GILBERTO DÓRIA DO VALLE FILHO

AVALIAÇÃO DAS INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS EM NAVIOS
VISANDO REDUÇÃO DO USO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL

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

São Paulo
2011

GILBERTO DÓRIA DO VALLE FILHO

AVALIAÇÃO DAS INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS EM NAVIOS
VISANDO REDUÇÃO DO USO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL

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

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Hernani Luiz Brinati

São Paulo
2011

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

São Paulo, 08 de julho de 2011.

Assinatura do autor : Original assinado por Gilberto Dória do Valle Filho

Assinatura do orientador : Original assinado por Hernani Luiz Brinati

FICHA CATALOGRÁFICA

Valle Filho, Gilberto Dória do

Avaliação das instalações de máquinas em navios visando redução do uso de combustível fóssil / G.D. do Valle Filho. – ed. rev. --São Paulo, 2011.

103 p.

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

1.Engenharia naval e oceânica 2.Navios 3. Propulsão 4.Energia 5.Navio porta-contêineres 6.Combustíveis alternativos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Kuley,
brilho maior que Deus me deu.
Através dela, tudo mais me tem sido dado.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, dentre tudo, agradeço em especial por ter assimilado de suas qualidades, a dedicação e persistência.

À tia Zelinda e Tereza pela semente e germinação do grau, também pelo graal, molas propulsoras deste trabalho. Eu só entrei com o combustível (não fóssil, claro).

Ao Prof. Hélio Morishita pela acolhida inicial no Depto de Engenharia Naval e Oceânica da POLI-USP e pela confirmação de que o sonho poderia se tornar realidade. Ao Prof. Hernani Brinati, meu orientador, pelo árduo trabalho de conseguir converter o pesadelo em sonho. Ao Prof. Silvio de Oliveira pela inspiração e apoio, lamento não ter correspondido exergeticamente em 100%. Ao Prof. Moyses Szajnbock pelas brilhantes colocações e ricas contribuições ao trabalho. A todos demais professores, funcionários [à Lânia em especial], e colegas do departamento que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

Ao grande mestre Luis Pereira, pelo apoio e disponibilização dos dados do navio exemplo. A todos os demais colaboradores que contribuíram no enriquecimento dos dados e informações para este trabalho.

Ao Donizetti Ferreira, meu maior professor dos últimos tempos, pelo incentivo e apoio sempre positivo para qualquer iniciativa de melhoria e evolução. À COIMBRA, agora "Engenharia e Soluções", pelo patrocínio desse projeto. Aos colegas de trabalho pela atenção e consideração.

Aos meus irmãos, familiares e amigos, desculpem pela ausência temporária.

A toda minha família meus agradecimentos pela resignação, tolerância e apoio dado para esta missão temporão. Agradecimentos especiais à Luiza e Deca, as mais próximas geograficamente, mesmo relegadas para segundo plano, nunca deixaram de me brindar com excesso de compreensão e carinho, não merecidos. Ao Luiz Humberto pelos trabalhos gráficos, dicas e atalhos para todas as dificuldades incertas e não sabidas. Ao João Renato pelo aconselhamento - sempre sábio - principalmente naquela encruzilhada vital, que se não fosse redirecionado não estaríamos por aqui a esta altura. À Maria Carolina pelo apoio sempre total qualquer que seja a ventura que eu proponha - sempre "sincera e a mais bela". À Kallopí, sempre repetindo seu canto imitando o pássaro "peixe-frito" - esteja onde estiver - nos fará sempre conscientes da nossa obrigação e satisfação de respeito à vida animal e ao meio ambiente.

Muito obrigado!

ΕΠÍΓΡΑΦΕ

The issue of climate change is one that we ignore at our own peril. There may still be disputes about exactly how much we're contributing to the warming of the earth's atmosphere and how much is naturally occurring, but what we can be scientifically certain of is that our continued use of fossil fuels is pushing us to a point of no return. And unless we free ourselves from a dependence on these fossil fuels and chart a new course on energy in this country, we are condemning future generations to global catastrophe.

(Barack Obama)

RESUMO

Este trabalho trata da questão da redução de consumo de combustível fóssil em instalações de máquinas de navios. É um tema de grande interesse no momento, devido ao alto custo operacional e à emissão de poluentes decorrentes do processo da combustão desses derivados de petróleo. Apresenta-se, inicialmente o cenário atual e tendências futuras das instalações propulsoras convencionais que usam óleo pesado ou Diesel. Em seguida, são examinadas alternativas propostas para redução de consumo de combustíveis fósseis nos navios, que são enquadradas em três categorias. A primeira delas envolve possíveis melhorias de projeto para redução da demanda de energia. As outras categorias se referem ao emprego de fontes alternativas de energia, que introduzem uma força propulsora adicional, reduzindo o empuxo requerido do hélice, ou uma potência suplementar no eixo propulsor. Em ambos os casos há também uma redução de demanda de potência requerida do motor Diesel. Na sequência, são apresentados e discutidos fundamentos termodinâmicos, com ênfase nas análises energética e exergética, como ferramentas para avaliação das máquinas dos navios. A análise exergética, diferentemente do enfoque apenas energético, é a ferramenta mais apropriada para tratar as questões ligadas ao meio ambiente, pois a própria definição de exergia está relacionada com o ambiente de referência.

Finalmente, utilizando dados de um navio porta contêineres da frota nacional, é exercitado um exemplo de aplicação com as análises termodinâmicas do motor de propulsão; são também avaliadas e simuladas as diversas alternativas de melhorias e novas fontes de energia, que visam a redução de consumo de combustível fóssil.

Palavras-chave: Engenharia Naval e Oceânica. Navios. Máquinas Marítimas. Propulsão de Navios. Combustível Fóssil. Diesel. Combustíveis Alternativos. Energia. Exergia. Rendimento. Eficiência.

ABSTRACT

This work addresses the issue of reduction of fossil fuel use on ship machinery. Presently it is an interesting topic due to high operational cost and the pollution emissions generated by the combustion process. Initially, it is introduced the present scenario and future trends regarding conventional ship machinery that use heavy or diesel fuel oil. In the sequence, the proposed alternatives for reducing the use of fossil fuel on ships are presented and examined. These alternatives are classified into three categories. The first category comprises possible improvements to the design of ships for reduction of total energy demand. The other categories refer to the use of alternative energy sources, that produce and additional force on the ship reducing the required propeller thrust; or a supplementary power added to the propulsion shaft. For both cases there is also a reduction in the power required from the Diesel engine. Afterwards, the pertaining thermodynamics theory is revised and discussed with focus on the energy and exergy analysis as aid tools for evaluation of ship machinery. The energetic analysis, different from the sole energetic focus, is the most applicable tool to be employed for environmental issues as the self definition of exergy relates to an environment reference.

