos de redução de emissão de CO₂, divididos em três fases, de 10% para embarcações construídas entre 2015 e 2020, 20% para embarcações construídas entre 2020 e 2025 e 30% para embarcações construídas a partir de 2025.

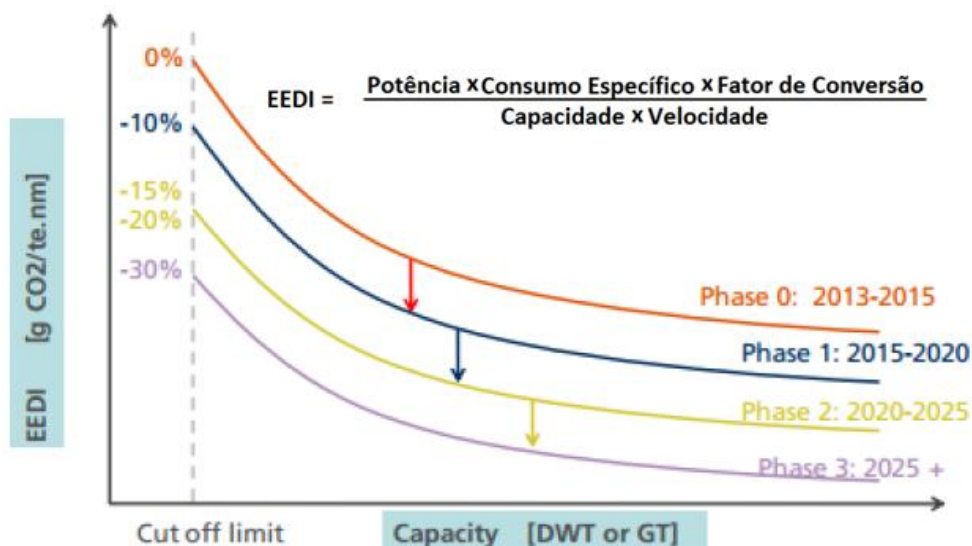


Figura 2 - Regra para a redução de emissão de CO₂ para novos projetos (IMO, 2016).

O índice é mandatório para navios de porte superior a 400 GRT (*Gross Register Tonnage*). Deve-se ressaltar, entretanto, que a formulação associada ao índice representa perfis operacionais usuais de embarcações comerciais e, portanto, a IMO discute a possibilidade de formulações específicas para embarcações com perfis operacionais distintos, como é o caso, por exemplo, de embarcações de operação offshore que, diferentemente das classes de navios mercantes, utiliza grande parte da energia no posicionamento dinâmico, durante operações em plataformas de produção de óleo e gás.

2.3.2 Gestão Energética Operacional - SEEMP

O propósito do SEEMP é estabelecer um mecanismo que, de um lado, melhora a eficiência energética das operações do navio e, do outro, não gere perdas econômicas ao armador. Preferencialmente, o plano de gerenciamento deve estar ligado a uma política mais ampla de gestão energética da empresa que opera ou

controla a embarcação, fornecendo uma abordagem para o monitoramento da sua eficiência ao longo do tempo e identificando as possíveis melhorias operacionais com grande potencial de redução do consumo de combustíveis.

De modo geral, esse plano de gestão procura melhorar a eficiência através de 4 etapas cíclicas, que são o planejamento, a implementação, o monitoramento e a auto-avaliação/melhorias, e a figura 3 apresenta uma esquematização que resume os principais pontos que devem ser abordados em cada uma destas etapas.

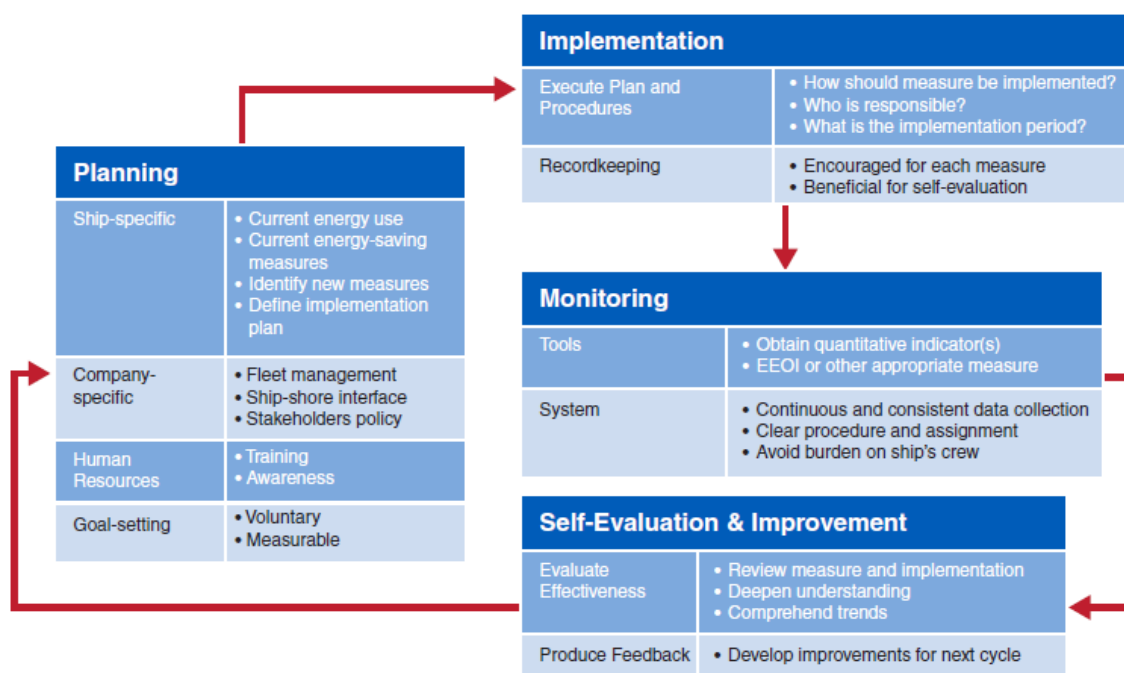


Figura 3 - Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) (ABS, 2013)

As quatro etapas tem um papel crítico no ciclo contínuo para melhorar a gestão de energia do navio e as embarcações deveriam apresentar um documento para aprovação, contemplando o plano de gerenciamento e destacando a evolução das emissões de CO₂ e as melhorias implementadas.

Como mecanismo de *feedback* esperado pela IMO para verificar a eficiência das embarcações, os armadores utilizariam o EEOI, pelo qual poderiam reportar a entidade a quantidade de CO₂ emitida por viagem, servindo como forma de monitoramento da eficácia das alternativas implementadas, assim como do estado de manutenção e correta operação da embarcação.

O índice EEOI fornece um valor específico para cada viagem realizada, sendo que sua unidade depende da carga transportada, como exemplo: (ton de

CO₂)/(ton*milha náutica), (ton de CO₂)/(TEU*milha náutica), etc. Sua fórmula é apresentada na equação 1, sendo que quanto menor seu valor, mais eficiente em termos de energia é o navio.

$$\begin{aligned}
 EEOI &= \frac{\text{Emissão Atual de CO}_2}{\text{Transporte Realizado}} \\
 &= \frac{\text{Qtd de Combustível} * \text{Fator de Conversão CO}_2}{\text{Quantidade de Carga} * \text{Distância}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Um dos objetivos desse índice seria que o próprio armador pudesse monitorar a eficiência da embarcação a cada viagem e, através dos dados, realizar o melhor plano de manutenções e melhorias na embarcação, identificando problemas e antecipando as manutenções antes dos problemas maiores ocorrerem. Todas as melhorias realizadas deveriam então ser incluídas no SEEMP, permitindo assim que a embarcação aumentasse sua eficiência gradativamente ao longo do tempo.

No entanto, a IMO não chegou a um consenso de como avaliar, de forma padronizada, se uma determinada operação de um navio está adequada ou não, de forma a conciliar a eficiência energética do navio com a eficiência econômica da empresa ou do operador. Portanto, até o momento, a regulamentação que era para entrar em vigor em 2013, não está em vigência devido a esses problemas.

2.4 Tendência das Normas de Emissões de Gases Poluentes e GEE

Estudos desenvolvidos pela Sociedade Classificadora DNV-GL (DNV, 2012) e (DNV, 2013) apresentam as principais tendências de aplicação das normas ambientais discutidas pela IMO em relação à poluição do ar e emissão de GEE, incluindo o tipo de embarcação e as regiões em que deverão ser aplicadas. A figura 4 apresenta a linha do tempo que, resumidamente, representa os principais eventos (marcos) de implementação dos requisitos ambientais descritos nos estudos.

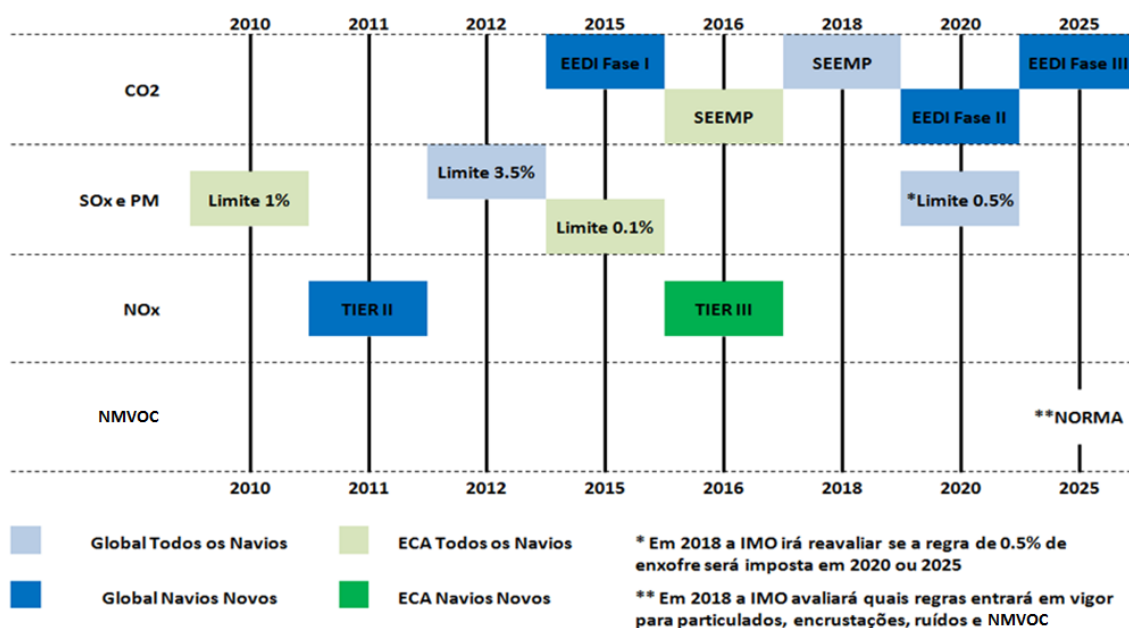


Figura 4 - Linha do tempo com as principais tendências de normas ambientais

Segundo este trabalho, publicado entre os anos de 2012 e 2013, no ano de 2018 a IMO fará uma reavaliação sobre a norma que limita em 0,5% a quantidade de enxofre nos combustíveis marítimos. A grande questão é que, até o momento, não existe tecnologia capaz de retirar essa impureza do HFO a tal nível sem que inviabilize economicamente o combustível.

O mercado fornece HFO com, no mínimo, 1% de enxofre, e proibir a utilização deste combustível iria aumentar em muito a demanda de MDO e o custo operacional da frota, visto que, hoje, o valor do diesel marítimo comparado com o HFO é, pelo menos, o dobro. A tendência, então, é que a entidade postergue está norma de 2020 para 2025 e/ou reavalie o limite máximo de enxofre no combustível imposto.

Uma outra questão levantada no estudo é a sinalização da IMO em relação a criação de normas que limitam a emissão de NMVOC (compostos orgânicos voláteis, desconsiderando o metano). Esses compostos estão presentes no petróleo e seus derivados e são emitidos em, grande quantidade, por navios petroleiros e de produtos derivados do petróleo, principalmente, durante o carregamento da carga. A tendência é que a entidade defina uma regra de emissão máxima do NMVOC por essas embarcações que, provavelmente, entrará em vigor após 2025.

Como última consideração, outro estudo mais recente, apresentado em outubro de 2015 pela sociedade classificadora Lloyds (Lloyds, 2015), fez uma reavaliação sobre as tendências futuras de legislação da IMO. Em relação as emissões de gases

poluentes e GEE, o estudo ressaltou a alteração das datas de implementação das regras do SEEMP. Em virtude de não conseguir definir um procedimento de gerenciamento energético, a IMO decidiu postergar a exigência de controle da eficiência energética (SEEMP), não havendo, até o momento, qualquer indicativo de data.

3 Eficiência Energética para Embarcações em Operação

Decisões tomadas diariamente sobre como realizar uma viagem, manutenções regulares na embarcação e monitorar o consumo de combustível são as ferramentas de um operador para melhorar o desempenho de um navio. Cada viagem oferece a oportunidade para otimizar a velocidade e certificar-se de que o navio está navegando na melhor condição de calado e trim que minimize o consumo de combustível.

O plano de gerenciamento apresentado pela IMO (SEEMP) define uma série de medidas que podem ser adotadas pelo armador e/ou comandante que resultam em um menor consumo de combustível global do navio (máquinas principais e auxiliares, caldeiras, bombas, etc.). A tabela 1 apresenta os tópicos abordados pela entidade e as atividades a eles relacionados que visam aumentar a eficiência energética operacional de uma embarcação.

Tabela 1 - Exemplo de medidas consideradas no SEEMP (Lloyds, 2012)

Medidas SEEMP	
1. Operações eficientes no consumo de combustível 1.1. Melhoria nos planos de viagens 1.2. Escolha da melhor rota 1.3. <i>Just-in-time</i> 1.4. Otimização da velocidade 1.5. Otimização da potência de máquina	4. Otimização de máquinas e equipamentos 4.1. Otimização dos motores principais e auxiliares 4.2. Equipamentos e sistemas 4.3. Recuperação de calor
2. Manipulação otimizada do navio 2.1. Otimização do trim 2.2. Otimização do lastro 2.3. Otimização do propulsor e do fluxo no propulsor 2.4. Otimização do uso do leme e do auto piloto	5. Otimização da movimentação de carga 5.1. Aquecimento e isolamento térmico da carga 5.2. Outras medidas para a otimização de movimentação da carga
3. Otimização do casco e propulsor 3.1. Otimização da resistência do casco 3.2. Gestão do hélice	6. Conservação e uso consciente da energia 6.1. Otimização do uso de energia nas acomodações 6.2. Uso de energias renováveis 6.3. Uso da energia produzida em terra no porto (cold ironing) 6.4. Busca por projetos de conservação de energia 6.5. Treinamento e sensibilização

Como pode ser observado na tabela 1, existem vários fatores operacionais que podem ser gerenciados em uma viagem para aumentar a eficiência de consumo de combustível. Nesta seção, serão apresentados alguns fatores referentes à

navegação da embarcação que serão discutidos separadamente, mas é importante que se faça uma análise em conjunto para alcançar o ganho máximo.

A tabela 2 apresenta os principais fatores operacionais que podem gerar ganhos na eficiência de consumo de embarcações já construídas, bem como os tipos de navios onde estes ganhos são mais significativos e os custos referentes à sua utilização.

Tabela 2 – Principais fatores operacionais que podem gerar uma maior eficiência no consumo de combustível de embarcações em operação (ABS, 2013)

Fator	Ganhos	Tipos de navios	Custos
Velocidade do navio na viagem	10% na redução da velocidade pode diminuir o consumo em até 25%	Todos os tipos, com maiores ganhos em navios de altas velocidades	Custos dependem da influência do acréscimo no tempo de viagem na demanda de cargas
Seleção da rota	Os ganhos variam dependendo do clima e da distância da viagem, mas pode ser bastante significativa em condições severas de navegação	Todos os navios, mas é mais significativo em navios com rotas longas com condições severas de clima	Custos baixos referentes a utilização do software, varia de \$200,00 a \$1000,00 por viagem
Otimização do trim e do calado	1 a 2% de redução no consumo de combustível referentes à navegação	Todos os navios, mas é mais significativo em navios com rotas longas	Custos de \$50000 a \$100000 devido a ensaios experimentais mais o custo de utilização do software
Rugosidade do casco	Limpezas de casco com micro incrustações tem ganhos de 7 a 9% no consumo, com micro incrustações mais lodo pesado de 15 a 18% e de macroincrustação pode gerar ganhos de 20 a 30% durante a navegação	Todos os tipos	O serviço de limpeza do casco custa em média \$2,00/m ² , chegando a \$50.000,00 para VLCC
Rugosidade do hélice	A limpeza e o polimento de propulsores podem gerar ganhos de até 6% no consumo da embarcação durante a viagem	Todos os tipos	Varia com as dimensões do propulsor, chegando a \$3.000,00 para propulsores com 10m de diâmetro

Cada tópico abordado neste capítulo apresenta uma visão geral do impacto da melhoria operacional em questão no consumo de combustível durante a navegação, segundo o estudo apresentado pela ABS (2013). Este estudo é baseado em uma extensa coletânea de trabalhos teóricos e de análises em campo, porém as melhorias são apresentadas através de médias globais, não especificando por tipo e porte de embarcação. Contudo, alguns exemplos de aplicações das melhorias são levantados neste trabalho a fim de analisar a eficácia de cada uma, em casos de embarcações e operações específicas.

Após a apresentação de cada melhoria, este capítulo finaliza, ainda, com uma análise sobre os procedimentos necessários que o armador e/ou o comandante deve-se valer para a aplicação adequada das medidas operacionais eficientes, com a finalidade de atingir os níveis de redução esperados.

3.1 Velocidade do Navio na Viagem

A velocidade de um navio tem um impacto muito significativo no consumo de combustível, isso porque a velocidade esta relacionada com a potência de propulsão em uma ordem de terceira ou quarta potência, dependendo das características do navio. Isso significa que, para dobrar a velocidade da embarcação, é necessária uma potência, pelo menos, oito vezes maior.

Da mesma forma, ao se reduzir a velocidade em apenas 10%, pode haver uma redução de até 25% no consumo de combustível para uma determinada condição de viagem. Apesar de essa redução ser bastante significativa, devem-se considerar as condições de mercados, já que navegar em velocidades mais baixas pode representar perdas comerciais, e cuidados com a manutenção de máquinas e equipamentos, pois operar o motor principal com baixa carga pode resultar em sérios problemas mecânicos como altas taxas de carbonização nas câmaras de combustão, mal funcionamento e desgaste.

Com isso, a otimização da velocidade por viagem representa encontrar o ponto de equilíbrio entre o baixo consumo de combustível em velocidades mais baixas e as variações dos custos de mercado e de manutenções. Este ponto não é fixo,

dependendo das condições do mercado que estão em constantes variações, e essa análise deve ser realizada regularmente.

A MAN Primeserv (2012) fez uma pesquisa com 200 armadores de diferentes tipos de frotas (desde navios porta contêineres, a navios petroleiros) para avaliar a adesão e os seus motivos da redução da velocidade no transporte marítimo. O estudo identificou que, já em 2011, 75% dos armadores pesquisados se valiam da adoção do *slow steaming*, integralmente ou, na maior parte deles, combinado com o *full-load steaming*, com o objetivo majoritário (94%) de reduzir custos com combustíveis (apenas 36% citaram a redução das emissões como resultado esperado).

Já em relação à redução real do consumo de combustível da frota mundial com a adoção do *slow steaming*, a IMO (2014) apresentou, em seu terceiro estudo sobre emissão de gases do efeito estufa, que de 2007 a 2012 as velocidades das embarcações reduziram, em média, 12% e o consumo de combustível, por embarcação, reduziu 20%. A entidade atribuiu esse significativo e importante resultado a redução da velocidade média da frota, apontando como solução com maior potencial de redução de GEE para às embarcações que já estão em operação.

Com isso, a redução de velocidade vem sendo adotada pelos principais armadores de embarcações mercantes em todas as regiões do planeta, independente do tipo de carga, do porte e da velocidade de navegação. Por este motivo, o tema é o foco desta dissertação e será detalhadamente apresentado no capítulo 4 e, depois, serão apresentados exemplos de metodologias numéricas propostas para a estimativa da redução de consumo de combustível com a redução de velocidade no capítulo 5, aplicando-as em um estudo de caso referente ao navio petroleiro adaptado para operações de alívio em FPSOs, na costa brasileira, que é uma embarcação cuja operação é de suma importância para a exploração de petróleo e gás e na economia do país.

3.2 Seleção da Rota

Planejamento de viagens de acordo com previsões meteorológicas é uma das práticas utilizadas há muitos anos. O objetivo principal é a escolha do curso mais seguro, levando em consideração a velocidade do vento, as condições de ondas, correntes esperadas durante a viagem e as características específicas de cada navio.

Porém, de acordo com Öztürk (2013), a razão principal da escolha da melhor rota tem mudado muito nos últimos anos. Antes, a definição da rota era apenas relacionado ao caminho mais seguro, e agora considera, também, a eficiência energética. Com isso, a rota ficou intimamente ligada à gestão de desempenho da embarcação, em que o objetivo está em atingir a velocidade “ideal” com o mínimo de consumo de combustível possível.

Atualmente, os métodos utilizados para a escolha da melhor rota deve levar em consideração, além das condições de mar e de vento, as características operacionais do navio, como a velocidade e o consumo de combustível, para diferentes resultados de comportamento no mar e performance de acordo com a condição ambiental.

O autor ainda destaca que esses métodos são utilizados pelas maiores companhias de navegação como a Maersk e NYK, que consideram a seleção da rota como sendo muito efetiva em termos de eficiência operacional, concluindo que pode ser aplicado para qualquer tipo de embarcação com potencial de redução no consumo de combustível e nas emissões na ordem de 2% a 4%.

No entanto, Bowditch (2002) destaca algumas particularidades de aplicação da ferramenta em relação a redução do consumo de combustível, que restringe apenas para embarcações com rotas longas (acima de 1500 milhas náuticas) navegando em regiões cujas condições ambientais são críticas e detalhadamente conhecidas.

Bowditch (2002) cita, ainda, que os benefícios da escolha da melhor rota vão além dos resultados de curto prazo como a segurança e o conforto na navegação, a redução do consumo de combustível e a redução do tempo de viagem, como também apresentam, a longo prazo, redução dos custos com manutenção e

aumento da vida útil do navio, visto que a embarcação opera menor tempo em condições críticas de estado de mar.

3.3 Otimização do Trim e do Calado

O trabalho apresentado pela ABS (2013) destaca que as formas do casco são tradicionalmente construídas e otimizadas em torno de um ou dois calados preliminares, assumindo a condição de trim zero. Os regimes de escoamento na proa e na popa são cuidadosamente analisados para alcançar a mínima resistência e, se o nível de água for ligeiramente diferente, tanto na proa quanto na popa, do calado de projeto, o consumo de combustível pode ser substancialmente maior.

Em contrapartida, a embarcação pode operar em condições intermediárias de calado que não foram consideradas na condição de projeto e, para esses casos, a condição de trim zero pode não ser a ótima.

De acordo com Armstrong (2013), o conceito de otimização de trim com o objetivo de reduzir a resistência ao avanço depende diretamente da forma do casco, podendo apresentar resultados significativos para condições, por exemplo, em que se mantém o bulbo de proa imerso. Porém, não é apenas a resistência ao avanço que deve ser considerada, mas também a eficiência do propulsor que é significativamente prejudicada com a emersão do hélice.

O autor destaca, ainda, que a aplicação de ferramentas de otimização de trim não apresentam resultados significativos para embarcações de baixa velocidade, citando como exemplo a Tekey que obteve resultados inferiores a 1% de redução no consumo de combustível em seus navios petroleiros do tipo Aframax.

3.4 Rugosidade do Casco

A resistência do casco de um navio pode ser simplificada em uma componente de origem viscosa e outra de origem gravitacional. A componente viscosa, por sua vez,

pode ser simplificada em força de atrito, que é diretamente relacionada à superfície molhada do casco e apêndices, e força de pressão devido ao descolamento da camada limite. Para embarcações com Froude baixo, esta componente é a principal parcela da resistência total.

Um petroleiro em sua velocidade de projeto demandará a maior parte de seu combustível para superar esta resistência quando em águas calmas. Para altas velocidades, a parcela referente à formação de ondas (componente gravitacional) também se torna importante, no entanto, a componente viscosa ainda domina a resistência total.

De acordo com ABS (2013), a magnitude da resistência ao atrito é impactada dramaticamente pela rugosidade da superfície exposta ao escoamento. Um acréscimo de 10 a 20 micrômetros na rugosidade do casco pode resultar em acréscimos de 0,5 a 1% na resistência total, dependendo do tipo da embarcação, sendo mais significantes para navios de baixas velocidades. Registros históricos mostram que a rugosidade média dos cascos aumenta de 10 a 25 micrometros por ano, dependendo de seu sistema de revestimento, destacando a importância de se manter o casco limpo para não prejudicar a eficiência no consumo de combustível.

Turan e Banks (2014) destaca que a taxa de incrustação no casco depende de vários fatores como temperatura, salinidade, população de organismos na região de operação, velocidade de navegação, tempo fundeado e o tipo de proteção anti-incrustante utilizado. Contudo, o trabalho apresenta que o aumento na resistência ao avanço é, na média, 30% para um período de operação de 10 anos sem manutenção, podendo variar de 15% a 50% dependendo das condições operacionais.

Os autores também citam que a redução da resistência adicional devido ao acúmulo de cracas depende do tipo de manutenção realizada no casco, sendo mais eficiente em docagem seca, em que é realizada, não apenas a limpeza do casco com a remoção total dos elementos incrustantes, como também a pintura com/sem proteção anti-incrustantes.

Por fim, é destacado que a ferramenta adotada para definir a melhor momento para realização de manutenções no casco deve levar em consideração os resultados de monitoramento de performance, que vão identificar a magnitude de resistência adicional, incorporado com um estudo de custo que depende, basicamente, do tipo

de manutenção considerado e o custo de oportunidade do período em que a embarcação vai ficar inoperante.

3.5 Rugosidade do Hélice

Em um hélice, a rugosidade de sua superfície pode ter origem física (devido à corrosão, erosão por cavitação e impactos) e/ou biológicas. Para reduzir as incrustações biológicas, propulsores de embarcações mercantes são construídas com ligas metálicas que contém 70% de cobre, no entanto, o cobre não funciona como biocida para todos os tipos de incrustações, sendo necessário a remoção desses elementos incrustantes periodicamente.

A magnitude absoluta da redução na eficiência de um navio devido a este fenômeno é inferior à do casco, no entanto não deve ser desprezada, pois pode chegar a um acréscimo de até 6% na resistência total (ver Tabela 2). Entretanto, o custo da manutenção no propulsor é bem inferior que a do casco, fazendo com que a economia proveniente da limpeza e polimento do hélice seja bastante conveniente (ABS, 2013).

3.6 Avaliação da Eficiência Operacional

Atualmente, a eficiência operacional de uma embarcação ou de uma frota é um fator essencial, tanto por questões econômicas, quanto por questões ambientais. Porém, a melhoria no desempenho de um navio depende de uma etapa que o armador deve se atentar e investir, antes da aplicação de qualquer um dos fatores apresentado neste capítulo, no monitoramento detalhado do navio afim de quantificar as perdas.

Identificar os fatores que estão resultando em um consumo excessivo de combustível no navio não é uma tarefa simples visto a pluralidade de máquinas, equipamentos e condições do meio que podem interferir na eficiência operacional.