Finally, using data from a typical container ship belonging to the national fleet, an application example using the thermodynamic analysis is performed to the propulsion main engine; as well as it is also simulated several alternative conditions for improvements and new energy sources, aiming to the reduction of fossil fuel consumption.

Key words: Marine Engineering. Ships. Ship Machinery. Ship Propulsion. Fossil Fuel. Diesel. Alternative Fuels. Energy. Exergy. Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 - Sistemas de recuperação térmica x tipo de embarcação.	
Fonte: Aalborg.....	14
Figura 2-2 - Sistema de recuperação térmica tipo PTG – Fonte: MAN	15
Figura 2-3 - Sistema de recuperação térmica tipo STG – Fonte: MAN	15
Figura 2-4 - Sistema de recuperação térmica conjugado tipo TES – Fonte: MAN ...	16
Figura 2-5 - 03 propulsores Azipod´s de 14.000 kW cada – Royal Caribbean Cruises	18
Figura 3-1 – Diagrama de blocos para a determinação da massa total de combustível	25
Figura 3-2 – Integração Casco–Hélice–Máquina – Sistema convencional	26
Figura 3-3 – Integração Casco–Hélice–Máquina - Suplementação de força propulsora ou potência	26
Figura 3-4 - Navio com casco afunilado com apêndice lateral – fonte: Wärtsila	28
Figura 3-5 – Ilustração de flap de popa (O`ROURKE, 2006)	28
Figura 3-6 – Aleta ou flap de popa. Fonte: HHI - Coreia	29
Figura 3-7 – Polimento subaquático (in-water) de hélice – Fonte: SMC – UK	31
Figura 3-8 – Exemplos de melhoria de rendimento para propulsores – Fonte Wärtsilä	32
Figura 3-9 – Exemplo de melhoria de rendimento - arranjo Diesel-Elétrico. Fonte Wärtsilä	33
Figura 3-10 – Tipos de esquemas para energia eólica para navio. Fonte: (CLAYTON, 1987)	34
Figura 3-11 - Navios “WindShip” – Fonte: (O`ROURKE, 2006)	35
Figura 3-12 – Navio Beluga equipado com kite. Fonte: Sky Sails	35
Figura 3-13 – Diagrama de forças para navio equipado com kite. Fonte: (SILVANIUS, 2009)	36
Figura 3-14 – Ilustração do princípio de operação de navios usando rotores Flettner	37
Figura 3-15 – Navio E-Ship 1 com 4 rotores Flettner. Fonte: Enercon GmbH	38
Figura 3-16 – Esquema básico da célula de combustível. Fonte: (worldwide.fuelcells.org)	39

Figura 3-17 – Eficiências de Usinas de Geração de Eletricidade (NAVSEA)	41
Figura 3-18 – Célula de combustível SOFC (WÄRTSILA)	42
Figura 3-19 – Esquema do sistema híbrido do navio ZemShip	43
Figura 3-20 – Navio Viking Lady equipado com célula de combustível (MARITIME JOURNAL)	44
Figura 3-21 – Trimarã solar. Fonte: Solar Sailor	45
Figura 3-22 – Maquete do navio EcoShip 2030 – Fonte: NYK	46
Figura 3-23 – “Cronograma de implantação de células de combustível” Fonte NYK	47
Figura 4-1 - Rendimentos de processos e equipamentos	52
Figura 4-2 - Diferença entre diagramas de fluxo energético x exergético. (WALL, 1977)	53
Figura 4-3 – Diferença entre usina hidroelétrica e termoelétrica	55
Figura 4-4 – Componentes básicos da exergia total	59
Figura 4-5 – Volume de controle para aplicação dos Balanços de Energia, Entropia, e Exergia	61
Figura 4-6 – Demonstração da equação do balanço de exergia. (OLIVEIRA JUNIOR, 2009)	62
Figura 5-1 - Foto do navio-exemplo	64
Figura 5-2 – Diagrama de carga do MCP	67
Figura 5-3 – Calor específico ar e gases do MCP. Fonte: (MAN B&W, 1985)	69
Figura 5-4 – Expoente isoentrópico – ar e gases do MCP. Fonte: (MAN B&W, 1985)	69
Figura 5-5 – Diagrama simplificado do motor principal	72
Figura 5-6 - Diagrama de Sankey simplificado para o MCP- Análise Energética	76
Figura 5-7 - Diagrama de Grassman simplificado para o MCP- Análise Exergética	76
Figura 5-8 – Esquema ilustrativo da utilização de fontes alternativas de energia	87
Figura 5-9 – Resultados percentuais de redução de consumo de combustível fóssil	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Exemplos de seleção de motores de média e baixa rotação - navios porta contêineres. Fonte: (GAINZA, 2009)	8
Tabela 4-1 - Comparações entre energia e exergia – fonte: (DINCER, et al., 2007)	58
Tabela 5-1 – Dados principais do navio	65
Tabela 5-2 – Arranjos e equipamento de carga do navio	65
Tabela 5-3 – Outros equipamentos do navio	65
Tabela 5-4 – Componentes principais do setor de máquinas	66
Tabela 5-5 – Especificações e capacidades do MCP	66
Tabela 5-6 – Comparação entre os valores dos diagramas de carga	67
Tabela 5-7 – Demandas para aquecimento para carga de 100% do MCP	70
Tabela 5-8 - Dados básicos para análise termodinâmica do MCP do navio exemplo	73
Tabela 5-9 – Dados e resultados dos balanços de energia e exergia do MCP	75
Tabela 5-10 – Resultados da simulação das diversas alternativas	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
CA/CC	Corrente Alternada/Corrente Contínua
DNV	<i>Det Norske Veritas</i> (sociedade classificadora norueguesa)
DWT	<i>Deadweight Tonnage</i>
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
FEU	<i>Forty-foot Equivalent Unit</i> (unidade relativa ao contêiner de 40 pés)
GL	<i>Germanischer Lloyd</i> (sociedade classificadora alemã)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HFO	<i>Heavy Fuel Oil</i>
IFO380	Óleo combustível pesado tipo IFO380, viscosidade de 380 centistokes na condição padrão
IMO	<i>International Maritime Organization</i> (Organização Marítima Internacional)
LO	Lub Oil
LRS	<i>Lloyd's Register of Shipping</i> (sociedade classificadora inglesa)
MC	Designação da MAN para motor com eixo de cames controlado
MCA	Motor de Combustão Auxiliar (<i>Auxiliary Engine</i>)
MCP	Motor de combustão Principal (<i>Main Engine</i>)
MCR	<i>Maximum Continuous Rating</i>
MDO	<i>Marine Diesel Oil</i>
ME	Designação da MAN para motor eletronicamente controlado
MGO	<i>Marine Gasoil</i>
NO _x	Óxidos Nitrosos (genérico)
NYK	<i>Nippon Yusen Kaisha</i> (companhia de navegação japonesa)
PLT	Primeira Lei da Termodinâmica
PTG	<i>Power Turbine Generator</i> (sistema de recuperação térmica MAN)
Ro-Ro	<i>Roll on – Roll off</i>
SLT	Segunda Lei da Termodinâmica
SMCR	<i>Specified Maximum Continuous Rating</i>
SO _x	Óxidos Sulfurosos (genérico)
STG	<i>Steam Turbine Generator</i> (sistema de recuperação térmica MAN)
SWL	<i>Safe Working Load</i> (carga segura de trabalho)

TES	<i>Thermal Efficiency System</i> (sistema de recuperação térmica MAN)
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i> (unidade relativa ao contêiner de 20 pés)
USD	<i>United States Dollars</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos latinos

B	Exergia (kJ), taxa ou fluxo de exergia (kW)
b	Exergia específica (kJ/kg, kJ/kmol)
C	Calor específico (kJ/kg K)
C_{prop}	Coeficiente propulsivo
cec	Consumo específico de combustível (g/kWh)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
E	Energia total, fluxo de energia (kJ, kW)
EG	Eficiência global de propulsão
e_h	Eficiência do casco do navio
e_{rr}	Eficiência relativa rotativa
e_t	Eficiência de transmissão mecânica
h	Entalpia específica (kJ/kg, kJ/kmol)
m	Massa (kg)
MT	Massa total
NH	Número de horas de operação
p, P	Pressão (bar, kPa)
Pa	Potência absorvida
Pad	Potência adicionada
Pf	Potência fornecida
PC	Poder calorífico do combustível, genérico (kJ/kg)
PCI	Poder calorífico inferior (kJ/kg)
Pot	Potência (kW),
Pot_e	Potência efetiva (kW)
Pot_m	Potência fornecida pela máquina, motor (kW), (MW)
Q	Calor (kJ)
R	Constante universal dos gases (kJ/kmol K)
R_T	Resistência ao avanço do navio (kN)

S	Entropia (kJ/K)
s	Entropia específica (kJ/kg K)
t	Temperatura (°C), tonelada, coeficiente de redução de empuxo
T	Temperatura absoluta (K), empuxo (kN)
U	Energia interna (kJ)
V	Velocidade (m/s), volume (m ³)
v	Volume específico (m ³ /kg)
W	Trabalho (kJ)
w	Coeficiente de esteira
Z	Cota de elevação (m)

Símbolos gregos

η	Rendimento, eficiência (genérico)
η_{po}	Eficiência do propulsor em água aberta
η_{pro}	Eficiência do hélice
η_t	Eficiência térmica
Δ	Variação
ϕ	Coeficiente da razão exergia química/PCI
θ	Fator de Carnot ($T - T_0 / T$)

Subscritos

1, 2	Estado1, estado 2
0	Estado de referência restrito
comb	Combustível
e	Entrada
energ	Energética
exerg	Exergética
cin	Cinética

destr	Destruída
f	Fóssil
fis	Física
ger	Gerada
m	Médio
max	Máxima, máximo
pot	Potencial
qui	Química
r	Renovável
s	Saída
tot	Total
v.c.	Volume de controle

Sobrescritos

*	Estado de referência
s	Sistema

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
EPÍGRAFE	iii
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
SUMÁRIO	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Identificação do Problema	1
1.2 Abordagem do Problema	3
1.3 Objetivo	4
1.4 Estrutura do Trabalho	4
2 INSTALAÇÕES PROPULSORAS EM NAVIOS	6
2.1 Panorama Atual de Instalações Propulsoras Marítimas	7
2.2 Motores Diesel de propulsão marítima	9
2.2.1 Características comuns de todos os fabricantes	11
2.3 Sistemas de Recuperação de Energia	13
2.3.1 Recuperação de calor com Turbina de potência – PTG	14
2.3.2 Recuperação de calor com turbina a vapor – STG	15
2.3.3 Recuperação de calor combinada – TES	16
2.4 Outros tipos de propulsão - desenvolvimentos recentes	17
2.4.1 Propulsão Diesel-elétrica	17

2.4.2	Propulsores POD	18
2.4.3	Propulsão com turbinas	19
2.5	Tendências para o Futuro	20
3	REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM NAVIOS	22
3.1	Redução de potência e consumo de combustível	22
3.2	Alternativas para redução da resistência ao avanço	27
3.3	Alternativas para aumento do coeficiente propulsivo	30
3.3.1	Aumento da eficiência do propulsor	30
3.4	Alternativas para redução do empuxo do hélice	33
3.4.1	Propulsão assistida por velas	34
3.4.2	Propulsão assistida por “Kites”	35
3.4.3	Rotores Flettner	37
3.5	Alternativas para redução da potência fornecida pelo motor diesel	38
3.5.1	Sistemas de recuperação de energia térmica do MCP	39
3.5.2	Células de combustível	39
3.5.3	Energia eólica	44
3.5.4	Energia Solar	44
3.5.5	Projetos para o futuro	46
3.6	Combustíveis alternativos aos hidrocarbonetos de petróleo	47
3.7	Comentários	48
4	FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS	50
4.1	Considerações iniciais	50
4.2	Energia e Balanço Energético	54
4.3	Exergia e perdas exergéticas	55
4.4	Análise Energética x Análise Exergética	57
4.5	Balanços de energia, entropia e exergia	61
4.6	Eficiências energética e exergética	63
5	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	64
5.1	Dados e características do navio exemplo	64

5.1.1	Dimensões e dados principais do navio e seus equipamentos	64
5.1.2	Preparação dos dados do MCP para a análise termodinâmica	67
5.1.3	Demandas elétricas do navio na condição de viagem	70
5.1.4	Demandas de aquecimento do navio na condição de viagem	70
5.2	Avaliação das Máquinas do navio exemplo	71
5.2.1	Análise energética e exergética para o MCP	71
5.2.2	Avaliação das Instalações de Máquinas	77
5.3	Avaliação global do navio exemplo para redução de combustível fóssil	81
5.3.1	Avaliação de novas tecnologias disponíveis e sua aplicação no navio exemplo	82
5.3.2	Avaliação de medidas de operação e manutenção no navio exemplo	84
5.3.3	Simulação de configurações alternativas	85
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	91
6.1	Síntese do trabalho	91
6.2	Conclusões	91
6.3	Recomendações	93
	REFERÊNCIAS	95
	ANEXO A - RELATÓRIOS DO PROGRAMA EES	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 Identificação do Problema

A maioria dos navios mercantes da frota mundial usa motores diesel, consumindo combustível de origem fóssil em suas instalações propulsoras e sistemas auxiliares. Os motores de grande porte para propulsão geralmente são de dois tempos, enquanto que os motores menores usados como máquinas auxiliares são normalmente de quatro tempos. Os combustíveis mais comumente consumidos nestas instalações são o óleo combustível pesado ou o óleo diesel marítimo. O gás natural de petróleo é também usado, mas em escala muito pequena.