Entretanto, esta etapa é a mais importante, pois qualquer tomada de decisão, seja na operação ou na realização de manutenções, gera um custo de capital que o armador deve ter segurança de sua recuperação com a melhoria operacional da embarcação.

Existem no mercado uma série de empresas especializadas no monitoramento de navios, oferecendo produtos e serviços que visam, não apenas a coleta de dados, como também a identificação e quantificação das perdas. Grandes empresas marítimas, como Tekey e Maersk, desenvolveram sua própria metodologia de monitoração e avaliação de dados de suas frotas. Isso evidencia que o investimento com o monitoramento do navio é compensado pela redução de custos operacionais, principalmente devido a redução do consumo de combustível.

Armstrong (2013) apresenta em seu trabalho dados levantados com navios petroleiros do tipo Aframax da Tekey mostrando a redução do consumo médio de combustível da frota no período entre 2005 e 2010. Nestes dados o autor mostra um estudo da razão do consumo de combustível pela distância percorrida do navio, com a redução no consumo na ordem de 12% nestes seis anos. Ele também apresenta os dados monitorados pela empresa de transporte marítimo, que vão desde máquinas até condições de casco e hélice, mostrando os ganhos de eficiência para cada tomada de decisão da empresa como, por exemplo, limpeza do casco e manutenção no motor principal.

Porém, para que o armador obtenha sucesso na implementação das melhorias, é de suma importância que tenha uma equipe devidamente treinada, tanto em terra definindo como será realizada cada viagem, quanto no mar desenvolvendo as atividades operacionais necessárias para cumprir o plano de viagem de forma mais eficiente. Esse tema é abordado pelo trabalho de Turan e Banks (2014), que evidencia uma série de medidas operacionais e suas complexidades e apresenta uma metodologia de treinamento e motivação para a equipe responsável pela operação do navio.

Assim, com uma metodologia de gerenciamento correta, do modo como foi definida pela IMO (2008) com o SEEMP, implementando as melhorias com maior potencial de ganho, com uma equipe treinada e um sistema de monitoramento adequado, uma empresa de transporte marítimo pode reduzir significativamente seus custos, além de reduzir as emissões de poluentes e de gases do efeito estufa.

4 Redução da Velocidade de Navegação (*Slow Steaming*)

Slow steaming é um processo deliberativo de redução de velocidade em navios mercantes com o objetivo de reduzir o consumo de combustível e as emissões de carbono. Esta prática vem sendo adotada pela maioria das companhias e donos de navios a fim de reduzir os custos operacionais em períodos de alto preço dos combustíveis ou recessão econômica. Além disso, a pressão de reduzir as emissões de carbono e melhorar a eficiência de navegação também tem incentivado as companhias marítimas a implementar o *slow steaming* em seus navios (Sanguri, 2012).

A primeira classe de navio que adotou o *slow steaming* foi o contêiner, implementado pela Maersk em 2007, depois, este conceito expandiu para outros tipos de embarcações, incluindo petroleiros e seus derivados e graneleiros, que tradicionalmente navegam com velocidades menores que os navios porta contêineres.

Atualmente, existem diferentes modalidades de *slow steaming*, dependendo do nível de redução de carga no motor adotado. A figura 5 apresentada pelo trabalho de Kowalak (2012) ilustra graficamente as modalidades referidas de acordo com a carga de operação e rotação das máquinas principais.

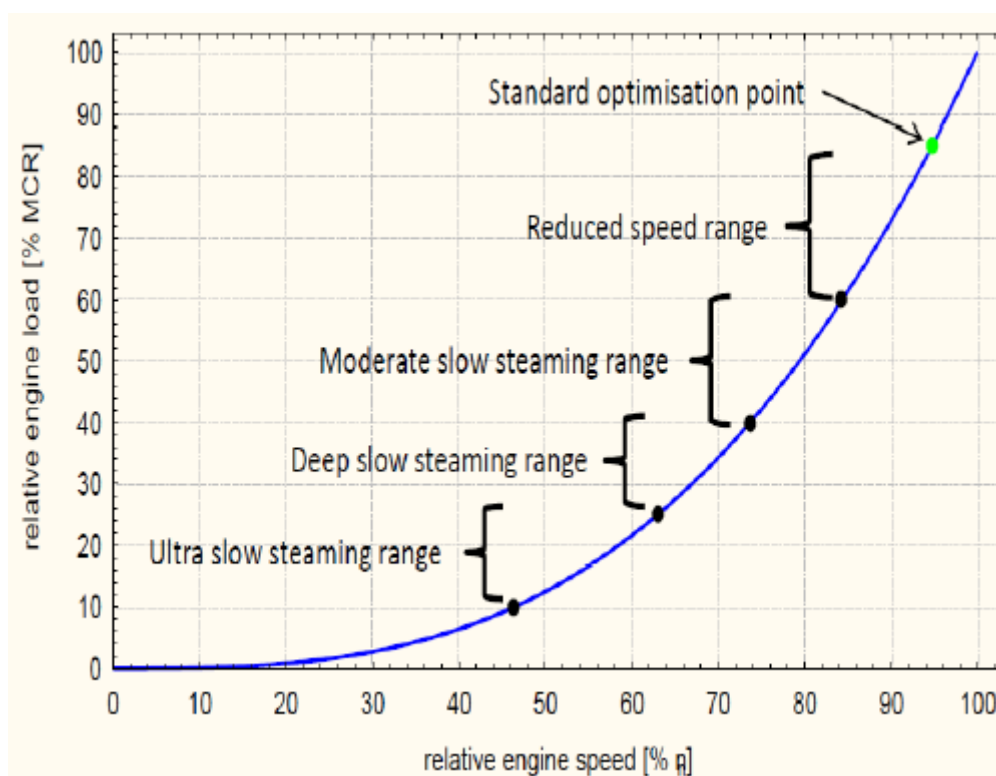


Figura 5 - Nível de redução de velocidades e de *slow steaming* (Kowalak, 2012)

A velocidade mínima de navegação que uma embarcação depende da capacidade das máquinas e equipamentos para operar em baixas cargas. Em alguns casos, o navio não pode ser operado com cargas abaixo de 60% por longos períodos de tempo devido a limitações técnicas, sendo necessárias adaptações na praça de máquinas (IMO, 2016b).

Apesar de aumentar a eficiência no consumo de combustível e reduzir os custos da viagem, a adoção do *slow steaming* pode resultar na necessidade de aumentar o número de embarcações de uma frota. Isto porque, ao navegar com velocidades baixas, o tempo da viagem aumenta e, conseqüentemente, a embarcação irá reduzir o seu fluxo de transporte de carga.

As principais conseqüências da redução de velocidade em um navio mercante serão abordadas neste capítulo, além de exemplos de aplicação e resultados obtidos por diferentes classes de embarcações. Por fim, também serão discutidas situações em que a implantação do *slow steaming* é economicamente viável, considerando o perfil operacional da embarcação e a variação de seus custos operacionais.

4.1 Vantagens e Desvantagens do *Slow Steaming*

A IMO (2016b) apresenta, sem entrar em detalhes técnicos, as principais vantagens e desvantagens do *slow steaming* para navios mercantes. Todavia, a abordagem deste trabalho é muito relevante porque considera os impactos da mudança do perfil operacional da embarcação, desde para o afretador, o operador e a tripulação, até para o meio ambiente.

Essa visão geral dos prós e contras da redução de velocidade na navegação é apresentada, resumidamente, na tabela 3.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do slow steaming (IMO, 2016b)

	Vantagens	Desvantagens
Afretador	<ul style="list-style-type: none"> • Menor consumo de combustível por viagem • Redução na frequência de abastecimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior tempo de navegação e maior taxa de frete por viagem • Maior consumo de combustível dos motores auxiliares por viagem • Maior tendência de incrustações no casco • Menor fluxo de carga transportada por embarcação
Operador Técnico	<ul style="list-style-type: none"> • Menor carregamento médio no motor • Menor consumo de óleo lubrificante nos cilindros 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior uso dos motores auxiliares • Maior frequência na limpeza do casco devido a incrustações • Maiores custos com manutenções devido à operação em baixa carga
Tripulação	<ul style="list-style-type: none"> • Menor frequência de abastecimento • Menor carregamento médio no motor • Maior tempo navegando 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior frequência de inspeção da praça de máquinas • Maior frequência de serviços devido a operação em baixa carga • Aumento nas horas trabalhadas
Meio Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do CO₂ por viagem • Redução do SO_x por viagem • Redução do NO_x por viagem 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do CO por viagem • Aumento do MP por viagem

Destacando dos pontos apresentados na tabela 3 os impactos ambientais, ao reduzir o consumo de combustível, as emissões de CO₂ e SO_x reduzem proporcionalmente, por outro lado, a operação em baixa carga aumenta o índice de combustão incompleta no motor, aumentando as emissões de CO e MP, e, também, reduz a temperatura de combustão, o que é benéfico em relação às emissões de NO_x.

O aumento nos índices de emissões de CO e PM pode ser, até certo ponto, reduzido com a adequação do motor para operar em baixa carga, modificando o modo operacional do motor (injeção de combustível, ar e óleo lubrificante, pressão de combustão, etc.) para a nova condição de navegação (IMO, 2016b).

De forma mais detalhada, Sanguri (2012) apresenta os efeitos da redução de velocidade, especificamente, nas máquinas e equipamentos relacionados à propulsão do navio, abordando uma série de medidas técnicas e operacionais necessárias para a operação do navio em baixa carga.

Na parte operacional, Sanguri apresenta os problemas com a manutenção dos motores principais e equipamentos a eles relacionados, visto que o navio que adota o *slow steaming* opera em condições não otimizadas de projeto que, em geral, considera uma faixa de potência de operação dos motores entre 60% e 90% de MCR.

Em meio aos os vários pontos levantados pelo autor, os principais efeitos da adoção do *slow steaming* em máquinas e equipamentos que podem ser destacados são:

- Alta taxa de carbonização e oxidação nas câmaras de combustão das máquinas principais;
- Injeção excessiva de óleo lubrificante, podendo gerar mal funcionamento no motor;
- Baixa eficiência do turbocharger, resultando em baixo fluxo de ar para as câmaras de combustão;
- Desgaste no motor comprometendo a máquina e reduzindo sua eficiência;

Estes são os principais problemas que devem ser evitados por meio da manutenção correta da praça de máquinas quando a embarcação opera em baixa velocidade e podem ser considerados como desvantagens técnicas e operacionais que resultam em um maior custo com manutenção para o armador.

4.2 Redução do Consumo de Combustível com o *Slow Steaming*

A IMO (2014) apresenta em seu estudo a variação do consumo de combustível da frota mundial de navios mercantes no período entre 2007 a 2012. Este é um período de grande relevância porque entre os anos de 2008 e 2010 o *slow steaming* passou a ser adotado por grande parte dos armadores mundiais e, portanto, é possível avaliar o impacto deste método operacional na redução do consumo de combustível e das emissões de carbono da frota.

O estudo leva em consideração os dados anuais da quantidade de combustível destinado para o abastecimento de navios, a quantidade de carga movimentada e o crescimento do número de embarcações, para definir a razão de consumo médio de combustível por quantidade de carga transportada e avaliar quais as principais mudanças no perfil da frota.

Neste estudo, são analisados resultados nos três segmentos de navios mercante mais importante que são de navios petroleiros, contêineres e graneleiros. De forma geral, devido a crise econômica mundial de 2008, a demanda de transporte de carga cresceu menos do que o número de embarcações, possibilitando o cumprimento das atividades de transporte com uma velocidade média de navegação menor.

Com isso, a razão do consumo de combustível por tonelada de carga transportada obteve quedas expressivas, na ordem de 20%, para os três segmentos considerados e, como a demanda de carga também subiu entre 2007 e 2012 na ordem de 20%, a emissão global de CO₂ da frota mundial de navios teve crescimento próximo de zero.

A IMO atribuiu esse resultado à redução da velocidade média de navegação, entretanto, não deve ser desconsiderada a melhora da eficiência operacional no âmbito dos demais fatores abordados no capítulo 3, já que as grandes companhias

mercantes mundiais, a partir de 2008, intensificaram as atividades de monitoramento e gerenciamento das embarcações a fim de reduzir os custos no transporte marítimo, buscando, não apenas a otimização da velocidade de navegação, mas também reduzindo as perdas, por exemplo, com a falta de manutenção em máquinas, casco e propulsor.

4.3 Slow Steaming Aplicado em Navios Petroleiros

O petroleiro, além de ser um dos navios mais relevantes da frota mundial em número e quantidade de carga transportada, é abordado no estudo de caso do capítulo 6 pela sua importância operacional na costa brasileira. Apesar de sua velocidade característica de navegação ser relativamente baixa comparada com o navio porta-contêiner, os resultados obtidos pelas companhias e armadores que operam este tipo de embarcação com a adoção do *slow steaming* é bastante significativa (IMO, 2014).

Estudos relacionados a essa classe de navios são encontrados em Klanac et al. (2010) e Nikolic, Klanac e Kumar (2011) que analisaram os efeitos da redução de velocidade no consumo de combustível para navios do tipo Aframax e VLCC. As análises foram realizadas considerando a variação da velocidade e da potência instalada por meio de equações de regressão, a variação do consumo de combustível e o acréscimo de tempo na viagem.

As tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos de redução do consumo com a redução da velocidade do navio Aframax e VLCC, respectivamente.

Tabela 4 - Avaliação da redução de consumo por velocidade de um navio Aframax petroleiro

Caso	Velocidade inicial (nós)	Velocidade final (nós)	Redução do consumo diário (%)	Redução do consumo na viagem (%)
1	15,0	12,5	62,1	54,6
2	15,0	10,0	80,0	69,9
3	12,5	10,0	47,1	33,9

Tabela 5 - Avaliação da redução de consumo por velocidade de um navio VLCC petroleiro

Caso	Velocidade inicial (nós)	Velocidade final (nós)	Redução do consumo diário (%)	Redução do consumo na viagem (%)
1	14,0	12,0	37,5	32,1
2	14,0	10,0	65,5	46,8
3	12,0	10,0	44,8	37,3

Nota-se, pelos resultados apresentados por Klavac, o alto ganho em eficiência energética. Com a redução, por exemplo, de 16,7% (15,0 - 12,5 nós) da velocidade do Aframax, obteve-se uma redução de 54,6% no consumo, e no caso do VLCC, com a redução de 14,4% (14,0 - 12,0 nós) da velocidade obteve-se uma redução de 32,1% no consumo.

Entretanto, estes resultados foram obtidos numericamente e não foram considerados perdas de eficiência e os consumos de motores auxiliares. A metodologia ideal para a realização deste tipo de análise deve ser por meio de provas de mar, em que o consumo de combustível é avaliado para diferentes velocidades de navegação e condições de mar, avaliando empiricamente a variação do consumo global do navio por viagem (Sanguri, 2012).

A IMO (2014) apresenta em seu estudo que a velocidade média da frota de navios petroleiros reduziu 15% de 2007 a 2012, no entanto a redução do consumo de combustível foi de 22%, que é um índice de redução bastante inferior ao apresentado por Klavac.

4.4 Variação dos Custos de Transporte com a Redução de Velocidade

Os custos do transporte marítimo pode ser dividido em operacionais, de manutenção periódica, de viagem, de movimentação de carga e de capital (Wahl e Kristoffersen, 2012).

Os custos operacionais são as despesas da embarcação no dia-a-dia, como manutenção, reparo de rotina, administração, custos da tripulação e de seguros. Estes custos variam entre navios, principalmente o de manutenção.

Os custos de manutenção periódica são altamente dependentes da condição e da idade do navio, além de normas que variam para cada tipo de navio e de sua carga. Estes custos ocorrem geralmente quando a embarcação necessita de grandes reparos em docas secas ou quando as sociedades classificadoras exigem verificação por meio de manutenção periódicas para emitir certificado de navegabilidade. Em geral, estas manutenções são realizadas de dois em dois anos e a renovação de certificados a cada quatro anos.

Os custos de viagem são relacionados a uma viagem em particular e são separados em custos de combustível, taxas portuárias e em canais, rebocadores e praticagem, sendo o maior custo com combustível. As companhias de navegação não podem determinar os preços de combustíveis, mas elas podem influenciar o consumo de sua frota ajustando a velocidade operacional.

O custo de movimentação de carga refere-se ao carregamento e descarregamento do navio e variam para cada tipo de carga. Em navios de carga geral, por exemplo, estes custos foram bastante reduzidos com a containerização.

Já os custos de capital, diferente dos demais, dependem do perfil de riscos da estrutura financeira da empresa de transporte. Por isso, não estão relacionados com o funcionamento do navio. Estes custos incluem os juros, pagamentos de dívida e dividendos aos acionistas.

Ao buscar uma velocidade ótima de navegação, o armador busca o menor valor de custo de transporte e, portanto, deve avaliar cuidadosamente os parâmetros apresentados. Cada um dos elementos prós e contras que foram apresentados na seção 4.1 devem ser avaliados pelo operador do navio que deve fazer um balanço entre a redução dos custos de viagem devido ao menor consumo de combustível e o acréscimo com manutenções e perdas com a redução do número de viagens.

Caso a redução do número de viagens resulte em perdas de capitais significativas, o armador pode-se valer da redução da velocidade, em pequenos níveis, para reduzir o tempo de espera na região portuária antes do atracamento do navio, através de uma operação, bastante difundida entre regiões portuárias modernas e operadores de navios mercantes, conhecida como *just in time*.

O *just in time* está relacionado com o fim ou a minimização do tempo de espera em filas nos portos. Neste caso, os ganhos com eficiência no consumo de combustível vão depender da razão entre o tempo de espera em fila e o tempo de

viagem, sendo que, quanto maior o tempo de espera e menor o tempo que a embarcação fica navegando em uma viagem, maior será o potencial de redução (ABS, 2013).

No ano de 2012, o tempo médio de espera nos portos brasileiros foi de 36,3 horas (G1, 2013), este valor é bastante elevado em comparação com países desenvolvidos e deve-se ao grande crescimento comercial do país em contratempo com a falta de investimento em modernização dos portos.

Com o fim da fila por ordem de chegada e constante comunicação entre o navio e o porto, o capitão pode conduzir seu navio em velocidades mais baixas em determinados trechos da rota, resultando na redução significativa do consumo de combustível no trecho percorrido.

Desse modo, está estratégia torna-se bastante atrativa, já que o único revés é em relação aos cuidados para que a embarcação não opere continuamente em baixa carga sem a adoção das medidas adequadas de manutenção. Por fim, o operador ganha ainda em confiabilidade, a partir do momento em que está em constante comunicação com a região portuária e navegando com velocidade baixa, possibilitando seu acréscimo caso ocorra a possibilidade de adiantamento de sua janela portuária.

5 Metodologias Numéricas para a Estimativa Preliminar do Consumo de Combustível de Embarcações durante a Navegação

O consumo energético de um navio para navegar em uma determinada velocidade está relacionado, em sua maior parte, à propulsão necessária para o seu deslocamento. Entretanto, apesar de ser o mais significativo, este fator não é o único responsável pelo consumo total de combustível durante uma viagem, já que também há geração de energia para o acondicionamento da carga, da praça de máquinas e hotelaria, além de iluminação e operação de equipamentos.

O consumo de combustível relacionado ao deslocamento da embarcação varia em relação a uma série de parâmetros em que muitos deles já foram discutidos neste trabalho como a velocidade, a quantidade de carga, a rugosidade do casco e hélice, condição ambiental (onda, maré e vento), entre outros. Também foi discutido nos capítulos anteriores que, dado essa complexidade de fatores, o método mais adequado para avaliar a variação do consumo com a velocidade de navegação é o empírico, por meio de provas de mar, e os parâmetros citados devem ser adequadamente monitorados durante as viagens para a avaliação das perdas de eficiência do navio.

Porém, métodos numéricos, comumente aplicados em etapas iniciais de projeto de embarcações, podem ser utilizados em avaliações preliminares. Estes estudos, apesar de não substituírem a avaliação empírica, identificam as possíveis condições de operação mais eficientes e podem ser decisivos para o armador no investimento ou não na etapa de prova de mar, já que esta resulta em gastos altos de ocupação e operação da embarcação durante o período de testes.

Como o objetivo desta dissertação, além de abordar questões regulatórias de emissões de poluentes e de gases estufas que estão cada vez mais rigorosas, também é avaliar métodos de operação que visam a redução do consumo de combustível, com o foco no principal agente que é a redução de velocidade, este capítulo visa apresentar dois exemplos de metodologias numéricas aplicadas para estimativa de consumo de combustível na geração de energia para a propulsão de

navios cargueiros que foram utilizadas como ferramentas para as análises apresentadas no capítulo 6.

As ferramentas foram aplicadas em um estudo de caso envolvendo um navio petroleiro do tipo Suezmax, analisando a variação do consumo de combustível em diferentes condições de calados e velocidades e discutindo a aplicabilidade do *slow steaming* para o navio tipo que opera na costa brasileira, responsável, principalmente, por operações de alívio em plataformas offshore.

5.1 Estimativa do Consumo de Combustível Utilizando o Método de Predição de Potência Proposto por Holtrop e Mennen (1982)

Holtrop e Mennen (1982) publicaram um método de estimativa da potência de máquina baseado em dados estatísticos e aplicado, principalmente, para embarcações de deslocamento. A metodologia foi desenvolvida com base em análises de resultados de modelos experimentais em escala e dados de embarcações reais, definindo, assim, uma série de equações de regressão que estimam os parâmetros de resistência ao avanço e de eficiência propulsiva a partir de dados básicos de projeto.

Com base nesta metodologia de predição foi desenvolvida um modelo computacional em ambiente Matlab capaz de estimar a potência de máquina e o consumo de combustível para embarcações mercantes de grande porte como, petroleiro, graneleiro e porta contêiner.

A potência de máquina requerida para deslocar um navio em uma determinada velocidade pode ser calculada a partir de três parâmetros denominados resistência ao avanço (R_S), velocidade de navegação (V) e coeficiente propulsivo (c_P), que são relacionados de acordo com a equação 2.

$$P_S = \frac{R_S V}{c_P} \quad (2)$$

A resistência ao avanço é calculada a partir da resistência total para águas calmas (R_T), cuja metodologia de cálculo está descrita na subseção 5.1.1,

multiplicada por um fator $(1 + MR)$ que representa uma margem de acréscimo de resistência devido aos efeitos de incrustações, que aumenta a rugosidade do casco e, conseqüentemente, aumenta a resistência friccional do navio durante a navegação, e devido à resistência adicional de ondas, ventos e marés. O valor adotado de $(1 + MR)$ foi de 1,15, que é comumente utilizado para navios cargueiros de grande porte em caso de condições moderadas de incrustações e condições ambientais (Man Diesel & Turbo, 2009).

Já o coeficiente propulsivo (c_p) representa a eficiência entre a energia mecânica gerada pelo motor principal e o empuxo gerado pelo propulsor. No caso de embarcações com propulsores convencionais, o c_p pode ser decomposto em cinco parcelas que são a eficiência de transmissão (η_T), a eficiência do hélice em águas abertas (η_0), a eficiência relativa rotativa (η_R), a eficiência do casco (η_H) e o coeficiente de ventilação (c_{vent}).

A eficiência de transmissão representa a perda de energia no eixo que transmite a energia mecânica gerada no motor para o hélice. Holtrop e Mennen consideram η_T como um valor fixo de 0,99 para todos os navios com transmissão direta, ou seja, sem caixa de engrenagem para variar a rotação do propulsor em relação ao motor.

O fator η_0 representa a eficiência do propulsor em gerar empuxo a partir do torque fornecido pelo eixo e é medido, experimentalmente, sem a consideração do casco. Porém, durante uma operação real, o casco gera turbulência na região do propulsor e a eficiência do hélice pode aumentar ou diminuir. Esse fator de variação de eficiência é denominado de eficiência relativa rotativa.

Já a eficiência do casco representa a razão entre a quantidade de trabalho necessário para rebocar um casco em uma dada velocidade e o requerido ao navegar com um determinado hélice. Esse fator pode ser calculado em razão do coeficiente de esteira (w) e o fator de redução da força propulsora (t) de acordo com a equação 3.

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w} \quad (3)$$

Por fim, a ventilação, que é o fenômeno em que o propulsor aspira ar da superfície para as suas pás, ocorre em operações em que o hélice está parcialmente

emerso ou muito próximo à superfície da água. Este ar na região das pás resulta em perda de eficiência propulsiva que é representado pelo coeficiente de ventilação.

Com isso, a potência de máquina pode ser representada pela equação 4.

$$P_S = \frac{R_T(1 + MR)V(1 - w)}{\eta_T \eta_R \eta_0 c_{Vent}(1 - t)} \quad (4)$$

A metodologia para a estimativa dos fatores η_R , w e t está apresentada na subseção 5.1.2 que estima os coeficientes de propulsão através das equações de regressão apresentadas no modelo de predição de Holtrop e Mennem (1982). Já o fator η_0 é estimado a partir da série sistemática *B-Type* e a integração casco-hélice que está apresentada na subseção 5.1.3 e, por fim, o coeficiente de ventilação foi estimado por uma equação de regressão apresentada na subseção 5.1.4 retirada do trabalho de Smogeli (2006).

Definida a potência de máquina, a última etapa da ferramenta consiste em estimar o consumo de combustível, em toneladas por dia, a partir de P_S . Este parâmetro depende da eficiência do motor em transformar o combustível em energia mecânica, através da combustão, que, por sua vez, depende do tipo e da carga do motor e do tipo de combustível. Essa eficiência é traduzida pelo parâmetro denominado consumo específico (c_{Esp}) e é fornecido pelos fabricantes de motores.

Com isso, as características do motor, especificamente, a potência máxima de operação (MCR) e a curva de consumo específico variando com a carga do motor (%MCR) devem ser variáveis de entrada do programa, pois dependem das características do navio. Finalmente, o consumo de combustível é estimado através da equação 5.

$$Cons\left(\frac{t}{dia}\right) = 24 \times P_S(kWh) \times c_{Esp}\left(\frac{g}{kWh}\right) \times 10^{-6} \quad (5)$$

A figura 6 apresenta o fluxograma do programa descrito nesta seção.

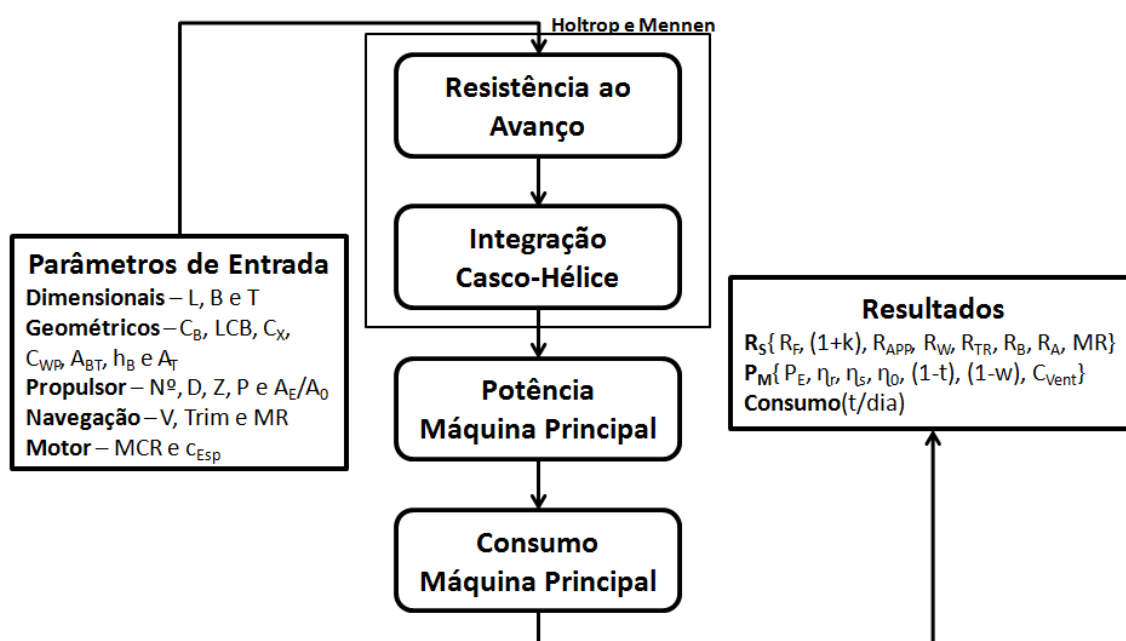


Figura 6 - Modelo numérico baseado na metodologia de Holtrop e Mennen (1982)

5.1.1 Estimativa da Resistência ao Avanço

O método de estimativa de resistência ao avanço de Holtrop e Mennen (1982) é muito utilizado em projetos de embarcações até os dias de hoje. O método é capaz de fornecer uma estimativa da resistência total em águas calmas para diferentes tipos de casco, deslocamento e intervalos de número de Froude, além de apresentar uma metodologia de fácil aplicação.

A equação 6 apresenta as componentes de força consideradas no modelo para a estimativa da resistência total para águas calmas:

$$R_T = R_F(1 + k) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (6)$$

Em que as componentes representam:

R_F a resistência friccional calculada de acordo com a ITCC-1957;

k o fator de forma;

R_{APP} a resistência dos apêndices;

R_W a resistência de formação e quebra de ondas;

R_B a resistência de pressão adicional do bulbo de proa próximo a linha d'água;

R_{TR} a resistência de pressão adicional da popa transom imersa;

R_A a resistência de correlação modelo-navio.

O fator de forma $1 + k$, que descreve a resistência viscosa da forma do casco em relação à R_F , é calculada através da equação 7 e o parâmetro L_R é dado pela equação 8.

$$1 + k = c_{13} \left\{ 0.93 + c_{12} \left(\frac{B}{L_R} \right)^{0.92497} (0.95 - C_P)^{-0.521448} (1 - C_P + 0.0225lcb)^{0.6906} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{L_R}{L_{WL}} = 1 - C_P + \frac{0.06C_P lcb}{4C_P - 1} \quad (8)$$

Onde lcb é o centro de carena em % do comprimento na linha da água medido a partir do centro da embarcação, e os coeficientes c_{13} e c_{12} são dependentes da forma, comprimento na linha da água e do calado.

O fator $1 + k$ é multiplicado pela resistência friccional, R_F , obtida pela equação 9 e o coeficiente C_F é dado pela equação 10.

$$R_F = \frac{1}{2} \times 1025V^2 S C_F \quad (9)$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(Re) - 2)^2} \quad (10)$$

O próximo passo é a estimativa da resistência dos apêndices, R_{APP} , que é calculada através da equação 11.

$$R_{APP} = 0.5\rho V^2 S_{APP} (1 + k_{APP})_{eq} C_F \quad (11)$$

Onde $(1 + k_{APP})_{eq}$ é o fator de forma equivalente dos apêndices, que é tabelado, e S_{APP} é a área total dos apêndices.

Outro componente de relevância ao cálculo da resistência ao avanço é a resistência de formação e quebra de onda R_w . Dependente, não apenas das características dimensionais e de forma do casco, mas também da velocidade de navegação da embarcação, essa componente pode representar uma parcela

significativa da resistência total para números de Froude acima de 0.2. Com isso, R_w é dada pela equação 12.

$$R_w = c_1 c_2 c_5 \nabla \rho g e^{m_1 F_n^d + m_2 \cos(\lambda F_n^{-2})} \quad (12)$$

Onde c_1 , c_2 , c_5 , m_1 , m_2 e λ são coeficientes calculados através do calado, boca, comprimento de linha da água e dos coeficientes de forma do navio e d é um coeficiente que depende do número de Froude.

A resistência de pressão adicional do bulbo de proa próximo a linha da água, R_B , a resistência de pressão adicional da popa transom imersa, R_{TR} e a resistência de correlação, R_A , são as componentes que completam a equação da resistência total e são representadas nas equações 13, 14 e 15 respectivamente.

$$R_B = \frac{0.11 e^{-3P_B^{-2}} F_{ni}^3 A_{BT}^{1.5} \rho g}{1 + F_{ni}^2} \quad (13)$$

$$R_{TR} = 0.5 \rho V^2 A_T c_6 \quad (14)$$

$$R_A = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_A \quad (15)$$

Onde P_B é um coeficiente que representa uma medida de emersão da proa, calculada através da área transversal do casco submerso a meia nau, A_{BT} , área transversal do bulbo de proa; F_{ni} é o número de Froude baseado na imersão do bulbo; c_6 é um coeficiente que depende da velocidade V , da área submersa da popa A_T e da boca B ; e, finalmente, C_A é o coeficiente de correlação, que é calculado através do comprimento na linha da água, L_{WL} , pelo coeficiente de bloco, C_B e por outras dimensões do navio.

Contudo, apesar de formulações extensas, a base para o cálculo da resistência ao avanço em águas calmas pelo modelo de Holtrop e Mennen (1982) é apenas as características dimensionais, os coeficientes de forma e a velocidade do navio. Esses dados básicos possibilitam que o projetista estime a resistência total, para diferentes condições de deslocamento e velocidade, mesmo em fases preliminares do projeto.

5.1.2 Estimativa dos Coeficientes de Propulsão

Seguindo a mesma linha da resistência ao avanço, que define equações de regressão capazes de estimar a resistência total em águas calmas com base nas características básicas do navio, Holtrop e Mennen (1982) também apresentam uma metodologia para a estimativa dos coeficientes de propulsão com base em dados estatísticos de embarcações existentes.

O coeficiente de esteira, w , e o de redução da força propulsora, t , que são essenciais para determinar as eficiências do casco e do hélice, e a eficiência relativa rotativa, η_R , são definidos para modelos de embarcações com propulsores convencionais. Os coeficientes w e t para embarcações mono-hélices são apresentadas nas equações 16 e 17, respectivamente, e a eficiência relativa rotativa é apresentada na equação 18.

$$w = \frac{c_9 C_V L_{WL}}{T_A} \left(0.0661875 + \frac{1.21756 c_{11} C_V}{1 - C_{P1}} \right) + 0.24558 \sqrt{\frac{B}{L_{WL}(1 - C_{P1})}} \quad (16)$$

$$- \frac{0.09726}{0.95 - C_P} + \frac{0.11434}{0.95 - C_B} + 0.75 C_{stern} C_V + 0.002 C_{stern}$$

$$t = \frac{0.001979L}{B - BC_{P1}} + 1.0585 c_{10} - 0.00524 - \frac{0.1418D^2}{BT} + 0.0015 C_{stern} \quad (17)$$

$$\eta_R = 0.9922 - \frac{0.05908 A_E}{A_0} + 0.07424 (C_P - 0.0225 lcb) \quad (18)$$

Onde os coeficientes c_9 , c_{11} e c_{10} são calculados através de dados dimensionais do casco e do propulsor; C_V é o coeficiente de resistência viscosa calculado com base no fator de forma, $(1 + k)$, no coeficiente friccional, C_F , e no coeficiente de correlação, C_A ; T_A é o calado medido na região da popa; C_{P1} é um coeficiente baseado no C_P e no lcb ; e C_{stern} é um coeficiente tabelado, que depende do tipo de popa do navio.

5.1.3 Integração Casco-Hélice

Para a estimativa da potência propulsiva requerida, a eficiência do propulsor em águas abertas (η_0) tem que ser determinada. Holtrop e Mennen (1982) utiliza as curvas polinomiais da série *B-type*, apresentadas no trabalho de Oosterveld e Oossanen (1975), para determinar os coeficientes de torque (K_Q) e de empuxo (K_T) do propulsor. Essas curvas são válidas, porém, para números de Reynolds de $2 \cdot 10^6$ e precisam ser corrigidas para o Reynolds específico do navio, na condição analisada. Contudo, essa correlação deve ser baseada, segundo Holtrop e Mennen, pelo método proposto na ITCC-1978 (ITTC, 2011). As equações de correlação propostas pela ITTC-1978 são apresentadas nas equações 19 e 20.

$$K_{T-\text{navio}} = K_{T-\text{sérieB}} + \frac{\Delta C_D 0.3 P c_{0.75} Z}{D^2} \quad (19)$$

$$K_{Q-\text{navio}} = K_{Q-\text{sérieB}} - \frac{\Delta C_D 0.25 c_{0.75} Z}{D} \quad (20)$$

Onde ΔC_D e $c_{0.75}$ são coeficientes baseados nas características dimensionais do propulsor e de rugosidade das pás.

A série sistemática B é padrão na área de projetos navais, em que as curvas de K_Q , K_T e η_0 do hélice são definidas a partir das características básicas do propulsor (D , Z , A_0 , A_E e P). A eficiência do propulsor em águas abertas, para uma determinada condição de navegação, é definida a partir do cruzamento entre o coeficiente de empuxo do hélice com o coeficiente de empuxo do navio.

Para o cálculo da curva do coeficiente de empuxo do navio, aplica-se a margem de casco e mar (MR). Tal acréscimo se faz necessário pois ao calcular-se a resistência ao avanço, considera-se o mar calmo, sem ondas nem correntes, e o casco liso, sem formação de craca, por exemplo.

Desta forma, a equação para o cálculo do coeficiente de empuxo do navio é dada pela equação 21.

$$K_{T-casco} = \frac{R_T(1 + MR)}{(1 - t)\rho D^2 V^2 (1 - w)^2} J^2 \quad (21)$$

5.1.4 Estimativa da Ventilação no Propulsor

A ventilação pode ocorrer quando o hélice opera próximo a superfície livre. Se o hélice estiver submetido a uma carga elevada, a baixa pressão sobre suas pás pode criar um funil através do qual o ar é aspirado a partir da superfície livre.

O propulsor estabelece um fluxo rotativo que causa deformação na superfície da água, desenvolvendo um vórtice, que é amplificado até desenvolver um funil de ar. Em seguida, as cavidades de ar se espalham sobre as pás do hélice, reduzindo sua sustentação e arrasto. Um hélice totalmente ventilado pode perder até 80% do seu empuxo e torque.

A ventilação é, tipicamente, dividida em três regimes: não ventilada, parcialmente ventilada e totalmente ventilada.

O regime não ventilado ocorre quando o hélice está profundamente submerso ou totalmente submerso com o hélice submetido à baixa carga. Já o regime parcialmente ventilado é um regime transiente em que os dois outros regimes ficam alternando. E o regime totalmente ventilado ocorre quando a pressão do lado da aspiração do hélice é praticamente a pressão atmosférica, formando uma cavidade de ar em todas as pás do propulsor.

Para a estimativa da redução do empuxo gerado pelo hélice devido a esse fenômeno foi utilizada uma regressão, baseada em resultados experimentais, apresentado por Faltinsen et al., definida pela equação 22 (Smogeli, 2006):

$$c_{vent} = \begin{cases} 0 & se \frac{h_v}{R} < -0,48 \\ 1 - 0,675 \left(1 - \frac{0,769 h_v}{R} \right)^{1,258} & se - 0,48 \leq \frac{h_v}{R} \leq 1,3 \\ 1 & se \frac{h_v}{R} > 1,3 \end{cases} \quad (22)$$

5.2 Estimativa do Consumo de Combustível com Aplicação de CFD para a Obtenção do Fator de Forma e do Coeficiente de Esteira Nominal

O modelo de predição de potência de Holtrop e Mennem (1982) pode ser aplicado para quaisquer embarcações de deslocamento de baixa velocidade, sendo amplamente utilizado em etapas de projeto em que não é conhecida a geometria do casco. Por outro lado, quando o casco da embarcação é conhecido, tradicionalmente, a resistência ao avanço e os coeficientes de propulsão são estimados por meio de modelos experimentais em escala reduzida, ensaiados em tanques de prova. Isto porque as particularidades, principalmente, da proa e da popa do navio interferem significativamente no comportamento fluidodinâmico do casco e o modelo de predição citado pode apresentar grande imprecisão na estimativa de parâmetros sensíveis a essas características geométricas.

Atualmente, com o desenvolvimento da era computacional, surgiram ferramentas numéricas robustas capazes de simular fenômenos físicos complexos que vem sendo aplicado na área da engenharia com o objetivo de substituir análises empíricas de alto custo de capital. Na área naval, simulações em códigos numéricos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tornaram-se alternativa aos ensaios de tanque de prova.

Neste trabalho, como o caso estudado no capítulo 6 foi baseado em um navio existente da frota da Transpetro, cujo casco é conhecido, o CFD foi utilizado como ferramenta auxiliar para o cálculo da componente de resistência de forma e o coeficiente de esteira nominal, através de um modelo em escala reduzida. O software utilizado nas simulações de CFD foi o StarCCM+, e a geometria do casco

estudado foi construída no software de CAD Rhinoceros 5.0 e importado para o CFD.

Em navios com características de alto valor de C_B e baixo número de Froude, como é o caso do petroleiro, a resistência de forma é a componente mais significativa de R_T depois da friccional, no entanto, como a própria denominação indica, a resistência de forma depende da geometria do casco, enquanto que a friccional não. Já a esteira na região do propulsor interfere consideravelmente na eficiência do hélice e do casco, variando, principalmente, com a forma da popa e a posição do propulsor.

O CFD calcula a resistência no casco dividindo-a em duas parcelas, uma friccional e outra de pressão. A componente de pressão, por sua vez, é formada pela resistência de forma e outras resistências gravitacionais como a de formação de ondas. Para isolar apenas a componente de interesse, a estratégia utilizada foi a não consideração dos efeitos de superfície livre nas simulações, já que, para o tipo de navio estudado, esses efeitos são pequenos e não alteram significativamente nas componentes de resistência de natureza viscosa (friccional e de forma) (Larsson, et al., 2010).

Outro dado extraído do software foi o campo de velocidade do fluido na região do propulsor. A partir do campo de velocidade foi possível calcular a esteira nominal com o auxílio de uma rotina em Matlab que, basicamente, recebe os dados do campo de velocidade do CFD, separa as componente de mesma direção do deslocamento do modelo e calcula a esteira nominal a partir da velocidade média do fluxo do fluido na região das pás do hélice.

Porém, a esteira deve ser corrigida para o navio em escala real e essa correlação foi estimada a partir da equação 23 apresentada pela ITTC-1978.

$$w_S = (t - 0.04) + (w_M - t - 0,04) \frac{(1 + k)C_{FS} + \Delta C_F}{(1 + k)C_{FM}} \quad (23)$$

Em que w_S é a esteira do navio e w_M a esteira do modelo.

Os demais parâmetros necessários para a estimativa do consumo de combustível foram calculados a partir do modelo de predição de potência apresentado na seção anterior. A figura 7 apresenta como foi proposta a metodologia numérica, que

incorpora resultados simulados em CFD com a rotina de predição programada no ambiente Matlab.

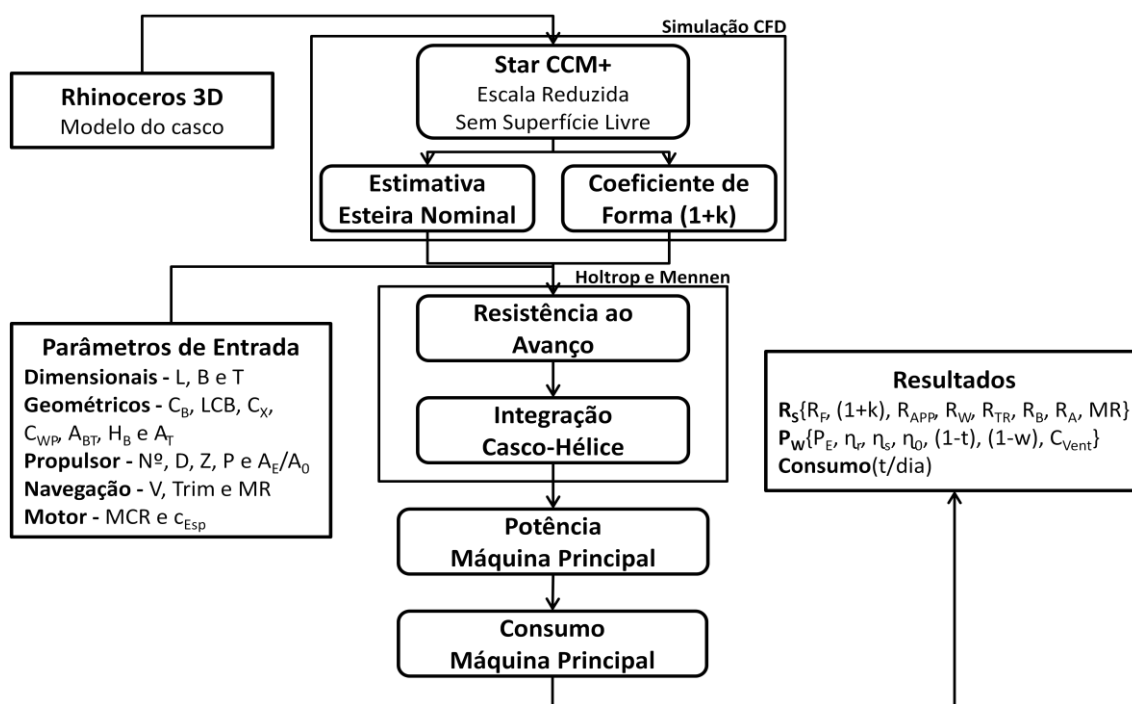


Figura 7 - Metodologia proposta para a estimativa do consumo de combustível de navios

5.2.1 Configuração do Modelo de CFD

O StarCCM+ trata-se de um software baseado na discretização em volumes finitos, que trabalha com escoamentos incompressíveis, transientes, multifásicos com uma estratégia de solução baseada no método VOF (*Volume of Fraction*) com discretização de segunda ordem no tempo e espaço. As equações de quantidade de movimento e pressão são resolvidas segregadamente, com equações adicionais de turbulência do modelo $k - w$ (Wilcox, 1993) e de fração de volume. As equações de quantidade de movimento, continuidade e fração de volume são apresentadas pelas equações 24, 25 e 26, respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_i V_j + \rho v'_i v'_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho B_i \quad (24)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha U_i) = 0 \quad (26)$$

Nos cálculos, o critério iterativo utilizado é o do decaimento dos resíduos de todas as equações na norma *rms* (*root-mean-square*) de, ao menos, 2 ordens de grandeza. O software disponibiliza poucas opções para controle mais rígido sobre os *settings* numéricos e geração de malha, de modo que obter resíduos mais baixos que esse nível demanda consideravelmente mais tempo. Contudo, a precisão dos resultados pode apresentar erros na ordem de 10% na incerteza numérica destes cálculos que, por sua vez, apresentam incertezas na ordem de 10-15% em geral, segundo Wilcox (1993).

5.2.2 Modelo do Casco

O casco escolhido na análise de caso do capítulo 6 apresenta geometria conhecida de um navio petroleiro do tipo Suezmax da frota da Transpetro denominado Nordic Spirit, em que o modelo de linhas do casco e o design característico da proa e da popa da embarcação estão apresentados na figura 8 e na figura 9.

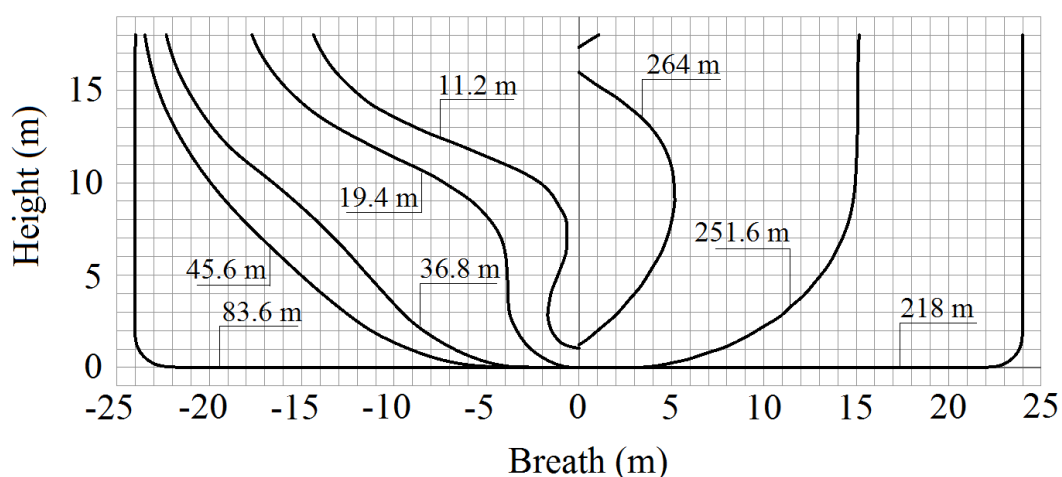


Figura 8 - Plano de linhas cotado a partir da perpendicular de ré

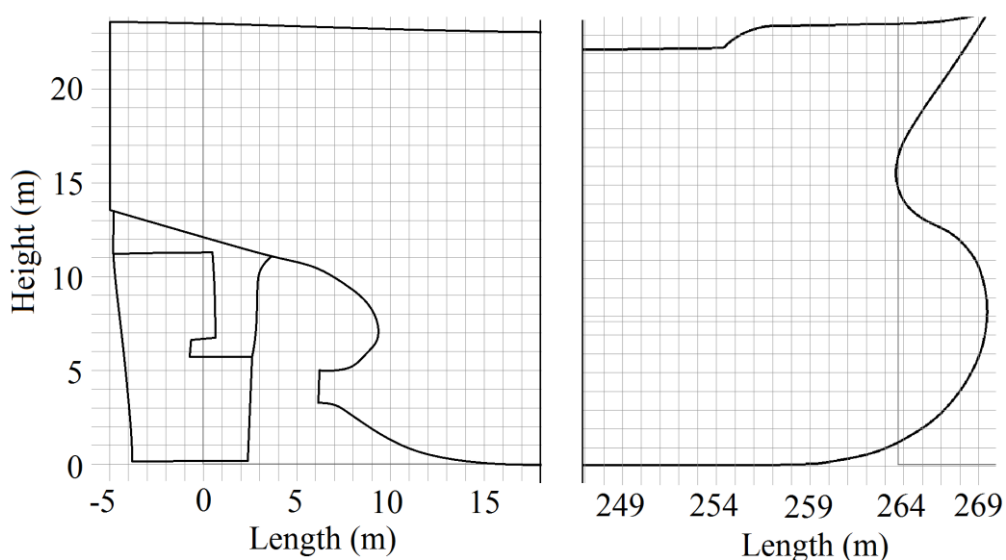


Figura 9 - Popa e proa da embarcação

A escala escolhida para a análise foi de 1:70 devido a simplificações da análise em CFD, que pode apresentar alta imprecisão para simulações com elevado valor de número de Reynolds, e devido à validação dos resultados, já que a resistência ao avanço deste modelo foi analisada por meio de ensaios em tanque de reboque no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), cujos resultados são conhecidos.

Os ensaios em escala reduzida foram realizados obedecendo a similaridade de Froude, de modo que as relações apresentadas na tabela 6 são observadas.

Tabela 6 - Fatores de escala

Parâmetro	Fator de escala
Comprimento	λ
Massa	λ^3
Força	λ^3
Momento	λ^4
Velocidade	$\sqrt{\lambda}$

Respeitando os fatores de escala, o casco do navio Nordic Spirit foi modelado no software Rhinoceros 5.0, assim como está apresentado na figura 10, e as suas características principais estão presentes na tabela 7.

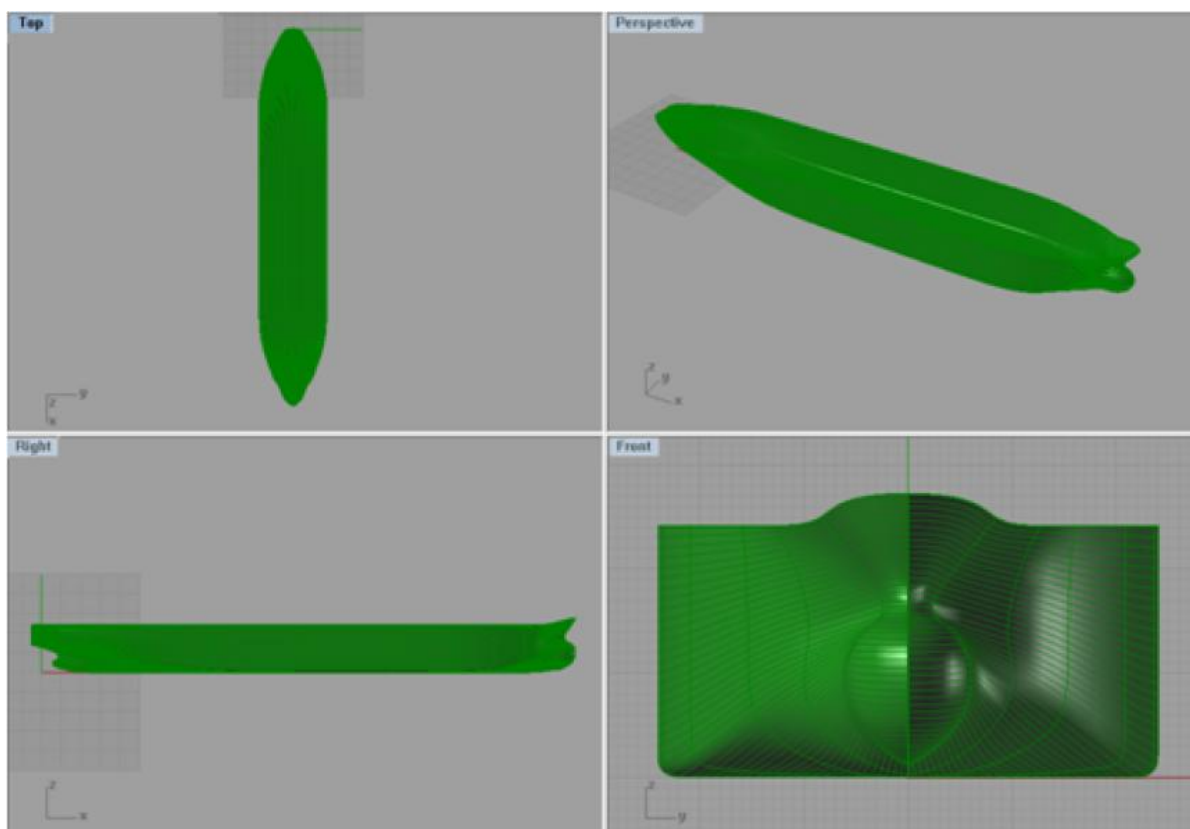


Figura 10 - Modelo em escala 1:70 do casco da embarcação Nordic Spirit

Tabela 7- Dimensões principais da embarcação Nordic Spirit e do modelo em escala **1:70**

Parâmetros	Escala Real (m)	Escala Reduzida (m)
Comprimento Total	277	3,957
Comprimento entre perpendiculares	264	3,771
Boca	48	0,686
Calado carregado	16	0,229
Calado vazio	8	0,114
Calados intermediários	14	0,200
	12	0,171
	10	0,143

5.2.3 Domínio Computacional e Condições de Contorno

A figura 11 apresenta o layout do domínio computacional e condições de contorno utilizados nas simulações. O domínio reproduz a largura e profundidade do tanque de reboque do IPT, 6.6m e 4.4m, respectivamente.