Duas questões de grande relevância devem ser consideradas no atual cenário de emprego de combustíveis fósseis. A primeira delas está relacionada diretamente com os interesses dos armadores e se refere à participação das despesas com combustíveis no custo operacional de um navio. Esta influência depende, evidentemente, do preço dos combustíveis derivados do petróleo. O preço do petróleo cru chegou à marca histórica acima de 140 USD/barril em Julho de 2008. Foi derrubado, na seqüência, para 40 USD/barril, devido ao pico da crise de crédito mundial, mas atualmente já converge para valores que tendem a ultrapassar 3 dígitos rapidamente, e estará sempre ameaçado por fatores políticos e pela lei da oferta e procura.

Conforme disponível no Bunker Index (2011), os preços atuais de combustíveis para navios (*bunkers*, no Inglês) para abastecimento em Santos é de USD 610/t para óleo pesado de qualidade IFO380, e de USD 950/t para óleo diesel de qualidade MGO.

Dentro deste cenário, o fator custo dos combustíveis para navios (*bunkers*) é significativo na composição dos custos globais. Para exemplificar, considere-se um motor Diesel de 60 MW, aplicado na propulsão de um navio porta contêineres de grande porte. Adotando um consumo específico de 170 g/kWh, este motor chega a consumir 10,2 t/h. O custo diário, consumindo óleo pesado, atinge USD 149.328, valor que dá a importância desse fator no custo operacional do navio.

A segunda questão relevante relacionada ao emprego dos combustíveis fósseis no transporte marítimo é o problema ambiental. O emprego de óleos pesados causa poluição do ar devido à emissão de óxidos nitrosos, óxidos sulfurosos, material particulado e gás carbônico, este último considerado por uma corrente de pensamento como danoso à camada de ozônio.

Os impactos ambientais causados pelo transporte marítimo estão sendo objeto de diversas pesquisas. De forma semelhante ao que ocorre com outros modais de transportes, estão sendo impostas restrições sobre a emissão de gases poluentes de motores empregados em navios. É o caso da norma IMO (*International Maritime Organization*) de 10 de outubro de 2008, que impõe novos limites, e correspondente cronograma de implantação, para as emissões de gases do efeito estufa, óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado. Para navios tanques, há restrições específicas adicionais para emissões de componentes orgânicos voláteis.

Essas restrições têm um efeito direto sobre o custo operacional dos navios. De um lado, os motores, para reduzir a emissão de poluentes, terão uma redução na eficiência térmica (aumento de consumo específico); de outro lado, para redução de outros poluentes é necessária a aquisição de combustível mais destilado ou purificado, por exemplo: com menor teor de enxofre e, portanto, muito mais caro.

Considerando o crescimento da frota mundial de navios mercantes, pode-se avaliar a degradação do meio ambiente que representa o emprego de combustíveis derivados do petróleo no transporte marítimo.

Resumindo, a dependência que o transporte marítimo tem dos combustíveis fósseis coloca em evidência duas questões relevantes: custo operacional, devido ao alto preço dos combustíveis e impacto ambiental. Há ainda um ponto adicional, que se refere à redução das reservas de petróleo e a sua possível extinção, em um futuro mais distante.

Tudo isto exige que se realizem estudos com a finalidade de redução do emprego de combustíveis derivados de petróleo no transporte marítimo, que pode ser atingido de duas formas: redução da demanda de energia a bordo, e emprego de fontes alternativas de energia.

De fato, muitas pesquisas estão sendo feitas com esta finalidade, considerando o emprego de combustíveis alternativos e outras fontes de energia. Para avaliação destas diferentes opções é importante uma abordagem consistente da questão.

1.2 Abordagem do Problema

Como exposto acima, o setor de transporte marítimo está empenhado em reduzir a demanda de derivados de petróleo com três finalidades: redução do custo de energia, redução do consumo de combustível não-renovável e redução de impactos ambientais.

Diversas alternativas estão sendo analisadas para atingir este objetivo. Elas podem ser enquadradas em duas categorias distintas. A primeira considera as instalações propulsoras e de geração auxiliar tradicionais e examina alternativas que resultem em redução de consumo de combustível. Podem ser separadas em dois grupos: modificações no projeto da embarcação, que resultem em menor demanda de energia, desenvolvimento de motores mais eficientes para propulsão e geração de energia auxiliar.

Essas propostas implicam aperfeiçoamento das linhas de casco para redução da resistência ao avanço, projeto de hélices de maior eficiência para redução da potência requerida do motor, revisão das velocidades de serviço para reduzir o consumo de combustível por tonelada transportada x kilometro percorrido, utilização de motores de maior eficiência térmica, aproveitamento das fontes de calor, atentando para a demanda de energia global a bordo.

A segunda categoria de propostas envolve a utilização de fontes alternativas ao combustível derivado de petróleo: combustíveis renováveis, energia solar, energia eólica, energia nuclear e células de combustível. Nessa abordagem, a resistência ao avanço oferecida pelo casco do navio, poderá ser satisfeita pelos empuxos do hélice propulsor ou por empuxo adicional de outro sistema ou dispositivo adicional (por exemplo: propulsão assistida por energia eólica).

Uma descrição mais completa e consistente das diversas alternativas é apresentada em capítulo específico do trabalho. Nesta situação, em que diferentes alternativas são propostas, cada uma delas se colocando como a melhor opção, é preciso uma análise final sobre o emprego apropriado de alternativas válidas para cada tipo de navio particular.

1.3 Objetivo

Há diferentes alternativas para redução do emprego de derivados de petróleo no transporte marítimo. Há também distintos critérios que podem ser empregados para avaliar estas alternativas. O objetivo fundamental deste trabalho é propor uma abordagem para avaliar as diversas alternativas.

Além da comparação das alternativas e inovações tecnológicas, será também apresentado um enfoque novo. Consiste no emprego conjunto de análise energética e análise exergética para avaliar o desempenho das instalações de máquinas das diferentes alternativas. Entende-se que nesses casos, devem-se priorizar os resultados da análise exergética porque ela é mais apropriada para estudos envolvendo questões ambientais. Pois, por definição, a exergia está relacionada com o meio ambiente de referência.