No *inflow*, velocidade e quantidades turbulentas são especificadas com condições de contorno de Dirichlet e a pressão é extrapolada do interior do domínio (condição de Neumann). Já o *outflow* está a uma distância suficiente do navio para que não haja reflexão de ondas de pressão e, nesta fronteira, a pressão é especificada como condição de Dirichlet e as demais variáveis como condição de Neumann.

Quanto às fronteiras laterais, topo e fundo, são especificados como condição de simetria, ou seja, do tipo Neumann, com fluxo de quantidades sendo nulo.

Por fim, no casco é aplicada a condição de não escorregamento, em que a velocidade é nula (condição de Dirichlet) e as quantidades turbulentas também seguem a condição de Dirichlet, enquanto que a pressão é extrapolada (condição de Neumann).

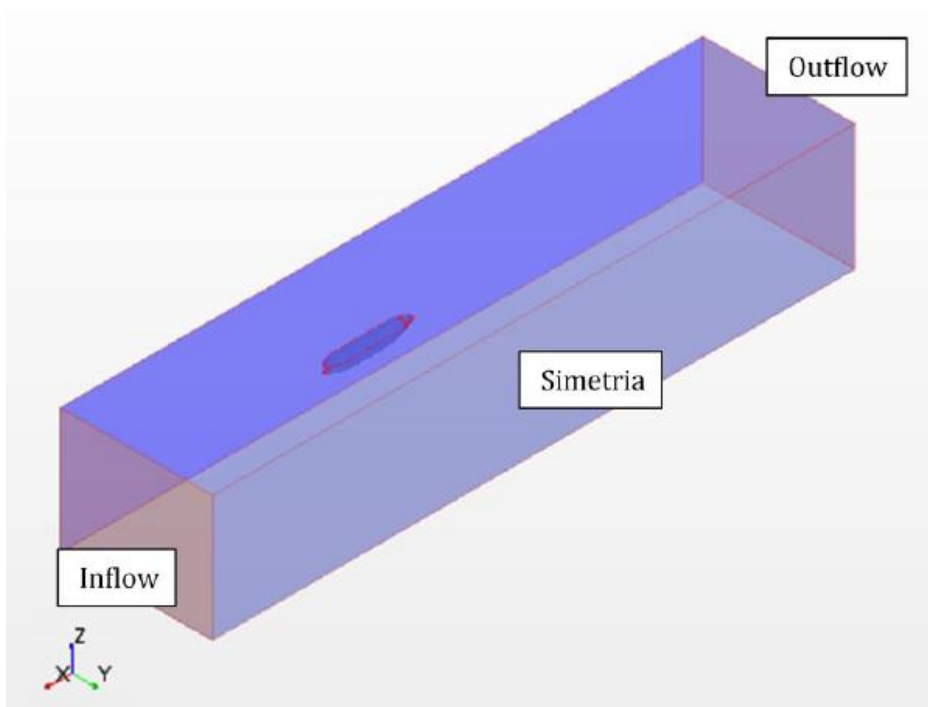


Figura 11 - Layout do domínio computacional e condições de contorno

5.2.4 Malha Computacional

A figura 12 apresenta o *layout* da malha utilizada nas simulações na região do bulbo. Trata-se de uma malha hexaédrica não estruturada com *hanging nodes*. Foram utilizadas camadas prismáticas, ou seja, que se ajustam aos contornos no navio, para possibilitar o cálculo preciso das grandezas de interesse na região da camada limite e um baixo número de Reynolds na parede, $y^+ < o(100)$, de forma que as funções de parede fossem aplicadas corretamente.

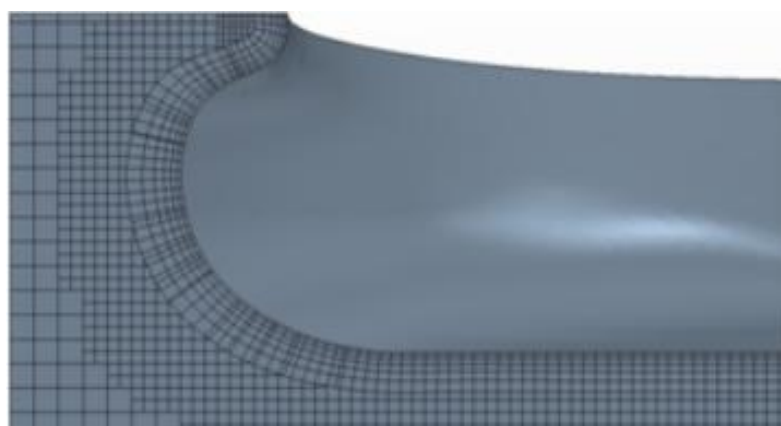


Figura 12 - Malha hexaédrica na região do bulbo da embarcação

As malhas tem número de células na ordem de 1 milhão, sendo que foi verificado que o resultado não apresentava variações significativas (menos de 2%) para ordens superiores de números de elementos.

5.3 Definição da Região de Operação e das Curvas de Consumo

O objetivo principal do estudo numérico é avaliar a variação do consumo de combustível com a velocidade de navegação para diferentes condições de calado que, nesta dissertação, será aplicado para o motor principal de um navio petroleiro aliviador.

A vantagem de simulações numéricas, utilizando metodologias simplificadas como as apresentadas neste capítulo, é a possibilidade de estudar grande variedade de condições de navegação com um baixo custo computacional.

A partir destes resultados, foi desenvolvida uma ferramenta gráfica, também em ambiente Matlab, que define, para todas as condições possíveis de navegação, o nível de consumo de combustível para uma determinada condição de calado e velocidade e como é esperado a sua variação com V .

A ferramenta apresenta, então, a região de operação para a navegação do navio e as curvas de nível de consumo dentro da mesma.

Está região é definida em seu contorno pelos limites operacionais do navio, com calado máximo e mínimo, e pelas restrições operacionais do motor principal, com os limites de carga.

Os parâmetros de entrada do programa são os consumos de combustível, calculados para uma malha de casos simulados em que considera o calado variando da condição de navegação em lastro, até carga máxima, para uma variação de velocidade que englobe o máximo possível da região de operação, e os dados do motor principal. A figura 13 ilustra como foi considerada a malha de casos simulados para a definição da região de operação.

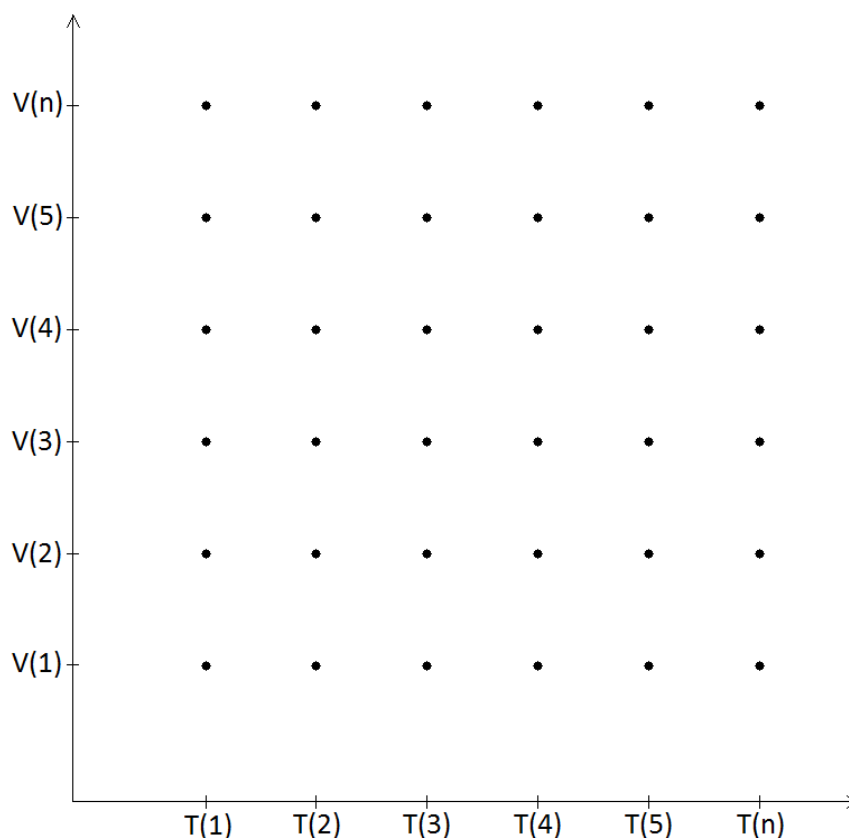


Figura 13 - Definição dos casos para determinar a região de operação

Após receber os dados de entrada, o programa constrói uma superfície de resposta através de interpolações por splines cúbicas. Primeiro, são determinadas as curvas de variação do consumo para cada calado simulado e, depois, essas curvas são utilizadas para a definição das curvas de nível de consumo, assim como estão ilustradas na figura 15.

Através da superfície de resposta, é definida a região de operação de navegação aplicando os limites operacionais do motor principal. A figura 14 ilustra os parâmetros que definem o contorno da região de operação de navegação.

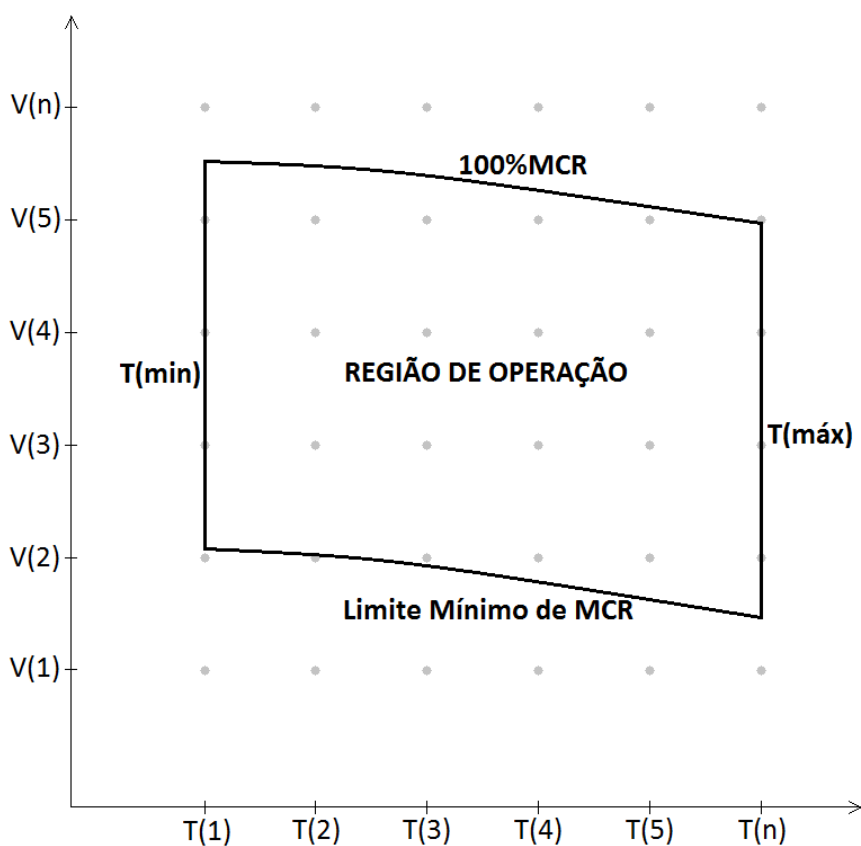


Figura 14 - Definição da região de operação de navegação

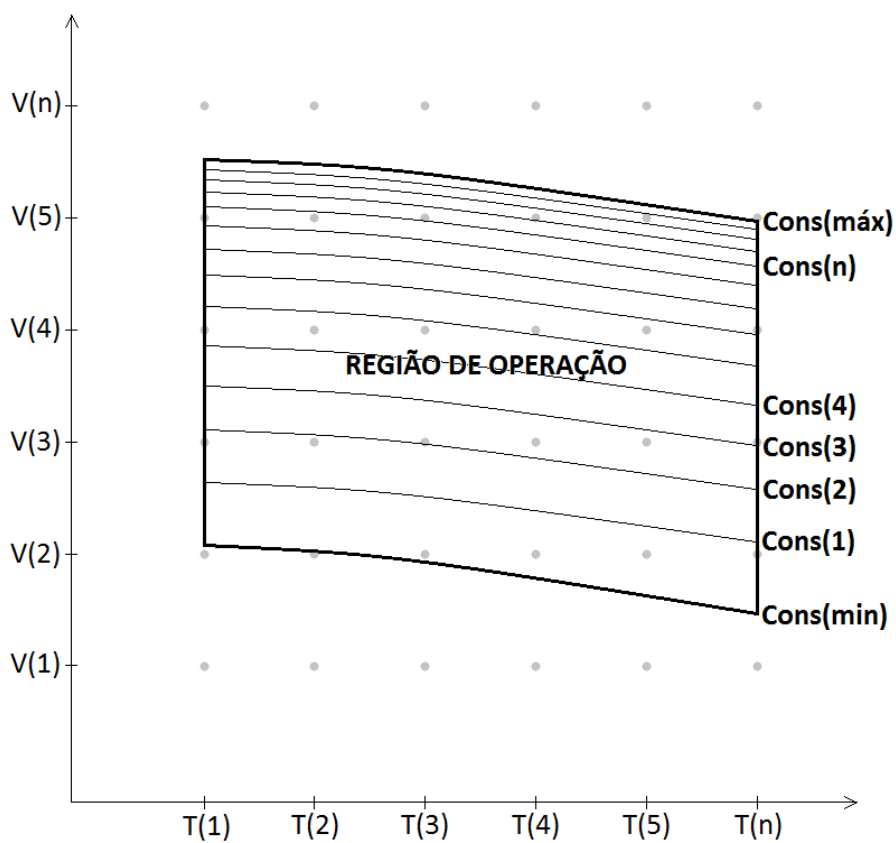


Figura 15 - Região de operação com as curvas de nível de consumo

A grande vantagem da ferramenta proposta neste trabalho de dissertação é em relação à sua praticidade e objetividade, podendo ser utilizada pelo comandante, ou mesmo o armador, para obter um maior controle dos consumos da embarcação, buscando as melhores condições de navegação para cada viagem.

Esta ferramenta numérica pode, ainda, ser calibrada a partir do monitoramento dos dados de navegação e de consumo de combustível reais da embarcação aplicado para poucas condições de navegação, viabilizando o uso da ferramenta a bordo, com alto nível de precisão.

Ao mapear os consumos de combustível durante a navegação, o armador pode estimar os ganhos nos custos operacionais com a redução da velocidade e definir, assim, as condições ótimas de navegação de cada viagem.

No entanto, como foi apresentado na seção 4.1, os motores convencionais podem apresentar problemas mecânicos com a operação contínua em baixa carga, como aumentar a taxa de carbonização na câmara de combustão e desgaste devido à lubrificação inadequada, e cuidados com a manutenção devem ser tomados para evitar custos elevados com reparos e com a embarcação inoperante devido a esses problemas.

A ferramenta também pode ser construída com um layout personalizado para cada embarcação afim de facilitar a visualização e a interpretação de cada modo operacional do navio, e outros resultados, como a variação do consumo por viagem, dada uma variação de velocidade, podem ser incorporados à mesma para facilitar em tomadas de decisões do operador.

O capítulo 6 apresentará um caso exemplo de aplicação da ferramenta para um navio petroleiro Suezmax, em que as metodologias numéricas apresentadas neste capítulo foram aplicadas para a determinação dos consumos das regiões de operações, e o potencial deste tipo de estudo será discutido para o perfil operacional do navio, avaliando as possíveis melhorias esperadas em diferentes situações ou tomadas de decisões.

6 Caso Exemplo - Navio Aliviador

A embarcação estudada é um petroleiro Suezmax adaptado para realizar operações de alívio de petróleo, em regiões que não apresentam sistemas de escoamento por oleodutos, em plataformas FPSOs operando em águas brasileiras.

A escolha do navio aliviador específico foi baseada em sua importância, sendo responsável pelo transporte, da plataforma para o continente, de quase toda a produção de petróleo offshore do Brasil, e, também, pelo seu perfil operacional que apresenta condições para reduzir a velocidade de navegação sem que esse processo resulte em perdas econômicas e/ou financeiras para o operador.

Neste capítulo foi avaliado o consumo de combustível para diferentes condições de velocidade e carga do navio tipo a partir das metodologias numéricas apresentadas no capítulo 5 e, com base no perfil operacional definido na seção 6.1.1, foram discutidas possíveis melhorias na navegação que resultariam em consumos mais eficientes de combustível.

Com isto, o estudo foi dividido em três partes, sendo que a primeira consiste na descrição do navio aliviador e de seu perfil operacional, a segunda no estudo numérico e, por fim, a discussão dos resultados apresentados e a avaliação da aplicação do estudo no navio aliviador.

6.1 O Navio Aliviador

Brasil tem apresentado um crescimento surpreendente na produção de petróleo nas últimas duas décadas, passando de 0.7 para 2.1 milhões de barris por dia no período de 1995-2015, com mais de 90% da produção *offshore* (Fonte: Petrobras).

Com grande parte das reservas *offshore* concentrada em águas remotas, a produção é realizada por plataformas flutuantes, como o sistema FPSO, plataformas com a capacidade de exploração, produção e armazenamento do óleo. Além disso,

intensificou a utilização de navios aliviadores como a principal fonte de escoamento da produção, já que o uso de dutos seria inviável economicamente.

O processo de escoamento de produção *offshore* utilizando este tipo de embarcação é conhecido como *offloading*. Nele a unidade de armazenagem na área de produção descarrega no navio aliviador e este leva a carga até o terminal na costa (figura 16).



Figura 16- Operação de offloading ou de alívio [Fontes:Bluewater e PRN online]

As operações de *offloading*, ou de alívio, possuem uma importância fundamental para o desempenho de sistemas *offshore* que utilizam unidades de armazenagem e alívio de petróleo – FSO ou unidades de produção, armazenagem e alívio de petróleo – FPSO.

No caso de *offloading* de petróleo, o navio utilizado é um petroleiro que cada vez mais apresenta especialização para este tipo de operação.

Nas primeiras manobras de *offloading*, que datam de 1975 eram utilizados petroleiros convencionais que, com o auxílio de rebocadores, faziam seu carregamento em auto mar.

Com o avanço tecnológico, foi desenvolvido o sistema de posicionamento dinâmico, que é um sistema que atua na propulsão do navio com a finalidade de reduzir ao máximo as variações de posições da embarcação devido a perturbações ambientais (correntes, ventos e ondas). Com esse sistema, o aliviador pode fazer uma aproximação mais eficiente da unidade exploradora e também, durante a operação de descarga, manter quase que constante a distância do mesmo, aumentando a segurança.

O país é um dos maiores produtores de petróleo *offshore* do mundo cuja principal exploradora e produtora é a estatal de capital aberto Petrobras. A empresa conta

com a sua subsidiária Transpetro para movimentar grande parte de sua produção, com uma frota atual de 56 petroleiros, sendo 16 navios aliviadores de grande porte (8 Suezmax e 8 Aframax).

Além da frota de aliviadores da Transpetro, a Petrobras e outras petrolíferas operam no Brasil com navios afretados, inclusive aliviadores que, em sua maioria, são petroleiros Suezmax adaptados para este tipo de operação.

6.1.1 Perfil Operacional

O estudo do perfil operacional do navio aliviador é importante para definir as condições de operação ótimas para a embarcação, isto é, sob quais condições a embarcação poderia navegar com o mínimo consumo de combustível, sem que estas resultem em perdas comerciais ou em problemas mecânicos.

Basicamente, a operação deste navio tipo pode ser dividida em viagem porto-plataforma, *offloading*, viagem plataforma-porto e descarregamento.

A primeira característica importante a ser destacada é em relação à distância média percorrida por viagem. Diferentemente das embarcações mercantes que realizam viagens internacionais de longo percurso, a rota do navio aliviador fica restrita à distância entre o campo de exploração de petróleo, cujo navio foi designado a realizar a operação de alívio, e o terminal definido para o descarregamento.

As distâncias entre o campo de produção e o terminal portuário, muitas vezes, não ultrapassam 300 km, o que caracteriza uma viagem curta. A figura 17 ilustra a bacia de Santos e dois dos principais terminais portuários que recebem a produção de petróleo brasileira, destacando dados de distância entre os portos e os campos de produção (Fonte: Transpetro).



Figura 17- Bacia de Santos e seus principais campos de exploração [Fonte: Petrobras]

O fato do navio tipo apresentar como características viagens curtas é um dado muito importante, pois, isso significa que, navegar com velocidades mais baixa não impacta significativamente no acréscimo de tempo.

A segunda característica importante é em relação ao tempo de espera. Uns dos grandes problemas mercantes do Brasil é a saturação de seus principais terminais portuários, cujos tempos de espera são bastante elevados, chegando a ultrapassar a casa dos dias. Já o tempo de espera para o início da operação de alívio depende da disponibilidade da plataforma em receber a embarcação, dependendo, principalmente, de condições ambientais favoráveis.

Este parâmetro tem como característica ser variável, podendo ser de apenas alguns minutos, mas, também, podendo chegar na casa dos dias (Fonte: Transpetro). Esse fator possibilita a aplicação do *just in time*, em que o comandante pode controlar a velocidade do navio a partir de informações do porto ou da plataforma sobre a disponibilidade e a previsão para as operações de *offloading* e descarregamento.

A figura 18 apresenta uma esquematização teórica do perfil operacional de um navio aliviador tipo, em que o foco foi dado, apenas, para os tempos de viagem porto-plataforma e plataforma-porto e para os tempos de espera, tanto no porto, quanto na plataforma.

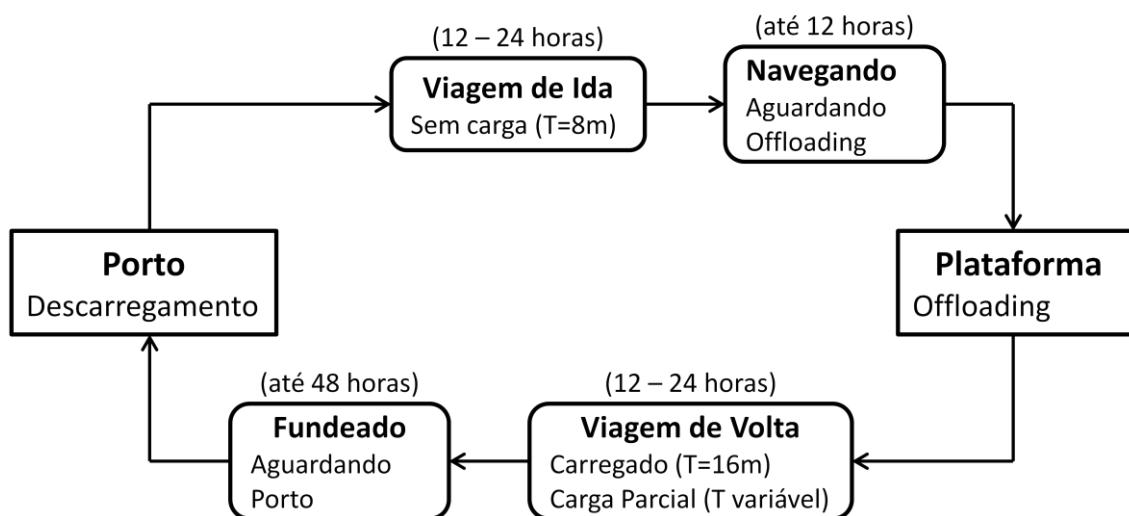


Figura 18 - Perfil operacional teórico do navio aliviador Suezmax considerado no caso exemplo

6.1.2 Características do Navio

As definições das características do navio tipo foram baseadas em uma embarcação real da frota da Transpetro denominada Nordic Spirit. Como o foco do caso estudado é o consumo de combustível durante a navegação, sem considerar a geração de energia auxiliar, os dados necessários para os estudos são as dimensões principais do casco, os coeficientes geométricos e as características do propulsor e do motor principal, além do plano de linhas para a construção do modelo tridimensional utilizado na análise de CFD, que foi apresentado na seção 5.2.2.

O navio aliviador tem como característica operar com diferentes cargas e o estudo realizado considerou essa variação entre os limites de carga máxima e descarregado definidos para os calados de 16m e 8m, respectivamente. As características dimensionais e geométricas, então, foram definidas de acordo com os calados estudados, com o objetivo de determinar a região de operação conforme foi apresentado na seção 5.3, e estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 - Dados dimensionais e geométricos do casco em função da variação do calado

Dados	Casos Analisados					Unidade
<i>T</i>	8	10	12	14	16	m
<i>L_{WL}</i>	259	262	266	270	274	m
<i>B</i>	48	48	48	48	48	m
<i>C_B</i>	0,72	0,75	0,77	0,79	0,81	m
<i>lcb</i>	0,8	1	1,15	1,3	1,4	%
<i>C_x</i>	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
<i>C_{wp}</i>	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	-
<i>A_{BT}</i>	24	24	24	24	24	m ²
<i>h_B</i>	5	5	5	5	5	m
<i>A_T</i>	0	0	8	24	48	m ²
<i>C_{stern}</i>	10	10	10	10	10	-

Definidos os parâmetros do casco, o próximo passo é definir as características do propulsor.

O navio Nordic Spirit é um petroleiro que foi adaptado para realizar operações de alívio, sendo uma das adaptações a substituição do propulsor original. O hélice original era otimizado para a navegação, visto que o transporte da carga era a operação com a maior ocupação e consumo de combustível. Já o novo propulsor foi otimizado para o posicionamento dinâmico durante a operação de alívio.

Uma destas adaptações foi a redução do diâmetro que, originalmente, era de 8.6m, passando para 7,2m (Fonte: Transpetro). Essa alteração reduz a eficiência do hélice na navegação, resultando em um maior consumo de combustível.

Para fins de comparação, foram simulados os modelos de predição de potência para os dois propulsores, original e adaptado, avaliando a perda de eficiência propulsiva e o impacto na velocidade de navegação/potência de máquina (V/P_S) no navio aliviador.

Os demais dados dos propulsores como, o número de pás, o coeficiente de área (A_E/A_0) e a relação passo diâmetro (P/D) foram fornecidos pela Transpetro. A tabela 9 apresenta as características dos modelos de propulsores estudados.

Tabela 9 - Características dos propulsores

Dados	Original	Adaptado	Unidade
D	8,6	7,2	m
Z	4	4	-
P/D	0,8	0,8	-
A_E/A_0	0,55	0,55	-

Com estas definições, o último passo é definir os parâmetros de máquinas.

O valor de MCR do motor principal do navio Nordic Spirit é de 19MW e a curva de consumo específico foi definida tomando como base um modelo de motor MAN, de baixa rotação, indicado para navios petroleiros e graneleiros (MAN, 2014). A figura 19 apresenta a curva de consumo específico do motor considerado para a estimativa dos consumos de combustível.

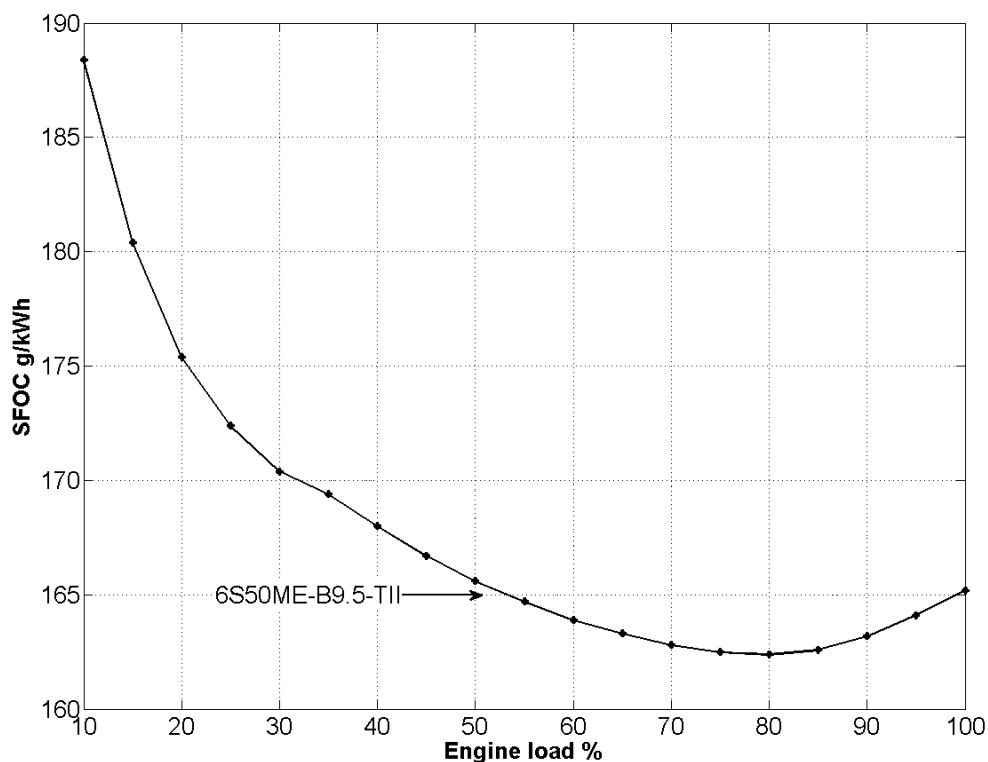


Figura 19 - Curva de consumo específico do motor selecionado (MAN, 2014)

6.2 Resultados Numéricos

Os resultados numéricos foram divididos em três partes. A primeira aborda a estimativa da resistência ao avanço do casco considerando as duas metodologias apresentadas no capítulo 5, depois são calculados os coeficientes propulsivos e as potências de máquinas para os dois modelos de propulsores definidos na seção 6.1.2 e, finalmente, são definidas as condições de operação dos modelos estudados, destacando os limites de velocidades e calados de operação e os consumos de combustível.

6.2.1 Resistência ao Avanço

A resistência ao avanço foi calculada para uma série de condições de velocidades e calados com o objetivo de explorar toda a região de operação da embarcação estudada, considerando a condição de trim nulo.

A região de operação do navio foi delimitada, conforme apresentado na seção 5.3, pelas condições de calado máximo e mínimo, definidas como 16 e 8m, respectivamente, e pelos limites de velocidades, que estão relacionados com a máxima potência de operação (MCR) e com o limite de baixa potência de operação do motor específico (24% de MCR).

A figura 20 apresenta os casos simulados, com o calado variando, em um intervalo de 2 metros, de 8 a 16m e a velocidade variando de 8 a 17 nós, totalizando 50 casos.

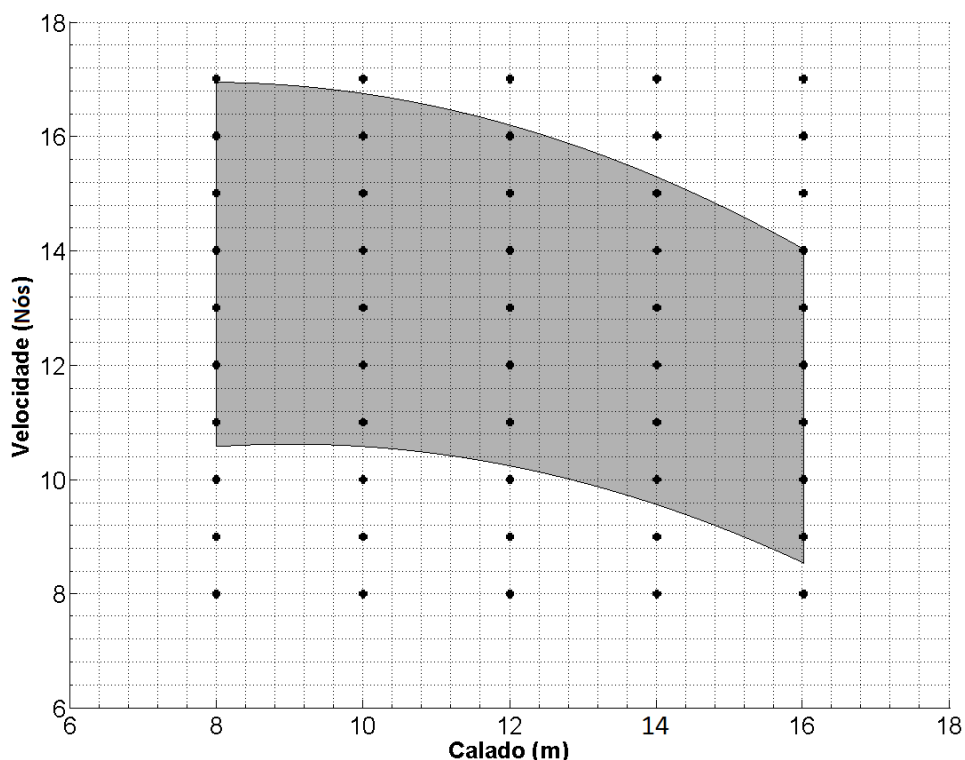


Figura 20 - Malha de calados por velocidades representando os casos simulados para a determinação da região de operação

No CFD, os mesmos casos foram simulados em escala 1:70 para estimar a variação do coeficiente de forma k com T e a variação do coeficiente de esteira w com T e V , respeitando os fatores de escala de $\sqrt{\lambda}$ para a velocidade e λ para as características dimensionais. A tabela 10 apresenta as dimensões dos calados simulados no StarCCM+ e a tabela 11 os valores de velocidade.

Tabela 10 - Relação entre os calados em escala real e 1:70

Dados	Calado					Unidade
Escala Real	8	10	12	14	16	m
Modelo	0,114	0,143	0,171	0,200	0,229	m

Tabela 11 - Relação entre as velocidades de avanço em escala real e 1:70

Dados	Velocidade										Unid.
Escala Real	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
Modelo	0,492	0,553	0,615	0,676	0,738	0,799	0,861	0,922	0,984	1,045	m/s

A validação dos resultados do modelo foi realizada com a comparação da resistência ao avanço calculada pelo CFD com um ensaio realizado para o mesmo navio pelo IPT. Os casos ensaiados pelo IPT da embarcação Nordic Spirit, na condição de trim nulo, e a comparação de resultados estão apresentados na figura 21 e na tabela 12.

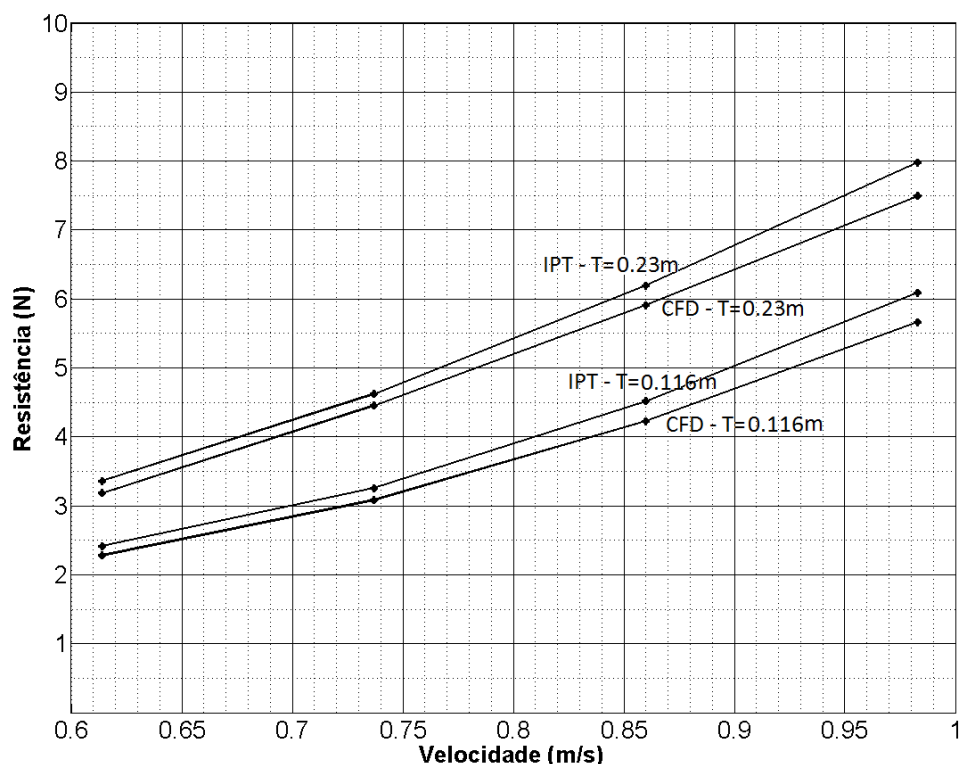


Figura 21 - Comparação da resistência ao avanço entre o modelo simulado em CFD e o ensaio de reboque realizado no IPT

Tabela 12 - Diferenças entre as resistências ao avanço calculadas na simulação em CFD e o ensaio de reboque realizado no IPT

Calado (m)	Velocidade (m/s)	Resistência IPT (N)	Resistência CFD (N)	Diferença (%)
0,116	0,614	2,415	2,281	5,5%
0,116	0,737	3,255	3,085	5,2%
0,116	0,860	4,515	4,227	6,4%
0,116	0,983	6,090	5,663	7,0%
0,23	0,614	3,360	3,183	5,3%
0,23	0,737	4,620	4,453	3,6%
0,23	0,860	6,195	5,911	4,6%
0,23	0,983	7,980	7,494	6,1%

A diferença na ordem de 5% a 7% entre os valores de resistência ao avanço foram considerados bastante satisfatórios, considerando as simplificações adotadas e as imprecisões do modelo numérico.

Após o modelo do casco validado, a componente de resistência de forma foi definida em escala real multiplicando por λ^3 e comparada com a componente friccional, estimada pela ITTC-1978, para a determinação do fator k em cada condição de calado avaliada.

Com isso, foi realizada a comparação entre os fatores de forma obtidos pelo nas simulações em CFD com os valores obtidos pela equação de regressão apresentada por Holtrop e Mennen (1982), e esses resultados estão apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Comparação entre os fatores de forma obtidos nas simulações em CFD com os estimados pela regressão de Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Casos Analisados					Unidade
Calado	8	10	12	14	16	m
k_{HM}	0,264	0,299	0,33	0,369	0,417	-
K_{CFD}	0,148	0,185	0,197	0,205	0,212	-

A diferença entre o fator de forma simulado (k_{CFD}) e o obtido da regressão (k_{HM}) foi significativa, com k_{HM} muito superior que k_{CFD} .

É certo que ambas as metodologias utilizadas para a estimativa de k apresentam incertezas, em que as equações de regressão, além de não serem sensíveis as particularidades geométricas do casco, também podem não representar adequadamente a embarcação tipo, e os modelos simulados em CFD apresentam imprecisões numéricas e efeitos de escala que, para no fator k podem chegar a ordem de 10 a 15% segundo estudos apresentados por Reven, Ploeg e Starke (2009).

O impacto da diferença obtida no fator de forma na resistência total foi na ordem de 10% como pode ser observada na figura 22 e na figura 23, em que a primeira R_S foi estimada apenas pelas equações de regressão de Holtrop e Mennen (1982) e a segunda utilizou o resultado do fator de forma estimada no CFD.

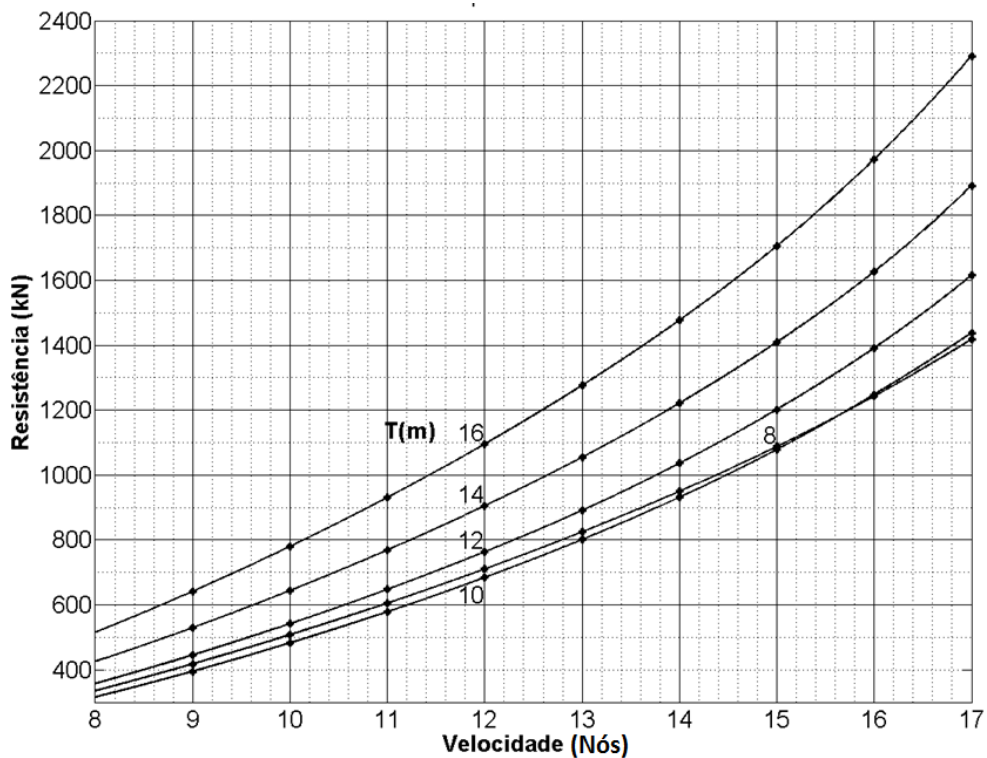


Figura 22 - Resistência ao avanço estimada pelo método de Holtrop e Mennen (1982)

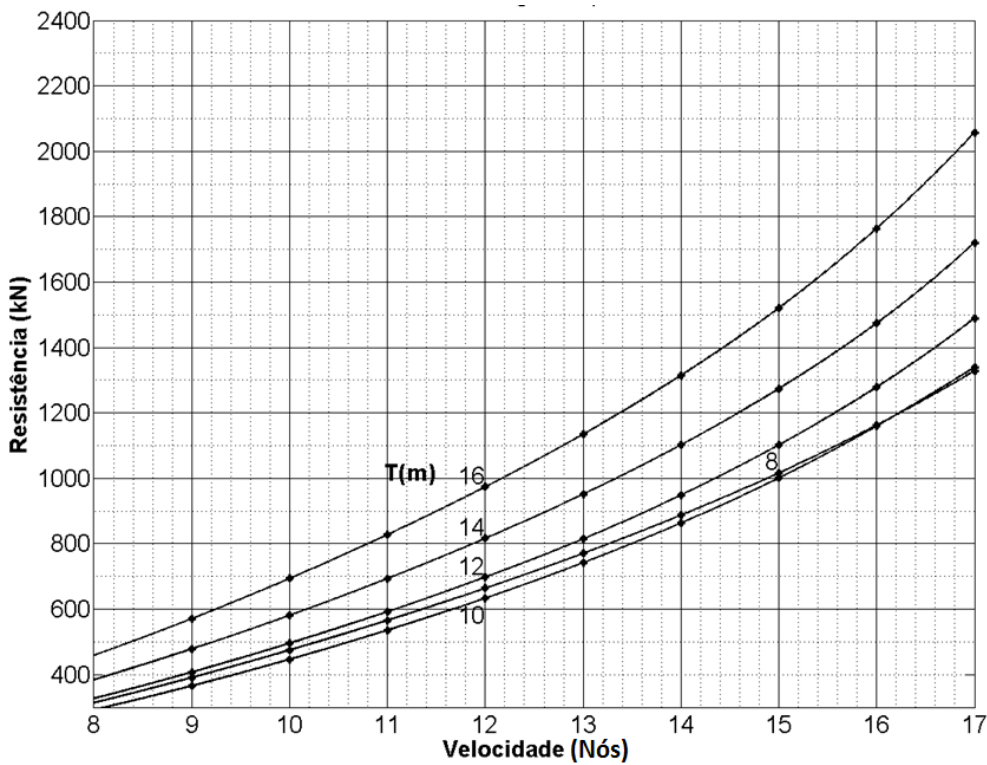


Figura 23 - Resistência ao avanço estimada a partir do fator de forma obtido em CFD

Uma característica importante de se destacar nas curvas de resistência foi o valor deste parâmetro para os casos de calado 8m, que foram superiores aos de 10m. Esse resultado é devido a resistência de pressão adicional do bulbo de proa (R_B) que, segundo a estimativa apresentada por Holtrop e Mennen (1982), apresenta valores significantes quando essa região do casco emerge.

O APÊNDICE A apresenta os resultados das componentes da resistência ao avanço para cada caso analisado e para as duas metodologias de cálculo.

6.2.2 Potência de Máquina

Para o cálculo da potência de máquina, a eficiência propulsiva foi estimada para os hélices de diâmetros diferentes (7,2m e 8,6m). Neste ponto, destaca-se o estudo realizado para a estimativa da esteira w , em que, assim como para o parâmetro k , também foi utilizado o CFD para a estimativa da esteira nominal, comparando com o resultado obtido pela equação de regressão apresentada por Holtrop e Mennen (1982).

Como foi apresentado na seção 5.2, a esteira nominal foi estimada a partir do plano de velocidades na região dos hélices nos modelos simulados em escala reduzida no software Star CCM+ e, depois, foi utilizada uma equação de correção, apresentada pela ITCC-1978 (ITCC, 2011b), para definir o parâmetro em escala real.

A região em que foram retirados os campos de velocidades para os dois modelos de propulsores nas simulações de CFD está apresentada na figura 24 e a figura 25 apresenta as linhas de fluxo na região da popa e os vetores de velocidades no plano do hélice em um caso específico estudado.

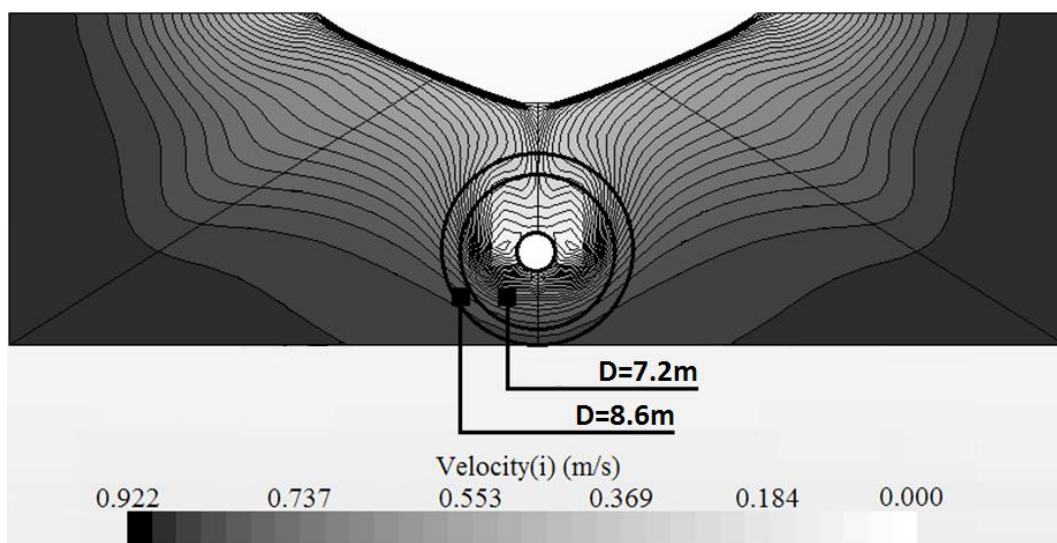


Figura 24 - Campo de velocidades no plano dos hélices dos modelos

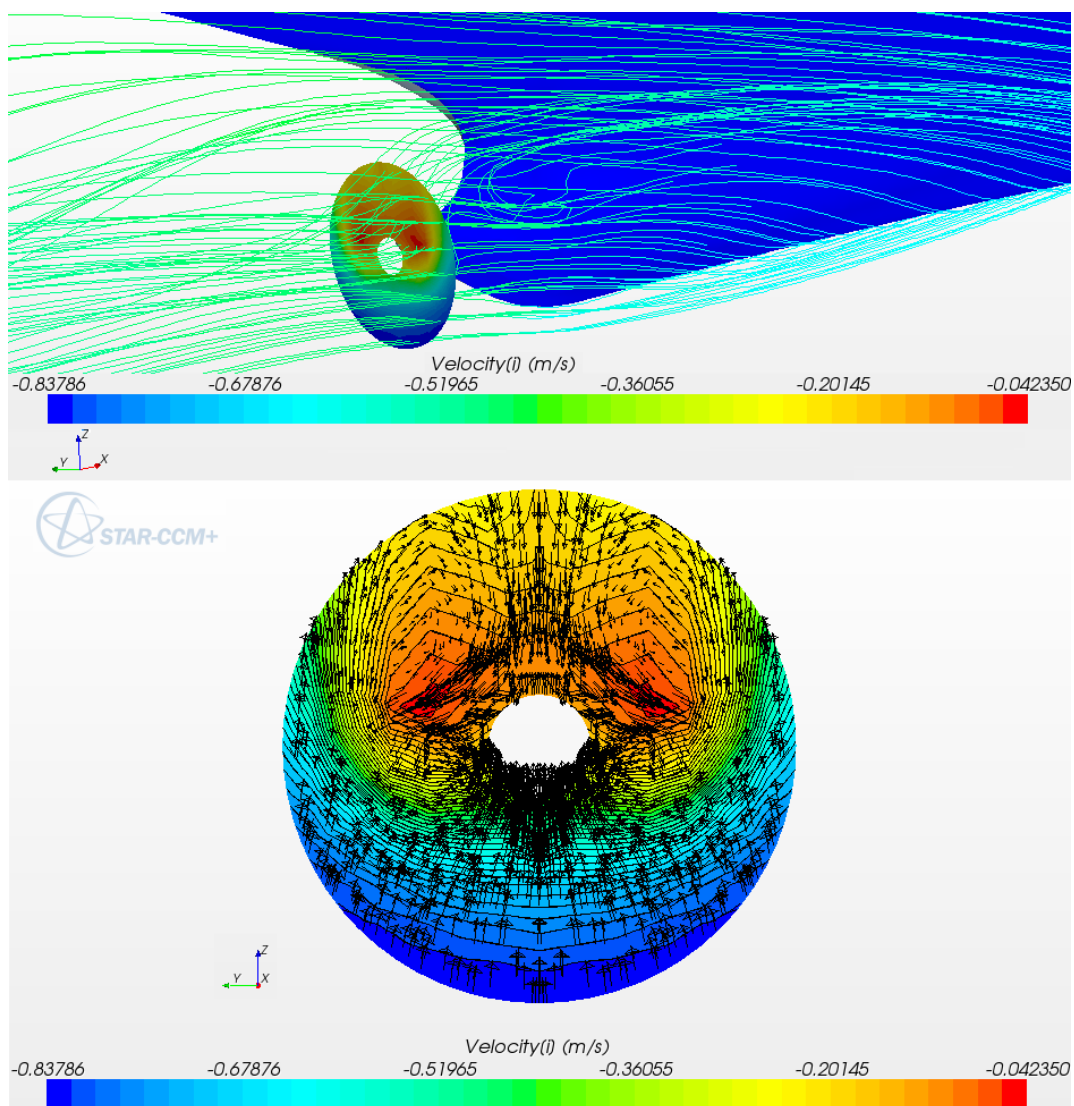


Figura 25 - Linhas de fluxo na região da popa do navio e o campo de velocidades na região do propulsor

A comparação entre os resultados obtidos pela metodologia que utiliza o campo de velocidades na região do hélice a partir das simulações em CFD com os resultados obtidos pelas equações de regressão pode ser observada na figura 26, que apresenta w em função de T para os dois diâmetros de hélices estudados na velocidade de 14 nós.

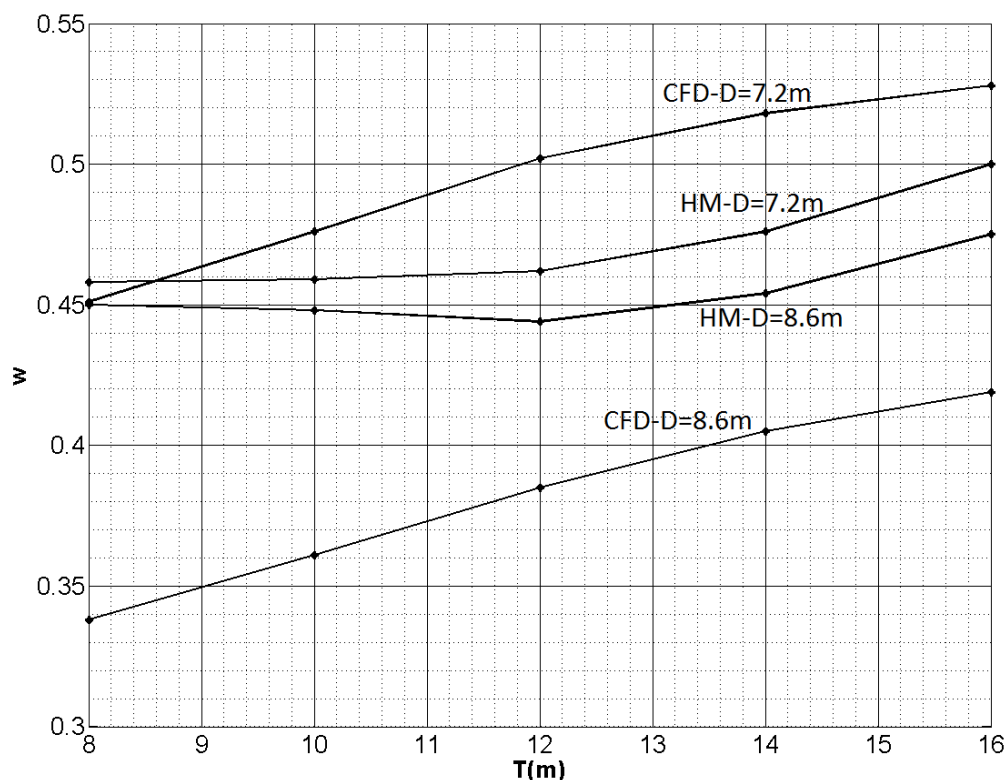


Figura 26 - Comparação do coeficiente de esteira (w) estimado a partir do CFD com o obtido pela regressão de Holtrop e Mennen (1982) para a velocidade de 14 nós

Neste estudo, podem ser destacados duas diferenças entre as metodologias utilizadas.

A primeira é em relação ao comportamento da variação de esteira com o calado. A equação de regressão não apresentou a mesma tendência de variação do modelo de CFD, que exibiu valores crescentes com o calado, porém com variação decrescente, enquanto que a equação de regressão exibiu pouca variação entre os calados de 8 a 12m e, depois, uma tendência de crescimento para calados acima de 12m.

A segunda é em relação aos valores de w obtidos para os hélices de diâmetros diferentes. Enquanto que pelo estudo utilizando CFD a esteira do hélice de 7.2m de

diâmetro apresentou valores superiores na ordem de 0.1 em relação do de $D=8,6\text{m}$, essa variação foi na ordem de, apenas, 0,02 no caso do coeficientes obtidos pela equação de regressão.