Neste trabalho, serão usados os dados e características reais de um navio-exemplo da frota nacional, para avaliação das alternativas, envolvendo melhorias na instalação existente e emprego de fontes alternativas de energia. E serão simuladas e comparadas algumas dessas opções de redução ou substituição de combustível fóssil.

1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 apresentam-se a situação atual e tendências para as máquinas típicas usadas atualmente nos navios, que atualmente consomem predominantemente combustível derivado de petróleo.

São apresentadas no Capítulo 3 as soluções referentes às inovações tecnológicas e alternativas para redução e substituição de combustível de origem fóssil elencadas nos últimos anos.

No Capítulo 4 apresentam-se os fundamentos termodinâmicos aplicáveis para avaliação da eficiência das máquinas, sobretudo para os sistemas térmicos.

Os exercícios de aplicação para o navio-exemplo escolhido são apresentados no Capítulo 5. Primeiramente, apresentam-se as análises termodinâmicas para o motor principal e sistema de recuperação térmica. Em complemento, apresenta-se uma avaliação global para o navio-exemplo, considerando alternativas de redução de consumo de combustível e fontes alternativas de energia.

Finalmente, as conclusões e recomendações são apresentadas no Capítulo 6.

2 INSTALAÇÕES PROPULSORAS EM NAVIOS

Como mencionado no capítulo anterior, o objetivo deste trabalho é apresentar um procedimento para avaliação das diversas alternativas propostas para redução do uso de combustíveis fósseis em instalações propulsoras marítimas.

Para isto é interessante conhecer o panorama dos tipos de instalações propulsoras empregados atualmente, bem como das novas tendências do mercado. Para entender os diferentes tipos de instalação existentes é interessante observar que uma instalação propulsora é constituída por um conjunto adequadamente integrado de máquina principal, sistema de transmissão e elemento propulsor.

Há diversos tipos de máquina principal (motores Diesel, de baixa, média e alta rotação, turbinas a vapor, turbinas a gás, motores elétricos), de sistemas de transmissão (acoplamento direto ou uso de redutores) e de elementos propulsores (hélices de passo fixo ou de passo controlável, hélices contra rotativos e hélices *podded* azimutais).

A predominância de um tipo de instalação é resultado de uma comparação técnico-econômica entre as diversas alternativas disponíveis. Nesta comparação são considerados diversos fatores como custos, pesos/dimensões, ruído e vibrações, consumo, confiabilidade, controle de velocidades, manutenção, flexibilidade energética, e tripulação.

Nesta dissertação, serão abordados apenas dois aspectos; as despesas de combustível e a eficiência proporcionada ao propulsor. Outro ponto importante referente ao emprego de motores Diesel na propulsão de navios, e que será abordado neste capítulo, é a possibilidade de recuperação de energia dos gases de descarga e seu uso para atender outras demandas de energia a bordo. Isto contribui para reduzir as despesas totais com energia do navio.

2.1 Panorama Atual de Instalações Propulsoras Marítimas

Conforme Woodyard (2004) as instalações propulsoras atuais são normalmente Diesel-mecânicas (dominante) ou Diesel-elétricas (em expansão). Há também um pequeno, mas crescente número de aplicações com turbinas a gás; sejam isoladas ou combinadas com outros tipos de propulsão (esse tipo de uso é mais predominante em embarcações militares para possibilitar pronta resposta nas operações que requerem alta velocidade).

Gainza (2009) apresenta dados sobre a dominância de instalações Diesel diretas (motores Diesel de baixa rotação) em 100% de navios porta contêineres de grande porte, tipos: Panamax 2800 a 5.100 TEU, Pós Panamax de 5.500 a 10.000 TEU, Novo Panamax de 12.000 a 14.000 TEU, e ULCV maior que 14.500 TEU. Mesmo nas exceções, para aos navios menores, tipos: Pequeno Alimentador de 400 a 1.000 TEU, e Alimentador de 1200 a 2.800 TEU; esta dominância é de 90,8% para navios Alimentadores, e de 38% para Pequenos Alimentadores (o que também, em contraponto, demonstra a dominância de motores de média rotação para navios menores). Casos de instalações com turbinas e outros dispositivos de propulsão para navios porta contêineres menores é inferior a 1%

Os dados mostram que as instalações Diesel têm preferência marcante na seleção de sistemas de propulsão de navios mercantes. Os motores Diesel com ciclo de dois tempos e baixa rotação são usados predominantemente nos navios de grande porte. A principal razão é o seu baixo custo operacional, devido à associação de dois fatores: baixo consumo específico de combustível (c.e.c) e emprego de óleo pesado, que é o combustível de menor preço por unidade de energia.

A predominância das instalações propulsoras Diesel teve início na década de 1960, quando os motores de baixa rotação passaram a operar com óleo pesado. Antes disso, apesar da ligeira vantagem de eficiência térmica dos motores Diesel, o preço de um combustível mais caro – óleo diesel marítimo – não era suficiente para competir com as instalações de turbina a vapor, que vieram a substituir as antigas máquinas a vapor que predominaram nos navios no início do Século XX, mas que apresentavam uma eficiência térmica muito baixa.

Os motores de baixa rotação têm dominado o mercado de navios tanque, navio graneleiros, e também navios porta contêineres. Os motores de média rotação têm sido aplicados em navios de porte menor, e em balsas de travessia, passageiros, navios ro-ro, navios de pesquisa, e também nos motores auxiliares para geração de energia elétrica.

Para ilustração, apresenta-se abaixo a Tabela 1, contendo exemplos de seleção de motores de média e baixa rotação, para navios porta contêineres, dos tipos: Navio Pequeno Alimentador (400 a 1.000 TEU) e Navio Alimentador (1.200 a 2.800 TEU), conforme (GAINZA, 2009):

Tabela 2-1 - Exemplos de seleção de motores de média e baixa rotação - navios porta contêineres.
Fonte: (GAINZA, 2009)

Tipo de navio	Rotações do motor	Fabricante	Modelo do motor	Rotação (rpm)	Consumo (g/kWh)	Potência (kW)
Pequeno Alimentador	Baixa Rotação	MIT	6UEC52LS	95-127	172	11.200
		MAN B&W	6S46MC-C	110-129	174	8.220
		WÄRTSILÄ	5RTA-48T	102-127	171,5	10.310
	Média Rotação	MAN B&W	8L48/60B	500-514	180	11.500
		WÄRTSILÄ	8L46D	500-514	177	9.600
		MAK	8M43	500-514	178	8.000
Alimentador	Baixa Rotação	MAN B&W	6S50MC	99-117	169	13.760
		WÄRTSILÄ	7RT-flex-60C	91-114	170	17.000
	Média Rotação	MAN B&W	7L58/64	400-428	174	13.700
		MAK	9M43	500-514	178	13.700

Independentemente do tipo de instalação, conforme Woodyard (2004) e para Brinati (2009), grandes esforços estão sendo feitos pelos fabricantes de

máquinas para atender os requisitos de controle de poluição e melhoria contínua da eficiência térmica, com redução do consumo de combustíveis.

Os projetistas dos motores marítimos, a exemplo dos de outras áreas, tiveram que redirecionar a atenção do projeto para atender os desafios das legislações regionais, nacionais e internacionais para responder às demandas para o controle de poluição atmosférica. Assim, não é mais só a questão de consumo específico de combustível que orienta o projeto dos novos motores.

Também essas pressões para o controle de poluição têm estimulado o desenvolvimento de aplicações especiais. Como exemplo, há o caso de motores que possam queimar diferentes combustíveis (*dual-fuel*) gás e diesel. Esse tipo tem despontado na aplicação para propulsão de embarcações de apoio a plataformas offshore (*supply vessels*), balsas de travessia e navios tanques de transporte de gás liquefeito de petróleo - GLP.

2.2 Motores Diesel de propulsão marítima

Os fabricantes de motores de grande porte apresentam uma ampla faixa de motores disponíveis para seleção de instalações propulsoras. Motores de baixa e média rotação, com número variável de cilindros e tamanhos, são disponíveis para atender as mais diversas aplicações requeridas. Os fabricantes também disponibilizam tabelas, dados e até programas de computador para seleção dos motores para navios.

Na faixa de motores de baixa rotação – 2 tempos, aplicados normalmente nos navios de grande porte, os únicos fabricantes que sobreviveram à grande concorrência dos anos 1990 foram MAN B&W, SULZER (hoje parte do grupo WÄRTSILA), e MITSUBISHI. Por exemplo, o fabricante MAN B&W oferece um de seus motores de topo de escala de dois tempos disponível: K98ME com diâmetro do pistão de 980 mm e curso de 2.660 mm, potência de 5.720 kW/cilindro, que atinge a potência de 80.080 kW com 14 cilindros em linha, e consumo específico de combustível de 168 a 174 g/kWh. Na mesma linha, o fabricante WÄRTSILÄ

contrapõe o modelo Sulzer RT-flex96C, com diâmetro do pistão de 960 mm e curso de 2.500 mm, mesma potência de 5.720 kW/cilindro, também atingindo potência de 80.080 kW com 14 cilindros em linha, com consumo específico praticamente idêntico.

Citando desenvolvimento mais recente de motores de 2 tempos, os tamanhos vão aumentando conforme a demanda de novos projetos; “por exemplo, a MAN B&W desenvolveu o motor 108MC/ME, com diâmetro de 1.080 mm e potência específica de 6.950 kW/cilindro que atinge a potência de 97.300 kW que é projetado para propulsão de navios porta contêineres de capacidade superior a 10.000 TEU com velocidade de serviço superior a 25 nós” (WOODYARD, 2004).

Para os motores de média rotação – 4 tempos, usados em embarcações menores e também de grande porte em número múltiplo e onde convenientes, existe uma gama maior de fabricantes internacionais onde se destacam: MAN B&W, WÄRTSILÄ, ROLLS-ROYCE, ADD, CATERPILLAR, MTU, HYUNDAI, dentre outros. Tamanho e peso reduzidos são as principais vantagens desses motores em relação aos de baixa rotação. As faixas de tamanho e potência são as mais variadas para atender diferentes demandas de aplicações navais.

Como se pode observar, os grandes fabricantes de motores oferecem uma grande variedade de modelos, com ampla faixa de dimensões, potência, e rotação, tendo em vista as demandas de potência dos diferentes tipos de navios. Em particular, tem sido uma preocupação contínua dos fabricantes de motores de propulsão, disponibilizar motores cada vez com rotação mais baixa. Isto para atender os requisitos de rotação dos propulsores na fase de projeto, para que possam ser usados hélices de diâmetro máximo para cada caso particular. Pois quanto maior o diâmetro do hélice, melhor sua eficiência.

O desenvolvimento dos motores está principalmente focado na economia de combustível. O aumento de eficiência e redução de consumo pode ser alcançado com a combinação de: rotação mais baixa, pressão de combustão mais alta, e turbocompressores ainda mais eficientes. “A eficiência térmica dos motores modernos ultrapassa 54% e o consumo específico foi reduzido para níveis tão baixos quanto 155 g/kWh, quando equipados com turbinas compostas de alta

eficiência para recuperação de eletricidade conjugada” (WOODYARD, 2004). Os atuais motores de grande porte e baixa rotação são normalmente equipados com sistemas de recuperação convencional, e apresentam consumo na faixa de 170 g/kWh, como visto nos exemplos dos motores MAN B&W e WÄRTSILA, acima.

O desenvolvimento dos motores tem também outro objetivo, que é de proporcionar que sejam empregados hélices de maior eficiência. Com motores de rotação mais baixa (55 a 70 rpm), podem ser utilizados hélices de maior diâmetro e, portanto, de maior eficiência.

2.2.1 Características comuns de todos os fabricantes

Os objetivos comuns aos projetos de todos os fabricantes normalmente enfocam os seguintes pontos (WOODYARD, 2004):

- Desenvolvimento de motores Diesel para atender uma gama variada de potência e rotações que atendam aos projetos modernos com melhor eficiência em carga nominal e pontos de operação otimizados; para cada modelo, o fabricante ajusta o motor para otimizar o seu desempenho em uma potência máxima contínua de contrato, SMCR (*specified maximum continuous rating*).
- Aumento de eficiência térmica em cargas parciais com controle de “timing” eletrônico. Os motores de baixa rotação eletronicamente controlados, com sistemas de atuação em válvula de descarga e injeção, estão entrando em serviço em maior número, chamados de “motores inteligentes”.
- Os motores com controle eletrônicos podem monitorar a sua própria condição e auto-ajustar os parâmetros principais para funcionamento ideal em um modo de operação selecionado.

- Aplicação de sistemas turbocompressores combinados de maior rendimento, com conseqüente redução do consumo específico.
- Aproveitamento da energia dos gases de descarga para aumento da eficiência global.

Os três fabricantes remanescentes de motores de baixa rotação (MAN B&W, WÄRTSILA e MITSUBISHI), estão concentrados em uma mesma filosofia básica: sistema de lavagem unidirecional, válvulas de descarga no cabeçote com acionamento hidráulico, conjunto turbocompressor com turbinas de pressão constante, alta relação curso / diâmetro do cilindro (limitada às restrições de velocidade média do pistão), que podem atingir valores de até 4,2:1, e baixas rotações para acoplamento direto aos propulsores .