Apesar da esteira calculada pelo CFD não considerar os efeitos do propulsor (esteira nominal), essa aproximação pode ser utilizada e apresenta pequena imprecisão segundo Carlton (1998). Já as equações de predição não são sensíveis, nem em relação a geometria da popa, nem em relação a posição do hélice, e, portanto, podem apresentar valores ruins.

Avaliando as diferenças obtidas nos parâmetros w e k entre o modelo de predição e a metodologia proposta, que estima estes coeficientes utilizando simulações em CFD, no coeficiente propulsivo, foram obtidos os resultados apresentado pela figura 27.

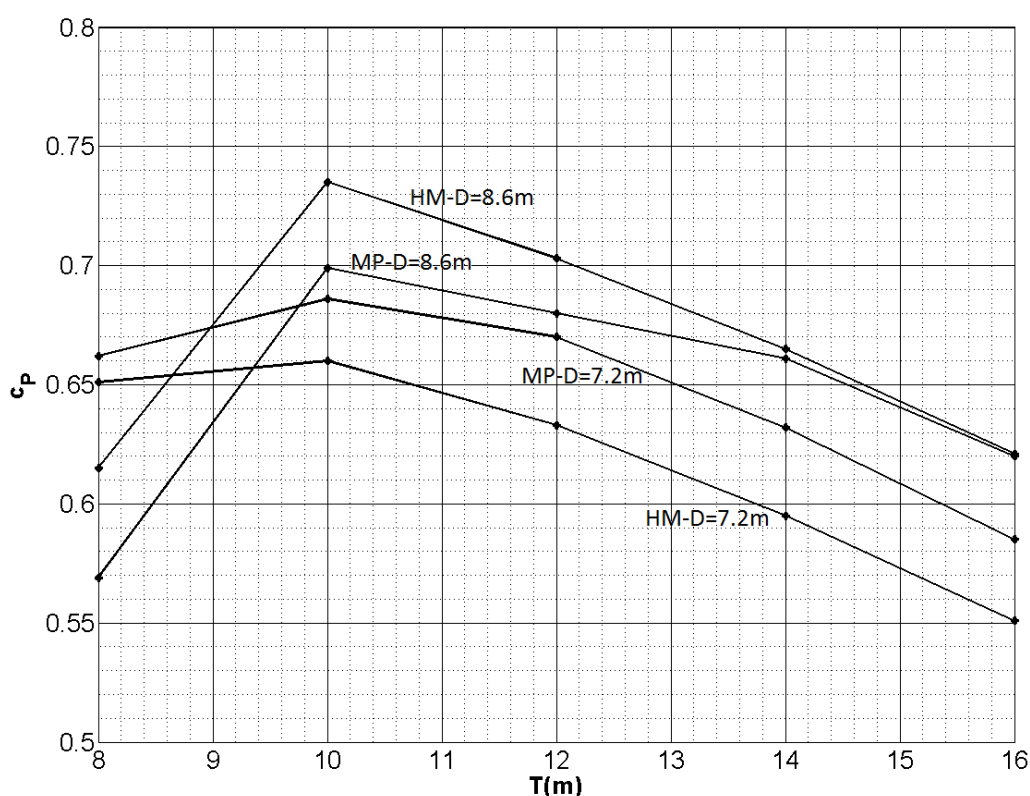


Figura 27 - Comparação entre os coeficientes propulsivo (c_p) obtido através da aplicação das equações de regressão de Holtrop e Mennen (1982) (HM) e a metodologia proposta (MP) que utiliza simulações em CFD para as estimativas de k e w

Observando as curvas de c_p do modelo de propulsor 8,6m e de 7,2m, nota-se que para o hélice de 8,6m de diâmetro o valor cai significativamente na condição de calado 8m. O motivo desta perda de eficiência é devido ao alto índice de ventilação,

já que, como foi considerado apenas a condição de trim nulo, o propulsor opera, nesta condição de calado, parcialmente emerso.

Depois, comparando as duas metodologias, para o hélice de diâmetro 7,2m, a MP apresentou c_p superior do que HM, sendo que, para calados acima de 12m, essa diferença foi na ordem de 6%. Como a potência de máquina é proporcional a R_T/c_p e R_T calculado em HM foi superior na ordem de 10% do que a obtida por MP, a diferença obtida na potência de máquinas foi de 15% a 20%, como pode ser observado nas figuras 28 e 29.

Já para os modelos de 8,6m de diâmetro, HM apresentou valores superiores de c_p na ordem de 5% entre os calados de 8 a 12m e, para os calados de 14 e 16m, os resultados foram praticamente iguais ao estimado no MP. Com isso, a diferença na potência de máquinas entre os dois modelos foi menor, sendo na ordem de 0 a 5% para os calados de 8 a 12m e 10% para 14 e 16m, como também pode ser observado nas figuras 30 e 31.

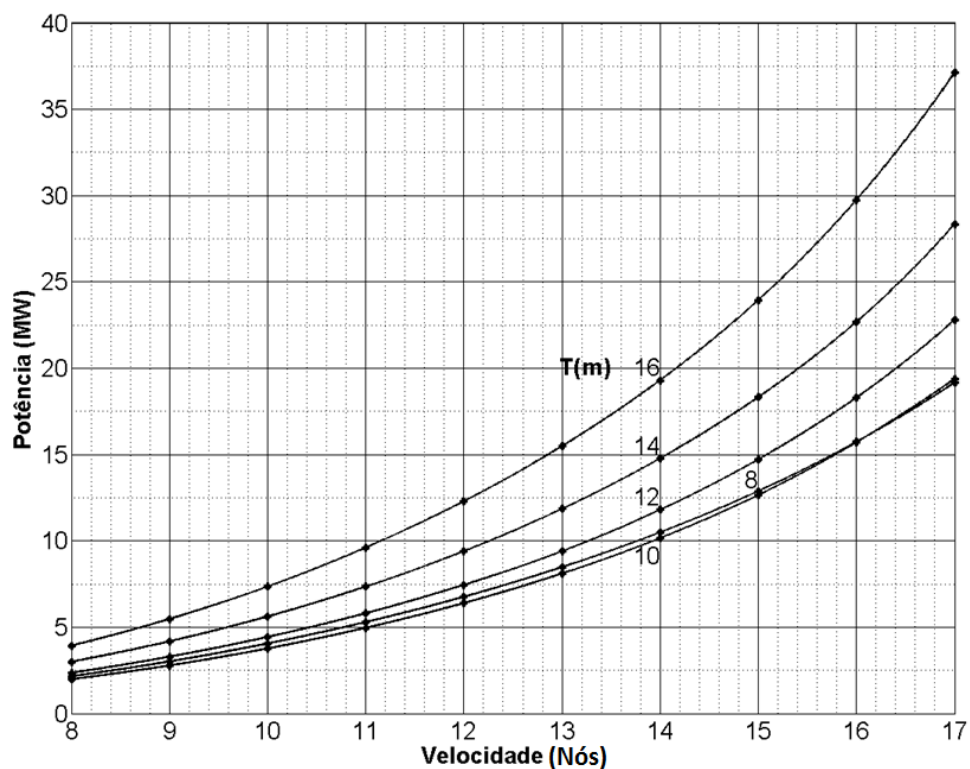


Figura 28 - Curvas de potência de máquinas estimada pelo método de Holtrop e Mennen (1982) para o hélice de diâmetro 7,2m

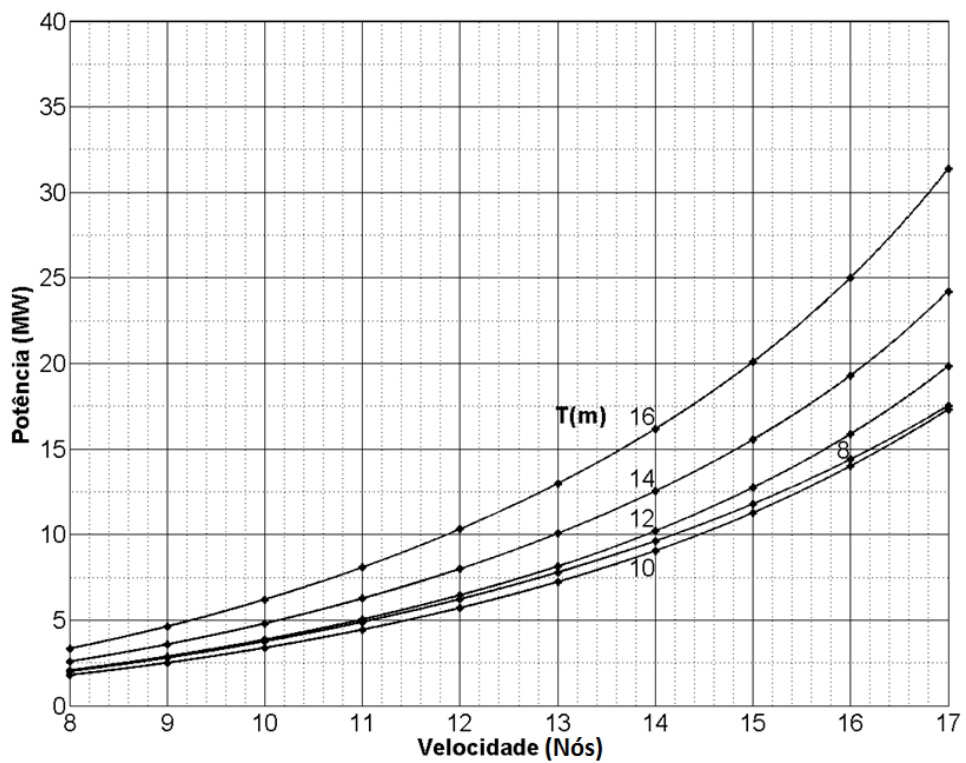


Figura 29 - Curvas de potência de máquinas estimada pela metodologia proposta para o hélice de diâmetro 7,2m

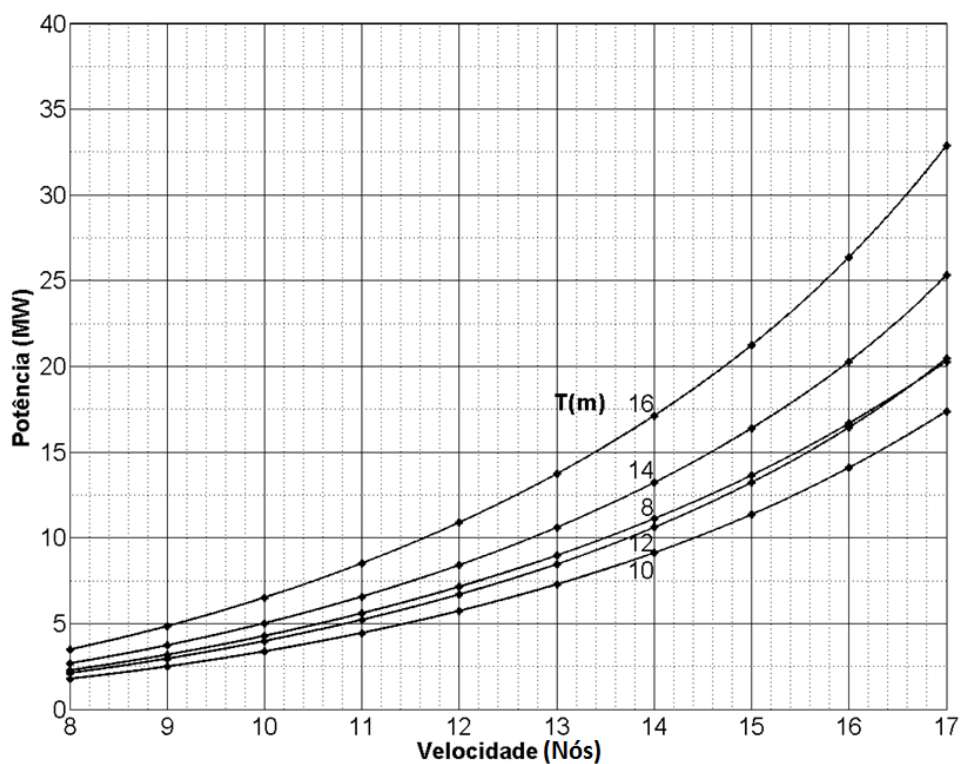


Figura 30 Curvas de potência de máquinas estimada pelo método de Holtrop e Mennen (1982) para o hélice de diâmetro 8,6m

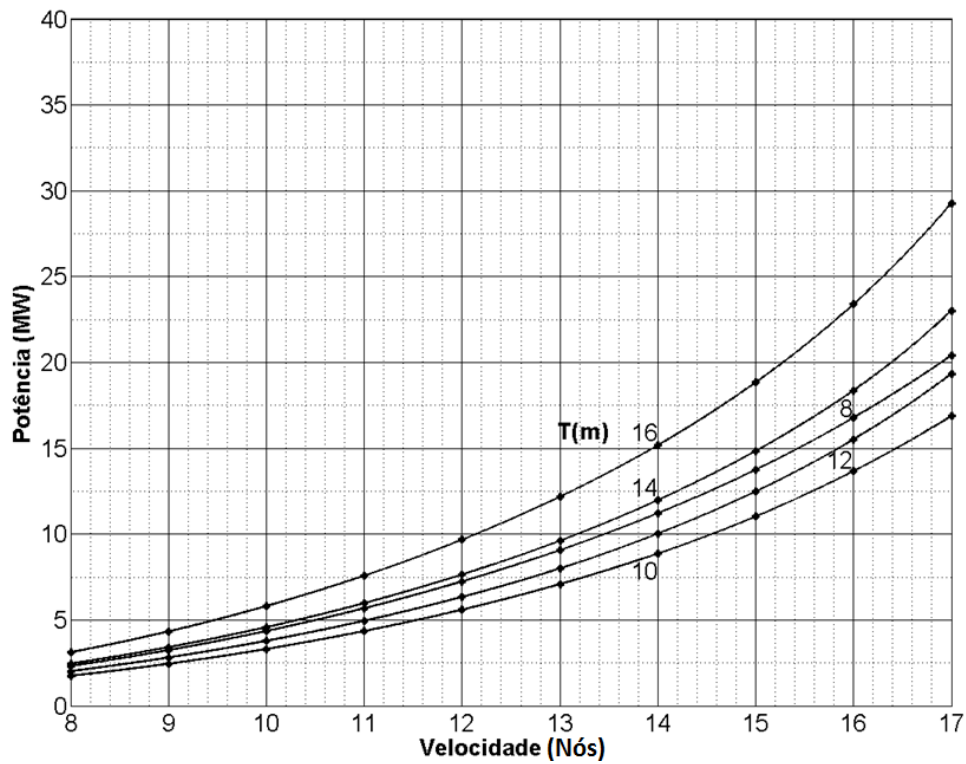


Figura 31 - Curvas de potência de máquinas estimada pela metodologia proposta para o hélice de diâmetro 8,6m

Analisando os resultados obtidos para os hélices de diâmetros diferentes, nota-se que a perda de eficiência do propulsor de $D=7,2\text{m}$ operando em calados de 10 a 16m é mais significativa na análise de HM, chegando a um valor de até 10%, enquanto que em MP essa diferença é de no máximo 5%.

Os valores dos coeficientes e potências de máquina, calculado para cada condição de calado, velocidade e diâmetro de hélice analisado, considerando a aplicação das duas metodologias estão tabelados no APÊNDICE B.

6.2.3 Regiões de Operação e Curvas de Consumo

As regiões de operação foram definidas aplicando as especificações técnicas do motor selecionado.

O motor MAN 7S70ME-C8.5-TII, cuja curva de consumo específico foi apresentada na seção 6.1.2, foi definido para máxima potência contínua (MCR) de operação de 19MW e apresenta valor mínimo de 24% de MCR, especificado para um índice de tolerância de 6% do aumento do consumo específico (174 g/kWh).

Aplicando esses limites para os casos simulados e interpolando para as condições de calados e velocidades intermediárias às analisadas, foram definidas as regiões de operação para os modelos de hélices com diâmetro diferentes, bem como as curvas de consumo em toneladas por dia (t/dia).

As figuras 32 e 33 apresentam a região de operação para o propulsor de 7,2m aplicado para a metodologia HM e MP, respectivamente, e as figuras 34 e 35 apresentam a região de operação para o modelo com propulsor 8,6m.

Essas figuras definem, para quaisquer condições de calado e velocidade, se a condição é operacional e, caso seja, qual o consumo de combustível do motor principal em toneladas por dia.

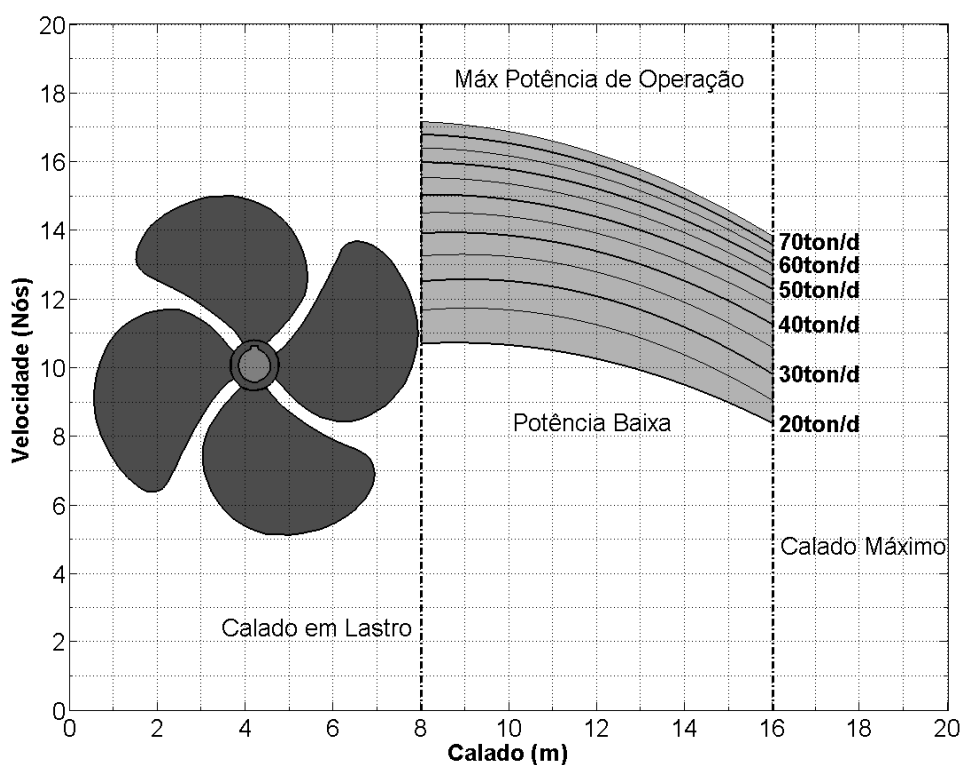


Figura 32 - Região de operação do modelo com propulsor 7,2m estimada a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM)

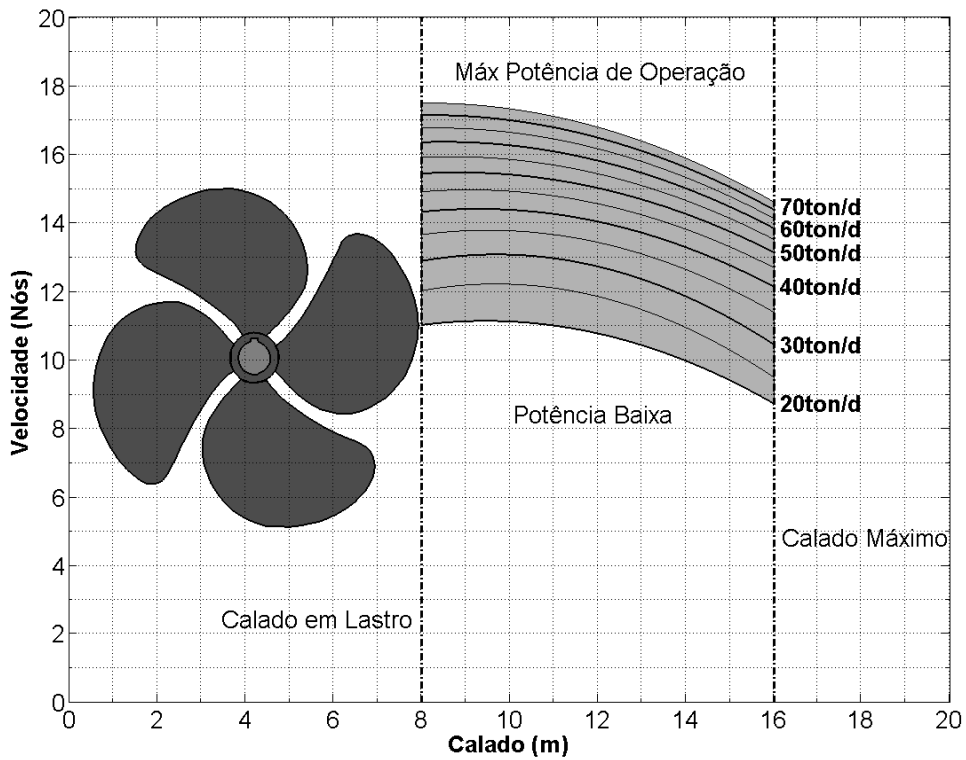


Figura 33 - Região de operação do modelo com propulsor de 7,2m estimada a partir da metodologia proposta (MP)

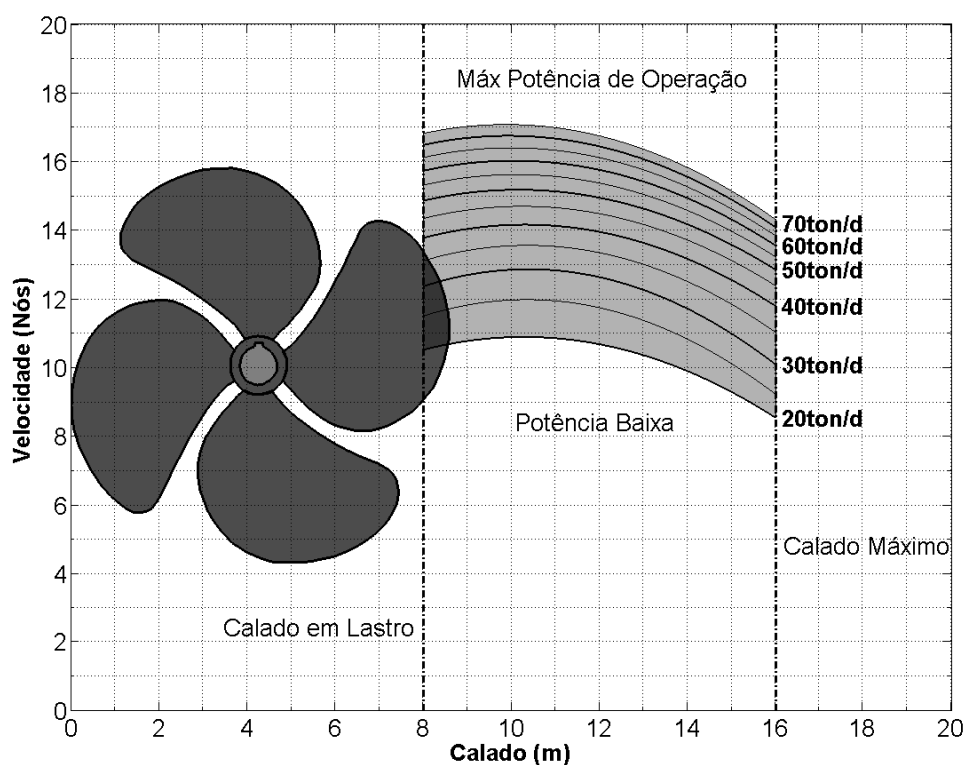


Figura 34 - Região de operação do modelo com propulsor 8,6m estimada a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM)

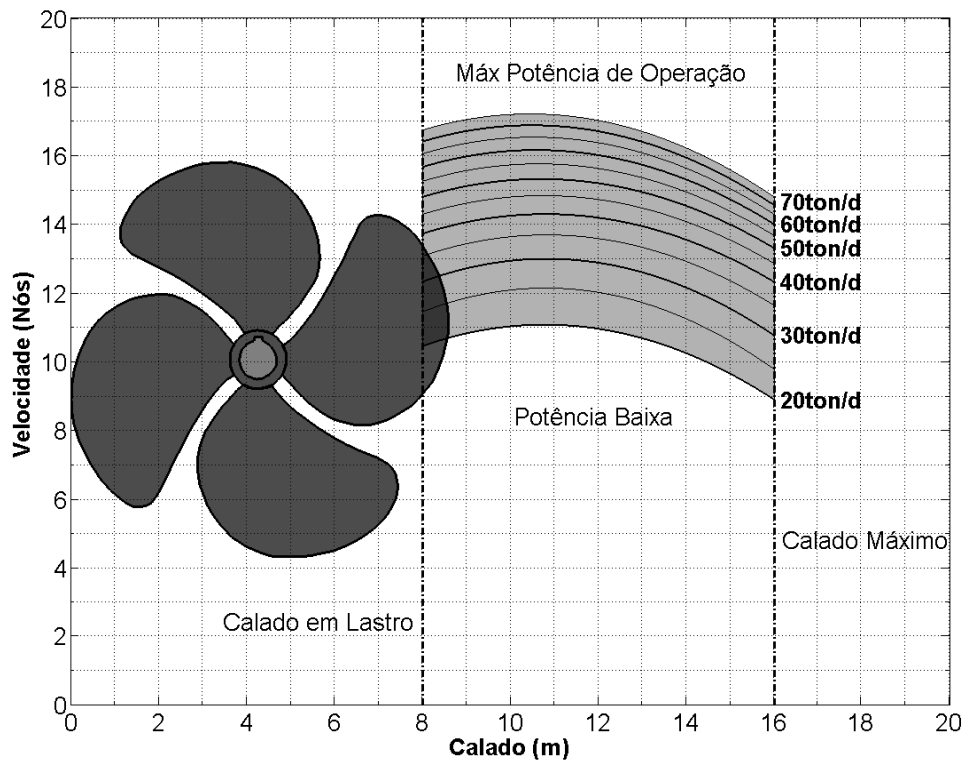


Figura 35 - Região de operação do modelo com propulsor de 8,6m estimada a partir da metodologia proposta (MP)

O layout da ferramenta apresenta o calado variando no eixo das abscissas e a velocidade de navegação no das coordenadas. A imagem do hélice representa a sua posição em relação a T e as linhas tracejadas os limites operacionais de calados mínimo e máximo, sendo a região em cinza, compreendida entre essas linhas, as combinações possíveis de T e V do navio.

O estudo foi apresentado apenas para o motor principal, mas também pode ser utilizado abordando o consumo global do navio, incorporando dados dos motores auxiliares e de geradores. Com isso, o operador pode avaliar a redução total do consumo de combustível, que podem ser obtidos com alta precisão, dependendo dos resultados monitorados do navio e das condições ambientais que podem ser utilizados para calibrar a ferramenta em tempo real.

Observando os resultados apresentados das regiões de operação, pode ser notado que para os calados de 10 a 16m o modelo de propulsor 8.6m apresenta um limite de velocidade máxima superior do que o de 7,2m, porém, para calados inferiores a 10m, a tendência do propulsor de 8,6m é de perder eficiência conforme a aproximação com a superfície, gerando altos índices de ventilação em suas pás, já que as condições simuladas abordaram apenas para a embarcação navegando sem trim.