A escolha de um modelo de motor mais apropriado para uma instalação propulsora de um navio ficou fácil com a utilização de programas de computador disponibilizados pelos fabricantes. Por exemplo, a MAN B&W tem um software denominado: *Computer Aided and Application System*, que inclui um programa de escolha e previsão da potência e velocidade para os navios e o correspondente programa de seleção de motor principal.

Soluções otimizadas (diâmetro dos cilindros, número dos cilindros, razão de velocidade/ potência) podem ser determinados com base técnica e econômica. O sistema, que compreende um número de subprogramas integrados arranjados hierarquicamente, facilita os cálculos para os parâmetros de consumo de combustível, utilização do calor do gás de escape e custo de manutenção, e ainda permite comparações econômicas das várias opções. Hoje isto já é possível pela Internet.

2.3 Sistemas de Recuperação de Energia

Quanto aos sistemas de recuperação de energia dos gases de escape do motor principal, especial atenção tem sido dada pelos fabricantes na melhoria de eficiência dos turbocompressores para otimizar todo o processo de combustão, e o desenvolvimento dos sistemas de recuperação de calor dos gases antes de serem descarregados na atmosfera, para haver o aproveitamento máximo do processo.

Esta recuperação final é normalmente feita através de caldeiras com produção de vapor para atender as demandas de aquecimento e de energia elétrica, em que o sistema de recuperação possui turbinas e geradores elétricos.

A demanda de aquecimento do navio, normalmente provem dos equipamentos de armazenamento, manuseio e condicionamento do óleo combustível pesado, chamados de “consumidores de calor para aquecimento”. Esses consumidores devem ser escolhidos em classes de temperatura para melhor determinar o sistema de recuperação de calor que vai atender as diferentes demandas nos navios conforme Rocha (1983) .

Cada aplicação tem sua particularidade e soluções mais recomendadas; ao invés de vapor poderia ser usada água quente, por exemplo, ou mesmo usar novos sistemas com economizadores de alto rendimento, utilizando fluido térmico para atender os requisitos dos consumidores de aquecimento.

Um exemplo desse sistema foi desenvolvido pela firma Aalborg Industries (2010). É o sistema utilizado no navio-exemplo deste trabalho. Essa empresa é um dos fabricantes internacionais de caldeiras e de sistemas de recuperação térmica para navios, e apresenta recomendações típicas de aplicação desses sistemas, dependendo do tipo de embarcação, conforme a Figura 2-1.

Existem várias alternativas de sistemas de recuperação térmica disponíveis para MCP, com utilização de turbinas a gás e a vapor. A seguir, apresentam-se exemplos conforme o fabricante MAN B&W (2010) para esta finalidade, que muito se assemelham às alternativas disponibilizadas pelos outros fabricantes como a WÄRTSILÄ e MITSUBISHI.

Recomendação Alborg							
Tipo do Navio	Tamanho	Tipo de MCP	CT*	CC*	Vapor CR*	AQ*	SGS*
Navios Porta Containers	Até 2.500 TEU	4 tempos	●	●	●	●	●
	2.500 até 5.000 TEU	2 ou 4 tempos	●	●	●	●	●
	5.000 até 8.000(+)	2 tempos	●	●	●	●	●
Navios Graneleiros	Até 16.000 dwt	4 tempos	●	●	●	●	●
	Até 40.000 dwt	2 ou 4 tempos	●	●	●	●	●
	Até 50.000 dwt	2 tempos	●	●	●	●	●
Navios Tanques	Até 25.000 dwt		●	●	●	●	●
	Até 40.000 dwt(+)		●	●	●	●	●
Navios Gaseiros LNG/LPG			●	●	●	●	●
Navios de Passageiros			●	●	●	●	●
Balsas de Travessia			●	●	●	●	●
Dragas			●	●	●	●	●
Navios para Transporte de Asfalto/Betume			●	●	●	●	●
Rebocadores de Porte	Até 4.000 kW		●	●	●	●	●
Rebocadores Offshore	Acima de 4.000 kW		●	●	●	●	●
Navios Tanque Fluvial	Produtos Químicos		●	●	●	●	●
	Óleo Pesado		●	●	●	●	●
Navios de Carga Superpesadas	Até 16.000 dwt		●	●	●	●	●
	Acima de 16.000 dwt		●	●	●	●	●
● Recomendado ● Opcional ● Não Recomendado							
*CT: Caldeira com óleo Térmico *CC: Caldeira Combinada *CR: Caldeira de Recuperação *AQ: Água Quente *SGS: Sistema gás inerte / Geradores de Gás Inerte / Sistema vácuo							

Figura 2-1 – Sistemas de recuperação térmica x tipo de embarcação. Fonte: Aalborg.

2.3.1 Recuperação de calor com Turbina de potência - PTG

Além dos turbocompressores convencionais, uma parte dos gases é usada por turbina de potência. Com o esquema da Figura 2-2 pode-se atingir até 4% de economia de combustível à plena carga.

A recuperação deste sistema, em forma de energia elétrica, pode ser usada no barramento elétrico principal do navio. Essa energia pode alimentar alternativamente um motor elétrico do eixo propulsor para adicionar potência de propulsão. Alternativamente, essa energia pode alimentar os sistemas auxiliares.

Figura 2-2 – Sistema de recuperação térmica tipo PTG – Fonte: MAN

2.3.2 Recuperação de calor com turbina a vapor – STG

O esquema do sistema STG da MAN é apresentado na Figura 2-3.

Figura 2-3 - Sistema de recuperação térmica tipo STG – Fonte: MAN

Pode atingir 5 a 7% de economia em plena capacidade do MCP. Essa é uma aplicação possível nos navios equipados com uma caldeira de recuperação produzindo vapor para geração de energia elétrica em turbo-gerador de alta eficiência. Nessa configuração, os consumidores de energia de aquecimento no navio podem também utilizar a energia do vapor de baixa pressão.

Se o motor permitir, pode-se elevar a temperatura dos gases para produzir mais vapor e aplicar uma turbina para recuperação de energia. Nota-se também a utilização de um motor-gerador, que pode ser acoplado no eixo propulsor, para integralizar o aproveitamento de energia.

2.3.3 Recuperação de calor combinada – TES

O esquema do sistema TES da MAN é apresentado na Figura 2-4.

Figura 2-4 - Sistema de recuperação térmica conjugado tipo TES – Fonte: MAN

É um sistema combinado com duas turbinas, uma de potência movida pelo gás de escape, e outra movida a vapor produzido na caldeira de recuperação, conectadas em uma linha de eixo única a um gerador elétrico, que permite o melhor rendimento da recuperação desse sistema, batizado de TES pela MAN.

O sistema de vapor pode ter uma ou duas faixas de temperaturas para melhor rendimento e depende da aplicação. Nota-se também a integração com um motor-gerador acoplado no eixo propulsor, para integralizar o aproveitamento de energia. Pode atingir até 10% de economia em plena capacidade. O sistema completo e suas versões estão descritos em MAN B&W (2009).