Outra informação importante é em relação ao nível de redução de consumo comparado com a redução de velocidade. Em todos os gráficos o consumo reduziu a uma taxa muito superior do que a velocidade, principalmente nas regiões com índices de consumo superior a 50t/dia.

Essa tendência aponta o grande potencial de redução de consumo de combustível do navio aliviador mesmo para pequenas variações de velocidade, como pode ser observado nas figuras de 36 a 39, em que foi feito uma avaliação da redução do consumo de combustível por viagem com a variação da velocidade, utilizando como referência a máxima potência de máquinas.

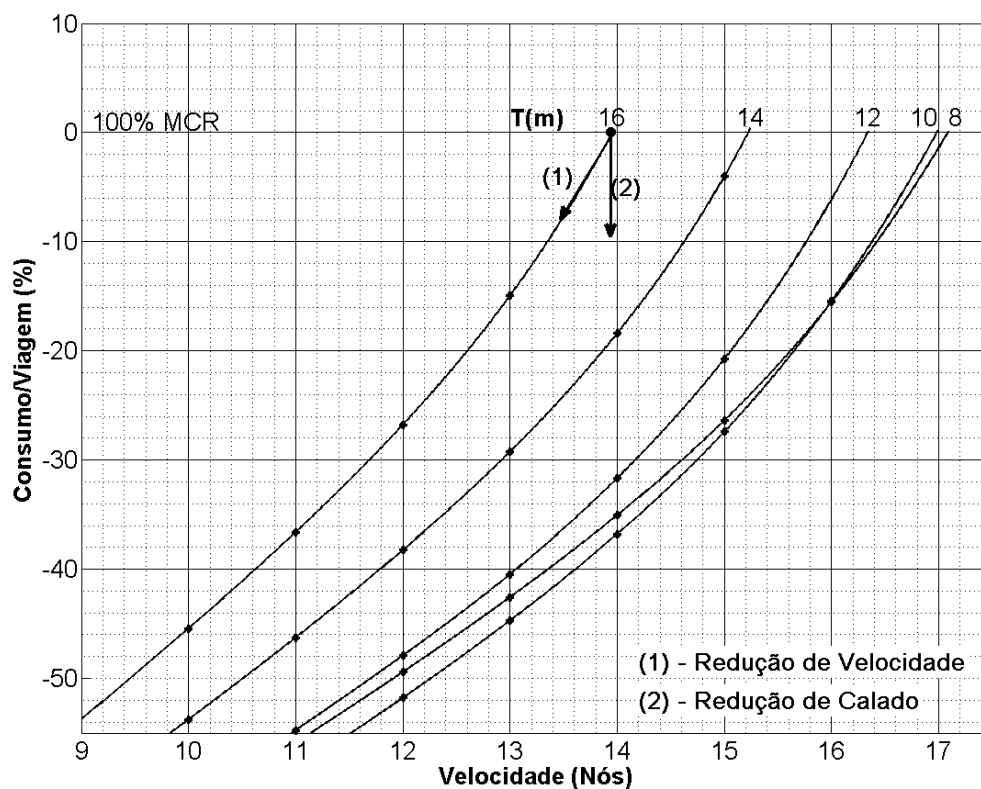


Figura 36 - Avaliação da variação do consumo por viagem no modelo com propulsor 7,2m estimada a partir da metodologia de previsão de Holtrop e Mennen (1982) (HM)

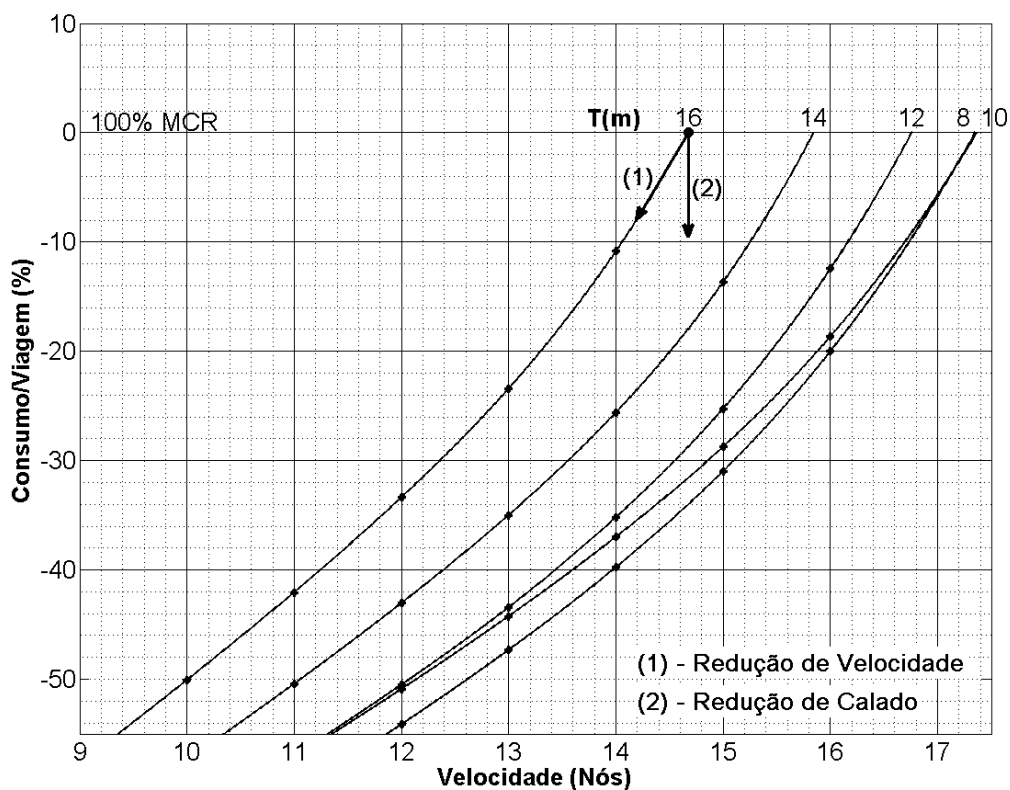


Figura 37 - Avaliação da variação do consumo por viagem no modelo com propulsor de 7,2m estimada a partir da metodologia proposta (MP)

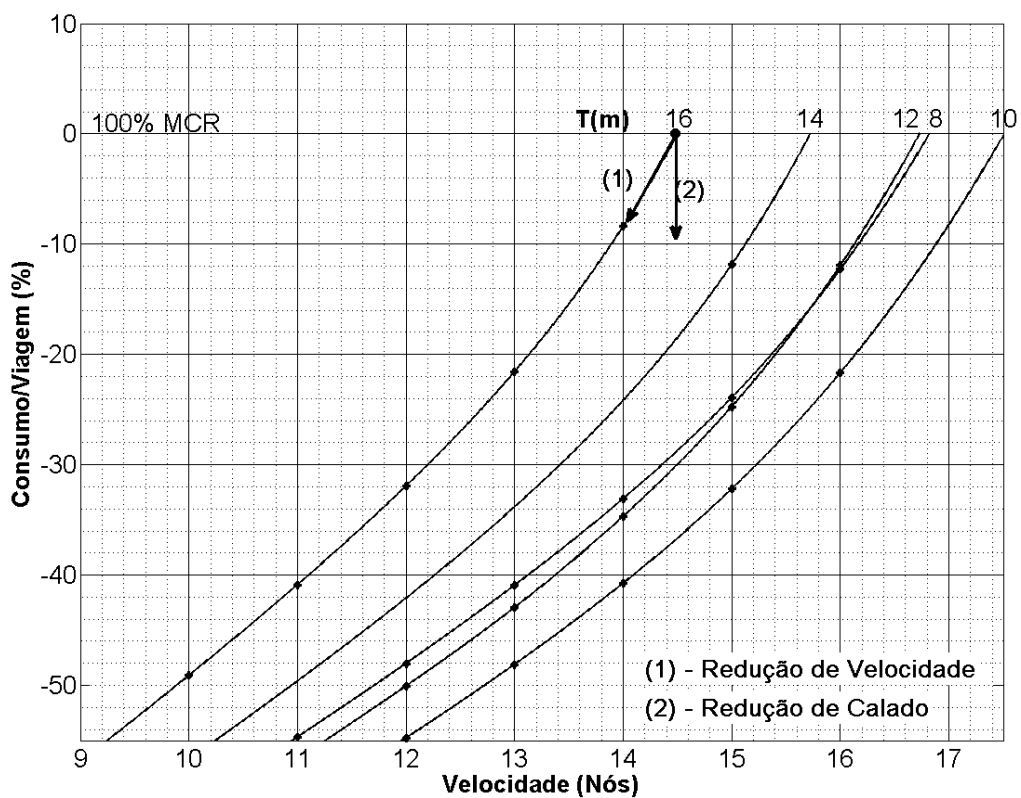


Figura 38 - Avaliação da variação do consumo por viagem no modelo com propulsor 8,6m estimada a partir da metodologia de previsão de Holtrop e Mennen (1982) (HM)

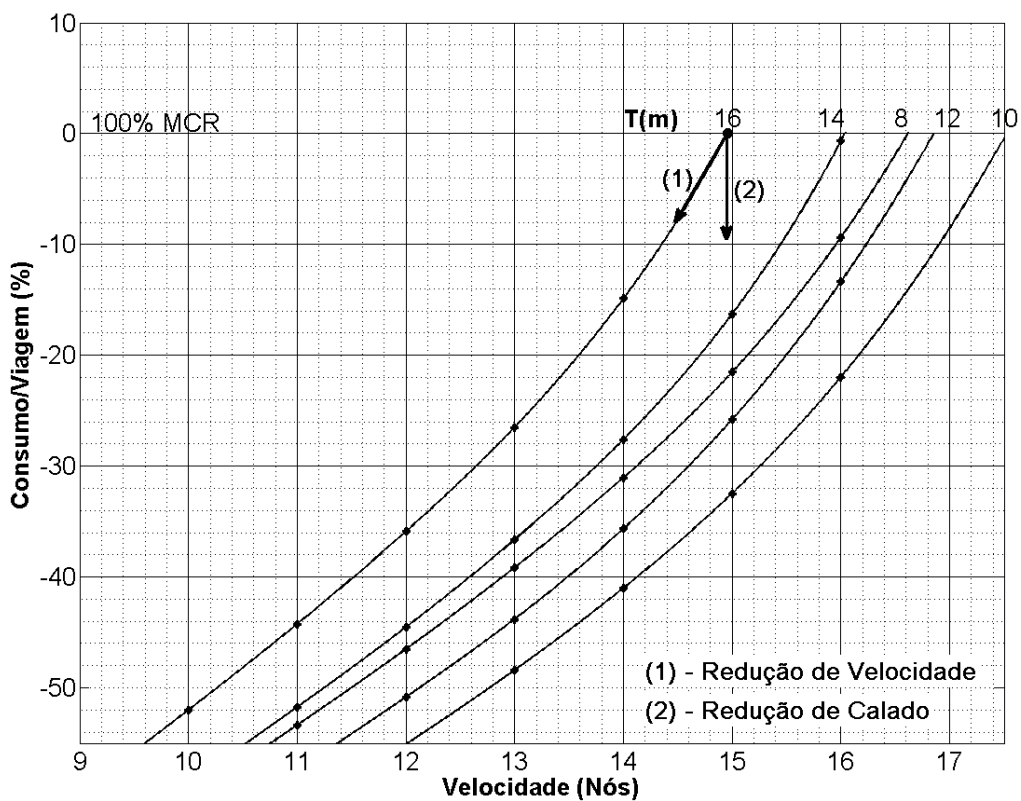


Figura 39 - Avaliação da variação do consumo por viagem no modelo com propulsor de 8,6m estimada a partir da metodologia proposta (MP)

Nos gráficos apresentados, o eixo das abscissas corresponde a velocidade de navegação e, analisando para diferentes condições de calados, conforme o navio reduz a velocidade, o eixo das coordenadas apresenta a redução de combustível por viagem esperada. Neles, é nítido o alto potencial de redução de combustível mesmo considerando o acréscimo de tempo ao navegar em uma velocidade mais baixa.

Deste estudo, então, para definir o potencial de redução do Consumo/Viagem por unidade de velocidade, foi criado o índice *IRC* (Índice de Redução de Consumo) que foi calculado para cada caso simulado, dentro da região de operação. Esse índice indica a redução esperada, em porcentagem, do Consumo/Viagem caso o comandante reduza a velocidade do navio de X para $X - 1$ nós.

Tanto os resultados de variação do consumo por viagem que foram apresentados graficamente, quanto o *IRC* são dados que podem ser incorporados à ferramenta operacional, apresentando essas características para quaisquer condições de navegação do navio, de forma automatizada, para melhor entendimento do comandante e/ou do armador das possibilidades de melhorias para cada situação específica.

Os valores de *IRC*, juntamente com os dados de potência e consumos, são apresentados nas tabelas de 14 a 17.

Tabela 14 - Resultados de consumos e de *IRC* para o modelo de propulsor com $D=7,2m$ estimados a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM)

Velocidade		17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	Nós
T=8m	P_S	-	15,7	12,9	10,5	8,5	6,8	5,3	-	-	-	MW
	MCR	-	82,8	67,8	55,3	44,6	35,6	27,9	-	-	-	%
	c_{Esp}	-	162,5	162,2	163,8	166,5	169,8	173,4	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	61,4	50,1	41,3	33,9	27,6	22,0	-	-	-	t/d
	IRC	-	12,8	11,8	11,6	11,9	12,8	14,1	-	-	-	%
T=10m	P_S	-	15,7	12,7	10,2	8,1	6,4	5,0	-	-	-	MW
	MCR	-	82,7	66,6	53,5	42,7	33,6	26,1	-	-	-	%
	c_{Esp}	-	162,5	162,3	164,2	167,2	170,7	174,3	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	61,3	49,3	40,1	32,5	26,2	20,7	-	-	-	t/d
	IRC	-	14,2	12,9	12,5	12,8	13,6	14,8	-	-	-	%
T=12m	P_S	-	18,3	14,7	11,8	9,4	7,4	5,8	-	-	-	MW
	MCR	-	96,3	77,5	62,1	49,5	39,2	30,6	-	-	-	%
	c_{Esp}	-	164,9	162,1	162,7	165,1	168,4	172,1	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	72,4	57,3	46,1	37,3	30,1	24,0	-	-	-	t/d
	IRC	-	15,6	13,8	12,9	12,5	13,1	14,3	-	-	-	%
T=14m	P_S	-	-	18,3	14,8	11,9	9,4	7,3	5,6	-	-	MW
	MCR	-	-	96,4	77,8	62,4	49,5	38,7	29,6	-	-	%
	c_{Esp}	-	-	164,9	162,1	162,7	165,1	168,6	172,5	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	-	72,5	57,5	46,3	37,3	29,7	23,3	-	-	t/d
	IRC	-	-	15,0	13,3	12,7	13,0	14,0	15,5	-	-	%
T=16m	P_S	-	-	-	-	15,5	12,3	9,6	7,4	5,5	-	MW
	MCR	-	-	-	-	81,5	64,7	50,6	38,7	28,8	-	%
	c_{Esp}	-	-	-	-	162,4	162,4	164,9	168,6	172,9	-	g/kWh
	$Cons$	-	-	-	-	60,3	47,9	38,0	29,8	22,7	-	t/d
	IRC	-	-	-	-	13,9	13,4	13,9	15,2	17,2	-	%

Tabela 15 - Resultados de consumos e de IRC para o modelo de propulsor com $D=7,2m$ estimados a partir da metodologia proposta (MP)

Velocidade	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	Nós	
T=8m	P_S	17,6	14,5	11,8	9,6	7,8	6,2	4,9	-	-	-	MW
	MCR	92,9	76,2	62,3	50,8	41,0	32,7	25,6	-	-	-	%
	c_{Esp}	163,4	162,0	162,7	164,8	167,8	171,1	174,5	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	69,2	56,3	46,2	38,2	31,4	25,5	20,4	-	-	-	t/d
	IRC	13,5	12,4	11,6	11,5	12,0	12,8	14,2	-	-	-	%
T=10m	P_S	17,4	14,1	11,3	9,1	7,2	5,7	-	-	-	-	MW
	MCR	91,7	74,1	59,6	47,8	38,1	30,0	-	-	-	-	%
	c_{Esp}	163,3	162,0	163,1	165,6	168,9	172,3	-	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	68,3	54,8	44,3	36,1	29,3	23,6	-	-	-	-	t/d
	IRC	14,8	13,7	12,7	12,6	12,9	13,8	-	-	-	-	%
T=12m	P_S	-	15,9	12,8	10,2	8,1	6,4	5,0	-	-	-	MW
	MCR	-	83,9	67,3	53,8	42,8	33,9	26,4	-	-	-	%
	c_{Esp}	-	162,6	162,2	164,1	167,1	170,6	174,1	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	62,2	49,8	40,3	32,6	26,4	21,0	-	-	-	t/d
	IRC	-	14,6	13,3	12,7	12,5	13,2	14,4	-	-	-	%
T=14m	P_S	-	-	15,6	12,6	10,1	8,0	6,2	4,8	-	-	MW
	MCR	-	-	82,1	66,1	53,0	42,0	32,8	25,1	-	-	%
	c_{Esp}	-	-	162,4	162,3	164,3	167,4	171,0	174,8	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	-	60,8	48,9	39,7	32,1	25,6	20,0	-	-	t/d
	IRC	-	-	13,8	12,6	12,4	13,0	14,0	15,6	-	-	%
T=16m	P_S	-	-	-	16,2	13,0	10,3	8,1	6,2	4,6	-	MW
	MCR	-	-	-	85,3	68,3	54,2	42,4	32,4	24,1	-	%
	c_{Esp}	-	-	-	162,8	162,1	164,0	167,3	171,2	175,3	-	g/kWh
	$Cons$	-	-	-	63,3	50,5	40,6	32,3	25,3	19,3	-	t/d
	IRC	-	-	-	14,1	13,0	13,0	13,8	15,3	17,4	-	%

Tabela 16 - Resultados de consumos e de IRC para o modelo de propulsor com $D=8,6\text{m}$ estimados a partir da metodologia de predição de Holtrop e Mennen (1982) (HM)

Velocidade	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	Nós	
T=8m	P_S	-	16,7	13,6	11,1	9,0	7,1	5,6	-	-	-	MW
	MCR	-	87,7	71,8	58,5	47,2	37,6	29,5	-	-	-	%
	c_{Esp}	-	163,1	162,0	163,2	165,8	169,0	172,6	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	65,3	53,1	43,6	35,7	29,0	23,2	-	-	-	t/d
	IRC	-	13,3	12,1	11,7	12,0	12,8	14,1	-	-	-	%
T=10m	P_S	17,4	14,1	11,4	9,1	7,3	5,7	-	-	-	-	MW
	MCR	91,4	74,2	59,8	48,1	38,3	30,2	-	-	-	-	%
	c_{Esp}	163,4	162,0	163,0	165,5	168,8	172,2	-	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	68,1	54,8	44,5	36,3	29,5	23,7	-	-	-	-	t/d
	IRC	14,5	13,5	12,6	12,4	12,9	13,7	-	-	-	-	%
T=12m	P_S	-	16,4	13,2	10,6	8,5	6,7	5,2	-	-	-	MW
	MCR	-	86,5	69,7	55,9	44,5	35,2	27,5	-	-	-	%
	c_{Esp}	-	162,9	162,1	163,7	166,6	170,0	173,6	-	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	64,3	51,5	41,7	33,8	27,3	21,7	-	-	-	t/d
	IRC	-	14,5	13,2	12,7	12,5	13,2	14,4	-	-	-	%
T=14m	P_S	-	-	16,4	13,2	10,6	8,4	6,6	5,0	-	-	MW
	MCR	-	-	86,2	69,6	55,8	44,3	34,6	26,4	-	-	%
	c_{Esp}	-	-	162,9	162,1	163,7	166,7	170,3	174,1	-	-	g/kWh
	$Cons$	-	-	64,1	51,4	41,7	33,7	26,8	21,0	-	-	t/d
	IRC	-	-	14,0	12,8	12,5	13,0	14,1	15,7	-	-	%
T=16m	P_S	-	-	-	17,1	13,7	10,9	8,5	6,5	4,8	-	MW
	MCR	-	-	-	90,1	72,3	57,4	44,8	34,3	25,5	-	%
	c_{Esp}	-	-	-	163,5	162,0	163,4	166,5	170,4	174,6	-	g/kWh
	$Cons$	-	-	-	67,2	53,4	42,8	34,0	26,6	20,3	-	t/d
	IRC	-	-	-	14,4	13,2	13,2	13,9	15,3	17,4	-	%

Tabela 17 - Resultados de consumos e de *IRC* para o modelo de propulsor com $D=8,6\text{m}$ estimados a partir da metodologia proposta (MP)

Velocidade	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	Nós	
T=8m	<i>P_S</i>	-	16,9	13,8	11,2	9,1	7,2	5,6	-	-	-	MW
	<i>MCR</i>	-	88,8	72,7	59,2	47,7	38,0	29,7	-	-	-	%
	<i>c_{Esp}</i>	-	163,3	162,0	163,1	165,6	168,9	172,5	-	-	-	g/kWh
	<i>Cons</i>	-	66,1	53,7	44,0	36,1	29,3	23,4	-	-	-	t/d
	<i>IRC</i>	-	13,4	12,1	11,8	12,1	12,8	14,1	-	-	-	%
T=10m	<i>P_S</i>	17,0	13,8	11,1	8,9	7,1	5,6	-	-	-	-	MW
	<i>MCR</i>	89,4	72,5	58,4	46,8	37,3	29,4	-	-	-	-	%
	<i>c_{Esp}</i>	163,2	162,0	163,2	165,9	169,2	172,6	-	-	-	-	g/kWh
	<i>Cons</i>	66,5	53,6	43,5	35,4	28,8	23,1	-	-	-	-	t/d
	<i>IRC</i>	14,5	13,5	12,6	12,6	13,0	13,8	-	-	-	-	%
T=12m	<i>P_S</i>	-	15,6	12,6	10,1	8,0	6,3	4,9	-	-	-	MW
	<i>MCR</i>	-	82,3	66,2	52,9	42,1	33,3	25,9	-	-	-	%
	<i>c_{Esp}</i>	-	162,4	162,3	164,3	167,4	170,8	174,4	-	-	-	g/kWh
	<i>Cons</i>	-	61,0	49,0	39,6	32,1	26,0	20,6	-	-	-	t/d
	<i>IRC</i>	-	14,4	13,3	12,7	12,5	13,3	14,6	-	-	-	%
T=14m	<i>P_S</i>	-	18,5	14,9	12,0	9,6	7,6	6,0	-	-	-	MW
	<i>MCR</i>	-	97,5	78,5	63,2	50,6	40,1	31,3	-	-	-	%
	<i>c_{Esp}</i>	-	165,2	162,1	162,6	164,8	168,1	171,7	-	-	-	g/kWh
	<i>Cons</i>	-	73,5	58,0	46,8	38,1	30,8	24,5	-	-	-	t/d
	<i>IRC</i>	-	15,7	13,5	12,5	12,5	13,0	14,2	-	-	-	%
T=16m	<i>P_S</i>	-	-	18,9	15,2	12,2	9,7	7,6	5,8	-	-	MW
	<i>MCR</i>	-	-	99,5	80,1	64,1	50,9	39,7	30,4	-	-	%
	<i>c_{Esp}</i>	-	-	165,7	162,2	162,5	164,8	168,2	172,1	-	-	g/kWh
	<i>Cons</i>	-	-	75,2	59,3	47,5	38,2	30,5	23,9	-	-	t/d
	<i>IRC</i>	-	-	15,6	13,6	12,8	13,0	13,9	15,5	-	-	%

A partir dos dados de *IRC* apresentados, conclui-se que, apesar dos métodos numéricos apresentarem resultados de resistência e potência diferentes, o que tem impacto nos limites operacionais de velocidades, os valores de *IRC* apresentaram variação e magnitudes muito parecidas.

Os resultados de *IRC* foram muito significativos, variando na ordem de 12 a 15% em grande parte das condições avaliadas, confirmando que, mesmo para embarcações como um petroleiro de grande porte, a redução de velocidade é uma excelente alternativa para reduzir o consumo de combustível na navegação.

6.3 Discussão e Aplicação dos Resultados

Como foi mencionado no capítulo 5, o método mais indicado para avaliação da redução do consumo de combustível com a velocidade é por meio de testes de prova de mar, no entanto, as análises numéricas podem ser utilizadas como estimativas preliminares, ou mesmo, como base de ferramentas numéricas posteriormente calibradas com dados de navegação reais.

Com a proposta de avaliar o consumo de combustível do motor principal de um navio aliviador, foram aplicadas duas metodologias numéricas, uma baseada apenas em equações de regressão e a segunda que utilizou o modelo do casco do navio tipo para estimar, por meio de simulações em CFD, dois parâmetros sensíveis a forma do casco.

A metodologia numérica proposta neste trabalho apresentou resultados, tanto para o fator de forma k , quanto para o coeficiente de esteira w , bastantes distintos aos valores estimados a partir das equações de regressão de Holtrop e Mennen (1982). Esses resultados originaram uma diferença de até 20% na estimativa da potência de máquina dentre os casos analisados.

Porém, ambas as análises apresentaram resultados parecidos na tendência da variação do consumo de combustível com a velocidade, com resultados significativos de redução de consumo por viagem a partir de pequenas variações de velocidades, indicando que, mesmo com imprecisões, as duas metodologias podem ser utilizadas se forem devidamente calibradas através de dados reais de navegação.

O resultado obtido indicou um grande potencial na redução dos custos com o combustível do navio aliviador caso seja implementado de forma adequada ao perfil operacional do mesmo e, portanto, sua metodologia de aplicação deve ser cuidadosamente avaliada, assim como será discutida na seção 6.3.1.

6.3.1 Possíveis Aplicações para o Navio Aliviador

Apesar da especificação apresentar limite de 24% de MCR, o sistema operacional de motores convencionais de navios não são adaptados para funcionar continuamente em baixas cargas.

Nestes motores, a margem de operação entre 90 e 60% de MCR é considerada ideal. Abaixo deste nível, é indicado que o navio opere apenas em curtos períodos de tempo ou continuamente, caso sejam feitas adaptações na praça de máquinas (IMO, 2016b). Porém, ao fazer as adaptações necessárias, a embarcação só poderá trabalhar em baixa carga.

Os problemas mais comuns com a operação inadequada são a carbonização das câmaras de combustão, o desgaste de peças do motor e a perda de eficiência devido a queima incompleta do combustível, que podem gerar elevados custos de manutenção e de oportunidade caso a embarcação fique inoperante devido a essas causas. Outra consequência importante refere-se ao nível de emissões, principalmente, de CO e particulados que podem ser significativamente maior, dependendo da condição da queima do combustível.

Partindo-se destas informações, pode ser concluído que a opção de navegar continuamente em baixa carga é indicada apenas para situações em que a frota encontra-se com elevado nível de ociosidade, em que a redução de velocidade por longos períodos de tempo não resultará em perdas de capacidade de transporte, pois as modificações necessárias no sistema do motor principal inviabiliza que o navio opere na velocidade de projeto.

Caso a frota esteja com baixa ociosidade, a melhor forma de se operar é com a aplicação do *just in time*. Através da comunicação entre navio-porto ou navio-plataforma, o capitão pode navegar trechos da viagem ou, até mesmo, a sua totalidade em velocidades mais baixas, respeitando o limite operacional adequado, reduzindo o tempo de espera, sem que perca a sua janela portuária ou atrase a operação de alívio.

Essas são, portanto, as possibilidades que o armador deve avaliar, se opera com pequenas variações de velocidade, porém, com flexibilidade para operar em carga máxima, ou adaptar o motor para operar continuamente em baixa carga.

Para o perfil operacional do navio aliviador apresentada, a aplicação do *just in time* apresenta grande potencial de redução, já que a embarcação apresenta a possibilidade de navegar grande parte do tempo na carga de 60% de MCR.

Como exemplo, aplicando os resultados obtidos neste trabalho, ao reduzir a carga do motor de 85% para 60% de MCR, a redução de velocidade é na ordem de 1,5 nós (com acréscimo de tempo de viagem de, apenas, 12%) e a redução do consumo por viagem na ordem de 22%, no motor principal.

Caso o armador decida pela opção do *Slow Steaming*, primeiro deve-se verificar se as adaptações na praça de máquinas, para o navio operar em baixa carga, não irão interferir nas operações de *offloading*, além de avaliar a disponibilidade da frota em operar continuamente com velocidades reduzidas, analisando os impactos na capacidade de movimentação de carga dos navios.

Já existe no mercado motores que trabalham em conjunto com sistemas automatizados que se autorregulam para operar nessas condições, porém, apesar de possibilitar grandes variações de velocidade no navio em uma mesma viagem, são mais caros que os convencionais e de tecnologia recente (Marine Insight, 2016) e (Wiesmann, 2010).

Esse tipo de motor seria ideal para o perfil operacional apresentado, que proporciona a possibilidade da embarcação navegar, grande parte do tempo, com altos níveis de redução de velocidade.

Tal investimento nas embarcações que são originárias de petroleiros convencionais pode não ser viável, já que seria necessária a troca de todo o sistema do motor principal, porém, para projetos de novos navios, essa alternativa deve ser cuidadosamente avaliada, pois apresenta grande potencial de redução dos custos operacionais.

7 Conclusões

O aquecimento global e a emissão de gases nocivos ao meio ambiente desencadearam a necessidade, não apenas de frear o crescimento, mas também reduzir a queima de combustíveis fósseis nas atividades humanas.

Isso se tornou um grande desafio para o mercado de transporte marítimo, cujo crescimento acompanha o desenvolvimento mundial e que utiliza, basicamente, como fonte energética dois derivados de petróleo, o HFO e o MDO.

A IMO, entidade regulamentadora deste setor, vem adotando medidas que visam controlar a qualidade destes combustíveis, reduzir a emissão de gases poluentes e reduzir, gradualmente, o consumo por unidade de carga transportada.

Em relação às emissões de gases de efeito estufa em embarcações que já estão em operação, a entidade aposta na padronização de um plano de gerenciamento operacional, o SEEMP, com o objetivo de reduzir em até 20% as emissões de CO₂ apenas com a aplicação de sistemas de monitoramento visando mapear as perdas e auxiliar tomadas de decisões como manutenção de máquinas e equipamentos, limpeza de casco e hélice e controle de velocidade.

Dentre as melhorias mencionadas, a redução da velocidade de navegação vem sendo largamente adotada por armadores que operam as principais classes de navios mercantes.

O alto nível de redução do consumo a partir de pequenas variações de velocidade e a crise mundial que teve início em 2008, freando o crescimento no mercado de transporte naval, possibilitaram a redução da velocidade média da frota sem efeitos negativos na área, pelo contrário, reduziu custos de operação para os donos dos navios e o consumo médio de combustível, na ordem de 20%, por embarcação.

Para que o armador adote grandes níveis de redução de velocidade (*Slow Steaming*) como estratégia para reduzir custos operacionais em momentos que a frota encontra-se com alto nível de ociosidade, é necessário o conhecimento detalhado das máquinas e equipamentos do navio e uma tripulação devidamente treinada para evitar graves problemas mecânicos.

Em contrapartida, ao utilizar níveis adequados de redução, a embarcação pode operar normalmente, não necessitando de ajustes no sistema operacional da praça de máquinas, e, mesmo assim, reduzir significativamente o consumo de combustível. Essa prática pode ser adotada por qualquer embarcação, sem perdas econômicas, apenas adotando o *just in time*, cujo o objetivo é reduzir o tempo de espera em filas nos portos.

Para definir qual a melhor estratégia a adotar, o armador deve, primeiro, avaliar o perfil operacional do navio, definindo o nível de ociosidade e identificando as possíveis melhorias como, por exemplo, a possibilidade de implementar o *just in time*, depois, realizar testes para estimar se o nível de redução do consumo de combustível com a adoção do Slow Steaming é melhor opção, considerando os investimentos necessários, do que a adoção de reduções de velocidade em níveis menores, porém sem custos adicionais.

O método mais indicado para estimar o nível de redução no consumo de combustível é por meio de provas de mar. No entanto, o custo de capital é alto e o armador pode-se valer de ensaios numéricos para estudos preliminares dos níveis de redução por velocidade esperados.

Com o objetivo de apresentar uma análise preliminar do potencial de redução do navio aliviador, do tipo Suezmax, operando em águas brasileiras, foram utilizadas duas metodologias numéricas, uma utilizando apenas equações de regressão, não levando em consideração detalhes geométricos do casco, e outra que, a partir do casco de um navio tipo da classe, o Nordic Spirit, utilizou técnicas de CFD para estimar parâmetros sensíveis a forma do casco e que eram essenciais para a análise.

As equações de regressão apresentaram resultados imprecisos, tanto para o fator de forma k , quanto para o coeficiente de esteira w , impactando consideravelmente nas estimativas de resistência ao avanço e da potência de máquinas.

Por ser procedente de um navio petroleiro convencional, a adaptação do sistema de propulsão principal para as operações de alívio também foi tema do estudo, avaliando perdas de eficiência e mudanças nas condições operacionais do navio para dois propulsores de diâmetros diferentes, de 8,6m e 7,2m.

Nesse sentido, foi verificado que para condições de calados em que o propulsor de maior diâmetro (original) encontra-se a uma distância suficiente da superfície

para a não ocorrência de ventilação, o resultado de perda de eficiência do hélice adaptado foi de 10% a partir da metodologia que considera as equações de regressão e de 5% utilizando o CFD como ferramenta auxiliar. Em contrapartida, para baixos valores de calados, o hélice de menor diâmetro mostrou-se mais vantajoso.

Já em relação aos níveis de redução de consumo de combustível com a redução da velocidade, foram obtidos resultados semelhantes, tanto para os modelos com hélices de diâmetros diferentes, quanto na aplicação das duas metodologias propostas.

Com um índice de redução de consumo por viagem na ordem de 12% a 15% por unidade de velocidade reduzida, em nós, o estudo apontou o grande potencial de redução mesmo para pequenas reduções de velocidade.

Avaliando as possíveis aplicações em um perfil operacional característico do navio aliviador, cujas características são viagens curtas e elevados tempo de espera, foi verificado que, com a aplicação do *just in time*, a embarcação pode navegar, a maior parte do tempo, em velocidade reduzida, podendo economizar 22% de combustível com a redução da potência de máquina de 85% para 60% de MCR, com um impacto na velocidade de, apenas, 1,5 nós.

Na aplicação do *Slow Steaming*, o armador deve avaliar, primeiro, se as adaptações na praça de máquinas não vão interferir nas operações de alívio e, segundo, o impacto das possíveis perdas em viagens em que o porto ou a plataforma encontram-se disponíveis antes do período de tempo gasto na navegação com velocidade reduzida.

Contudo, apesar de ser uma tecnologia com custo inicial maior, a utilização de motores com sistemas automatizados, com autorregulagem de resposta rápida que possibilita a operação do motor em uma grande variação de carga, mostra-se ideal para o tipo de operação em questão, pois possibilita operar o navio sem perdas de janelas portuárias e não prejudica a operação de alívio, com um potencial de redução de consumo com a aplicação do *just in time* muito maior do que com motores convencionais.

8 Referências Bibliográficas

- ABS. **Notes on Heavy Fuel Oil 1984**. Houston, 2001.
- ABS. **Ship Energy Efficiency Measures: Status and Guidance**. Houston, 2013.
- ARMSTRONG, V. N. **Vessel Optimisation for Low Carbon Shipping**. Ocean Engineering, 9 ago. 2013. 195-207 p.
- BOWDITCH, N. **The American Practical Navigator**. National Imagery and Mapping Agency. Bethesda, 2002.
- CARLTON, J. S. **Marine propellers and propulsion**. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd, 1998. Capítulo 6.
- DNV. **Assessment of measures to reduce future CO2 emissions from shipping**. Hovik, 2010.
- DNV. **Future Scenarios Towards 2030 for Deep Sea Shipping**. Hovik, 2013.
- DNV. **MARPOL 73/78 Annex VI - Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships: Technical and Operational Implications**. Hovik, 2009.
- DNV. **Shipping 2020**. Hovik, 2012.
- DUPONT. **Marine Scrubber**. 2015. Disponível em: <marinescrubber.dupont.com>. Acesso em: 15 nov. 2015.
- EYRING, V. et al. **Emissions from International Shipping: 1. The Last 50 years**. Journal of Geophysical Research, vol. 110. 2005.
- G1. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2013/03/navios-esperam-ate-16-dias-para-atracar-em-porto-do-pais-diz-mdic.html>>. Acesso em: 15 jan. 2015.
- GOLDSWORTHY, L. **Design of Ship Engines for Reduced Emissions of Oxides of Nitrogen**. Australian Maritime College. 2003.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. J. **An Approximate Power Prediction Method**. International Shipbuilding Progress, vol. 29, p. 355. 1982.
- IMO. **IMO train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation: Module 2 - Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines**. Londres, 2016.

IMO. **IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation:** Module 3 - From Management to Operation. Londres, 2016b.

IMO. **Prevention of Air Pollution from Ships:** Updated 2000 Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships. Londres, 2008.

IMO. **Third IMO GHG Study 2014:** Executive Summary and Final Report. Londres, 2014.

IPCC. **Climate Change 2007:** Synthesis Report. A Report of the International Panel on Climate Change. Genova, 2007. 104 p.

ITTC. **Recommended Procedures and Guidelines, 1978:** ITTC Performance Prediction Method, Revision 02. 2011.

ITCC. **The Specialist Committee on Scaling of Wake:** Final Report and Recommendations to the 26th ITTC. 2011b.

KAGESON, P. **Economic Instruments for Reducing Emissions from Sea Transport.** Air Pollution and Climate Series. 1999.

KLANAC, A. et al. **Economics and Environmental Impact of Ship Speed Reduction for Aframax Tankers.** XIX SORTA. 2010.

KOWALAK, P. **Chief Engineer's Hands-on Experience of Slow Steaming Operation.** Polônia, 2012. Disponível em: <http://www.baltic.org/files/2500/Chief_engineer_s_hands-on_experience_of_slow_steaming_operation.pdf> . Acesso em: 15 dez. 2015.

LLOYDS. **Lloyd's Register SEEMP Template:** version 2.2. 2012.

LLOYDS. **Future IMO legislation:** October 2015. 2015.

MAN DIESEL & TURBO. **Propulsion Trends in tankers:** Marine Engine. 2009.

MAN DIESEL & TURBO. 2014. Disponível em:<<http://dieselturbo.man.eu>>. Acesso em: 28 out. 2014.

MAN PRIMESERV. **Slow Steaming Practices in the Global Shipping Industry:** Results of a Survey Conducted by MAN PrimeServ in Late 2011 among Representatives of the Global Container, Bulk and Tanker Shipping Industry. Copenhagen. 2012.

MARINE INSIGHT. **Intelligent Engines - The New Generation Machines.** 2015. Disponível em:<<http://www.marineinsight.com/main-engine/intelligent-engines-the-new-generation-machines/>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

NIKOLIC, P.; KLANAC, A.; KUMAR, P. **Economics and environmental impact of ships speed reduction for the VLCC tanker**. As2con-alveus ltd. 2011.

OOSTERVELD, M. W. C.; OOSSANEN, P. **Further computer analyzed data of the Wageningen B-screw series**. International Shipbuilding Progress. 1975.

ÖZTÜRK, E. **Operational Measures for Energy Efficiency in Shipping**. Journal of ETA Maritime Science. 2013. 65-72 p.

SANGURI, M. **The Guide to Slow Steaming on Ships**. Marine Insight. 2012. Disponível em: <<http://www.marineinsight.com/wp-content/uploads/2013/01/the-guide-to-slow-steaming-on-ships.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

SMOGELI, O. N. **Control of Marine Propellers**. Faculty of Engineering Science & Technology Department of Marine Technology. Trondheim, 2006.

TURAN, O.; BANKS, C. **Operations for Low Carbon Shipping**. Low Carbon Shipping: A Systems Approach. 2014. 97-112 p.

WALH, M. E. B.; KRISTOFFERSEN, E. **Speed Optimization for Very Large Crude Carriers (VLCCs): Potential Savings and Effects os Slow Steaming**. Bergen, 2012.

WIESMANN, A. **Slow steaming - a viable long-term option?**. Wärtsilä Technical Journal. 2010. 49-55 p.

WILCOX, D. **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries: 1993.

APÊNDICE B

1. Resultados Numéricos da Potência de Máquina

Nesta seção são apresentados os resultados das potências de máquinas calculados pelas duas metodologias definidas no capítulo 5, considerando dois diâmetros de propulsores diferentes, com valores 7.2m e 8.6m.

1.1 Resultados da Potência de Máquina Utilizando o Método de Predição de Potência Proposto por Holtrop e Mennen (1982)

As tabelas de 28 a 32 apresentam os resultados de potência de máquina e os parâmetros para a determinação do coeficiente propulsivo (c_p), considerando cada calado simulado, para $D=7.2m$ e as tabelas de 33 a 37 apresentam os resultados para $D=8.6m$.

Tabela 28 - Potência de máquina para $T=8m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=8m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,2	3,0	4,1	5,3	6,8	8,5	10,5	12,9	15,7	19,2	MW
P_E	1,4	1,9	2,6	3,4	4,4	5,5	6,8	8,4	10,2	12,4	MW
η_r	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,446	0,450	0,453	0,457	0,460	0,462	0,464	0,465	0,465	0,464	-
$1 - t$	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	-
$1 - w$	0,530	0,533	0,535	0,537	0,539	0,541	0,542	0,543	0,545	0,546	-
c_{vent}	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	-
c_p	0,640	0,643	0,645	0,647	0,649	0,651	0,652	0,651	0,650	0,647	-

Tabela 29 - Potência de maquina para $T=10m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=10m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,0	2,8	3,8	5,0	6,4	8,1	10,2	12,7	15,7	19,4	MW
P_E	1,3	1,8	2,5	3,3	4,2	5,4	6,7	8,3	10,3	12,6	MW
η_r	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,453	0,456	0,459	0,461	0,463	0,464	0,465	0,464	0,462	0,460	-
$1 - t$	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	-
$1 - w$	0,530	0,533	0,535	0,537	0,538	0,540	0,541	0,543	0,544	0,545	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,657	0,658	0,660	0,661	0,661	0,661	0,660	0,658	0,654	0,649	-

Tabela 30 - Potência de maquina para $T=12m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=12m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,4	3,3	4,4	5,8	7,4	9,4	11,8	14,7	18,3	22,8	MW
P_E	1,5	2,1	2,8	3,7	4,7	6,0	7,5	9,3	11,4	14,1	MW
η_r	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,432	0,435	0,439	0,441	0,444	0,445	0,446	0,445	0,443	0,439	-
$1 - t$	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	-
$1 - w$	0,527	0,529	0,531	0,533	0,535	0,536	0,538	0,539	0,540	0,541	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,625	0,628	0,630	0,632	0,633	0,634	0,633	0,630	0,626	0,620	-

Tabela 31 - Potência de maquina para $T=14m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=14m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	3,0	4,2	5,6	7,3	9,4	11,9	14,8	18,3	22,7	28,3	MW
P_E	1,8	2,5	3,3	4,4	5,6	7,1	8,8	10,9	13,4	16,5	MW
η_r	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,397	0,401	0,404	0,407	0,409	0,411	0,412	0,412	0,411	0,407	-
$1 - t$	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	-
$1 - w$	0,513	0,515	0,517	0,519	0,521	0,522	0,524	0,525	0,526	0,527	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,585	0,587	0,590	0,592	0,594	0,595	0,595	0,593	0,590	0,584	-

Tabela 32 - Potência de maquina para $T=16m$ e $D=7.2m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=16m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	3,9	5,5	7,4	9,6	12,3	15,5	19,3	23,9	29,8	37,1	MW
P_E	2,1	3,0	4,0	5,3	6,8	8,5	10,6	13,2	16,2	20,0	MW
η_r	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,354	0,358	0,361	0,364	0,367	0,369	0,370	0,370	0,368	0,365	-
$1 - t$	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	-
$1 - w$	0,488	0,491	0,493	0,495	0,497	0,498	0,500	0,501	0,502	0,503	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,540	0,543	0,546	0,548	0,550	0,551	0,551	0,550	0,546	0,540	-

Tabela 33 - Potência de maquina para $T=8m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=8m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,3	3,2	4,3	5,6	7,1	9,0	11,1	13,6	16,7	20,3	MW
P_E	1,4	1,9	2,6	3,4	4,4	5,5	6,8	8,4	10,2	12,4	MW
η_r	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,505	0,508	0,511	0,515	0,517	0,520	0,522	0,523	0,523	0,522	-
$1 - t$	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	-
$1 - w$	0,539	0,542	0,544	0,546	0,547	0,549	0,550	0,552	0,553	0,554	-
c_{Vent}	0,827	0,827	0,827	0,827	0,827	0,827	0,827	0,827	0,827	0,827	-
c_P	0,608	0,609	0,611	0,612	0,614	0,615	0,615	0,615	0,614	0,611	-

Tabela 34 - Potência de maquina para $T=10m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=10m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	1,8	2,5	3,4	4,4	5,7	7,3	9,1	11,4	14,1	17,4	MW
P_E	1,3	1,8	2,5	3,3	4,2	5,4	6,7	8,3	10,3	12,6	MW
η_r	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,513	0,516	0,518	0,520	0,522	0,523	0,523	0,523	0,521	0,518	-
$1 - t$	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	-
$1 - w$	0,542	0,544	0,546	0,548	0,550	0,551	0,552	0,553	0,554	0,555	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,733	0,735	0,735	0,736	0,736	0,736	0,735	0,732	0,729	0,724	-

Tabela 35 - Potência de maquina para $T=12m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=12m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,1	2,9	4,0	5,2	6,7	8,5	10,6	13,2	16,4	20,5	MW
P_E	1,5	2,1	2,8	3,7	4,7	6,0	7,5	9,3	11,4	14,1	MW
η_r	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,496	0,499	0,502	0,505	0,507	0,508	0,508	0,507	0,505	0,502	-
$1 - t$	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	-
$1 - w$	0,547	0,549	0,550	0,552	0,553	0,555	0,556	0,557	0,558	0,559	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,697	0,699	0,701	0,703	0,704	0,704	0,703	0,701	0,697	0,691	-

Tabela 36 - Potência de maquina para $T=14m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=14m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,7	3,7	5,0	6,6	8,4	10,6	13,2	16,4	20,3	25,3	MW
P_E	1,8	2,5	3,3	4,4	5,6	7,1	8,8	10,9	13,4	16,5	MW
η_r	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,463	0,467	0,470	0,473	0,475	0,477	0,478	0,478	0,476	0,472	-
$1 - t$	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	-
$1 - w$	0,538	0,540	0,541	0,543	0,544	0,545	0,546	0,547	0,548	0,549	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,655	0,658	0,660	0,662	0,664	0,665	0,665	0,663	0,660	0,654	-

Tabela 37 - Potência de maquina para $T=16m$ e $D=8.6m$ calculada pela metodologia proposta por Holtrop e Mennen (1982)

Dados	Valores para $T=16m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	3,5	4,8	6,5	8,5	10,9	13,7	17,1	21,2	26,4	32,9	MW
P_E	2,1	3,0	4,0	5,3	6,8	8,5	10,6	13,2	16,2	20,0	MW
η_r	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,421	0,425	0,428	0,431	0,433	0,435	0,436	0,436	0,434	0,430	-
$1 - t$	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	-
$1 - w$	0,517	0,519	0,520	0,522	0,523	0,524	0,525	0,526	0,527	0,528	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,610	0,613	0,616	0,618	0,620	0,621	0,621	0,620	0,616	0,610	-

1.2 Resultados da Potência de Máquina com a Aplicação de CFD para a Estimativa do Fator de Forma e da Esteira Nominal

As tabelas de 38 a 42 apresentam os resultados de potência de máquina e os parâmetros para a determinação do coeficiente propulsivo (c_p), considerando cada calado simulado, para $D=7.2m$ e as tabelas de 43 a 47 apresentam os resultados para $D=8.6m$.

Tabela 38 - Potência de máquina para $T=8m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=8m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,0	2,8	3,7	4,9	6,2	7,8	9,6	11,8	14,5	17,6	MW
P_E	1,3	1,8	2,4	3,2	4,1	5,2	6,4	7,8	9,6	11,6	MW
η_r	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,460	0,463	0,466	0,470	0,473	0,476	0,478	0,479	0,478	0,477	-
$1 - t$	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	-
$1 - w$	0,537	0,539	0,541	0,543	0,545	0,547	0,549	0,550	0,551	0,552	-
c_{Vent}	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	-
c_p	0,652	0,654	0,656	0,659	0,660	0,662	0,662	0,662	0,661	0,658	-

Tabela 39 - Potência de máquina para $T=10m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=10m$										Unid.
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	1,8	2,5	3,3	4,4	5,7	7,2	9,1	11,3	14,1	17,4	MW
P_E	1,2	1,7	2,3	3,0	3,9	5,0	6,2	7,7	9,5	11,7	MW
η_r	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,453	0,457	0,459	0,462	0,464	0,465	0,466	0,465	0,463	0,460	-
$1 - t$	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766	-
$1 - w$	0,510	0,513	0,515	0,517	0,519	0,521	0,523	0,524	0,525	0,526	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_p	0,683	0,684	0,686	0,687	0,687	0,686	0,685	0,682	0,678	0,672	-

Tabela 40 - Potência de maquina para $T=12m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=12m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,0	2,8	3,8	5,0	6,4	8,1	10,2	12,8	15,9	19,9	MW
P_E	1,3	1,9	2,5	3,4	4,3	5,4	6,8	8,5	10,5	13,0	MW
η_r	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,422	0,425	0,429	0,432	0,434	0,436	0,436	0,435	0,433	0,429	-
$1 - t$	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	0,759	-
$1 - w$	0,487	0,489	0,492	0,494	0,495	0,497	0,498	0,499	0,500	0,501	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,661	0,664	0,666	0,667	0,669	0,670	0,668	0,665	0,660	0,653	-

Tabela 41 - Potência de maquina para $T=14m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=14m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,5	3,5	4,8	6,2	8,0	10,1	12,6	15,6	19,4	24,4	MW
P_E	1,6	2,2	3,0	3,9	5,0	6,4	7,9	9,8	12,1	15,0	MW
η_r	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,387	0,391	0,395	0,398	0,401	0,402	0,403	0,403	0,402	0,397	-
$1 - t$	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	-
$1 - w$	0,471	0,474	0,476	0,478	0,480	0,481	0,482	0,484	0,485	0,486	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,621	0,624	0,627	0,629	0,631	0,632	0,632	0,630	0,626	0,618	-

Tabela 42 - Potência de maquina para $T=16m$ e $D=7.2m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=16m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	3,3	4,6	6,2	8,1	10,3	13,0	16,2	20,1	25,1	31,6	MW
P_E	1,9	2,6	3,6	4,7	6,0	7,6	9,5	11,7	14,5	18,0	MW
η_r	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,353	0,357	0,360	0,363	0,366	0,368	0,370	0,369	0,367	0,364	-
$1 - t$	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	0,738	-
$1 - w$	0,458	0,461	0,463	0,465	0,467	0,469	0,472	0,472	0,474	0,475	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,573	0,576	0,579	0,582	0,584	0,585	0,584	0,582	0,577	0,570	-

Tabela 43 - Potência de maquina para $T=8m$ e $D=8.6m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=8m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,3	3,2	4,3	5,6	7,2	9,1	11,2	13,8	16,9	20,5	MW
P_E	1,3	1,8	2,4	3,2	4,1	5,2	6,4	7,8	9,6	11,6	MW
η_r	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,566	0,569	0,572	0,574	0,576	0,578	0,580	0,580	0,580	0,579	-
$1 - t$	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	-
$1 - w$	0,653	0,655	0,657	0,658	0,659	0,661	0,662	0,663	0,664	0,665	-
c_{Vent}	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	-
c_P	0,563	0,564	0,565	0,567	0,568	0,568	0,569	0,568	0,567	0,565	-

Tabela 44 - Potência de maquina para $T=10m$ e $D=8.6m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=10m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	1,7	2,4	3,3	4,3	5,6	7,1	8,9	11,1	13,8	17,0	MW
P_E	1,2	1,7	2,3	3,0	3,9	5,0	6,2	7,7	9,5	11,7	MW
η_r	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,562	0,564	0,566	0,567	0,569	0,570	0,570	0,569	0,567	0,565	-
$1 - t$	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	-
$1 - w$	0,625	0,624	0,626	0,627	0,629	0,631	0,633	0,634	0,635	0,635	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,698	0,700	0,701	0,702	0,701	0,700	0,699	0,697	0,693	0,690	-

Tabela 45 - Potência de maquina para $T=12m$ e $D=8.6m$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=12m$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,0	2,8	3,8	4,9	6,3	8,0	10,1	12,6	15,6	19,5	MW
P_E	1,3	1,9	2,5	3,4	4,3	5,4	6,8	8,5	10,5	13,0	MW
η_r	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,543	0,546	0,548	0,551	0,553	0,554	0,554	0,554	0,551	0,548	-
$1 - t$	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	-
$1 - w$	0,617	0,619	0,620	0,622	0,624	0,625	0,626	0,629	0,630	0,631	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,676	0,678	0,679	0,680	0,681	0,681	0,680	0,676	0,673	0,667	-

Tabela 46 - Potência de máquina para $T=14\text{m}$ e $D=8.6\text{m}$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=14\text{m}$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	2,4	3,4	4,5	6,0	7,6	9,6	12,0	14,9	18,5	23,2	MW
P_E	1,6	2,2	3,0	3,9	5,0	6,4	7,9	9,8	12,1	15,0	MW
η_r	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,503	0,506	0,510	0,513	0,515	0,517	0,517	0,517	0,516	0,512	-
$1 - t$	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	-
$1 - w$	0,584	0,586	0,589	0,591	0,592	0,594	0,595	0,597	0,600	0,600	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,654	0,657	0,658	0,660	0,661	0,661	0,661	0,659	0,654	0,648	-

Tabela 47 - Potência de máquina para $T=16\text{m}$ e $D=8.6\text{m}$ calculada a partir da aplicação de CFD para a estimativa de k e w

Dados	Valores para $T=16\text{m}$										Unid.
V	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Nós
P_S	3,1	4,3	5,8	7,6	9,7	12,2	15,2	18,9	23,6	29,5	MW
P_E	1,9	2,6	3,6	4,7	6,0	7,6	9,5	11,7	14,5	18,0	MW
η_r	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	-
η_s	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	-
η_0	0,467	0,471	0,475	0,477	0,480	0,481	0,483	0,482	0,480	0,475	-
$1 - t$	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	-
$1 - w$	0,570	0,573	0,575	0,576	0,578	0,579	0,581	0,582	0,583	0,584	-
c_{Vent}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
c_P	0,614	0,616	0,618	0,620	0,622	0,623	0,622	0,620	0,616	0,610	-