2.4 Outros tipos de propulsão - desenvolvimentos recentes

2.4.1 Propulsão Diesel-elétrica

Tem sido crescente a utilização de acionamento diesel-elétrico no sistema de propulsão de navios, empregando-se vários motores de média rotação. Novos geradores de CA/CC são também disponíveis com nova tecnologia, cobrindo uma larga gama de aplicação para propulsão elétrica. A concepção é adequada para vários tipos de navios: quebra-gelo, de pesquisa e de lançamento de cabos.

Para Woodyard (2004) a propulsão diesel-elétrica também está sendo usada nos navios de cruzeiros e na propulsão de navios tanques do Mar do Norte, como também em navios combinados de passageiros, navios tipo ro-ro, balsas de travessia, e em alguns navios porta contêineres. Mais recentemente, esse sistema diesel-elétrico está sendo aplicado também nos navios de suprimentos offshore e nos de carregamento de gás natural.

As vantagens do sistema diesel-elétrico elencado por alguns dos fabricantes ABB, AUSTON, STN ATLAS e SIEMENS são: capacidade de atender mudanças bruscas de cargas, possibilidade de controle de velocidade suave e preciso, níveis baixos de ruído e vibração .

2.4.2 Propulsores POD

Os propulsores tipo POD representam um desenvolvimento técnico significativo para a economia e eficiência de propulsão. Muito utilizado para: navios quebra-gelos, navios de passageiros, embarcações de suprimento offshore, balsas de travessia e navios tanque, sendo cada vez mais aplicados em qualquer tipo de embarcação. Apresenta-se na Figura 2-5 um exemplo do propulsor Azipod.

Figura 2-5 – 03 propulsores Azipod´s de 14.000 kW cada – Royal Caribbean Cruises

As vantagens desse sistema são:

- Espaço no casco que anteriormente era reservado para a propulsão convencional pode ser utilizado para outros propósitos.
- Liberdade de projetos mais criativos visto que os propulsores não requerem uma conexão direta com o motor principal.
- Capacidade de manobra significativamente melhor que os sistemas de leme convencional, pois o próprio propulsor pode girar em torno do seu eixo, comandando a direção do navio como se fosse o leme.

- Excelente capacidade de reversão durante a navegação a ré e melhor resposta no caso de desaceleração.
- Baixo ruído e vibração associado com a propulsão elétrica.
- Unidade propulsora pode ser entregue na fase final de construção do navio economizando custos e planejamento nos custos total e horas de construção.

2.4.3 Propulsão com turbinas

Há um grande potencial de uso em navios comerciais de turbinas a gás, cujo emprego tradicional foi em navios de guerra. Nota-se sua utilização crescente em alguns navios porta contêineres e navios de transporte de gás, devido ao aumento do preço dos combustíveis e ao sucesso das turbinas modernas de alta eficiência. Os maiores candidatos para a utilização de propulsão com turbinas a gás para navios comerciais são:

- Navios de passageiros: devido à natureza compacta das instalações com turbinas elas podem ser localizadas e arranjadas de maneira a criar mais espaço de acomodação ou espaços públicos, e a perda de calor pode ser utilizada para os serviços a bordo. Em navios de passageiros de grande porte, cerca de 20-100 cabines adicionais podem ser incorporadas pela utilização de turbinas, comparadas com a mesma instalação diesel/elétrica, dependendo da filosofia do arranjo.
- Balsas de travessia e navios de carga de alta velocidade: a demanda de potência, que é extremamente alta para estes navios devido a sua velocidade, é dificilmente satisfeita com a instalação de um acionamento unicamente diesel.
- Navios de transporte de gás natural liquefeito: habilidade para queimar o os gases de “boil-off” da carga e combustível líquido com eficiência muito maior quando comparada com a tradicional propulsão da turbina a vapor.

- Navios porta contêineres de alta velocidade: a instalação compacta permite espaço opcional para contêineres.

As vantagens principais para utilização de propulsão baseada em turbina a gás em relação aos motores convencionais são:

- Alta potência em relação ao peso e em relação ao seu volume; pois estas turbinas são derivadas das turbinas de aviação, conduzindo a tamanhos compactos e leves. Por exemplo, uma turbina General Electric modelo LM2500 de capacidade para 25.000 kW mede 4,75 m de comprimento por 1,6 m de diâmetro e pesa apenas 3,5 toneladas, comparada com os pesados motores diesel.
- Baixos ruído e vibração. Fácil instalação e acesso para a manutenção. As instalações são modulares e integradas com controle e sistemas de suporte. Custo de manutenção baixo, pois é muito pequena a quantidade de peças sobressalentes e são de fácil substituição.
- Solução mais adequada em relação ao meio ambiente (baixa emissão de NO_x e SO_x comparado com os motores diesel).
- Nível reduzido de atenção de operação por tripulante, facilitada por automação plena de toda a instalação.
- Flexibilidade operacional: rápida partida, não é necessário tempo de aquecimento ou período perdido para a partida. A partida pode ser alcançada em cerca de 30 segundos e seguir para uma aceleração de máxima potência, idem para o caso de desaceleração.

2.5 Tendências para o Futuro

É difícil prever o futuro de longo prazo para as instalações propulsoras marítimas convencionais. Mas, certamente, os motores marítimos diesel estarão ameaçados por sistemas de propulsão alternativos devido às restrições de legislação e mudanças de orientação para combustíveis mais limpos, líquidos ou gasosos. Derivados do carvão e propulsão a vapor estão crescendo em domínio

comercial. A propulsão com turbinas a gás e com vapor de origem nuclear pode voltar a ser uma fonte concorrente num futuro próximo, hoje somente utilizada em embarcações militares.

Também, turbinas a gás derivadas dos modelos aeronáuticos têm sido muito aplicadas para embarcações rápidas e para navios de passageiros. Um grande desafio é a utilização de turbinas a gás combinadas com ciclo diesel, que podem oferecer soluções opcionais para instalações de alta potência.

Para o futuro próximo, todos os fabricantes de motores diesel de grande porte já anunciaram seus caminhos de desenvolvimento, que são programas coincidentes para melhoria de: projeto para o aumento de competitividade, turbocompressores, tratamento de combustível, lubrificação, automação, materiais, sistemas de diagnóstico e monitoramento de manutenção, e gerenciamento de sobressalentes.

Ainda resta um potencial de desenvolvimento em potência e eficiência para os motores diesel. Como o emprego de conceitos como injeção de vapor e ciclos diesel combinados com ciclos a vapor, pode-se atingir uma eficiência global de cerca de 60%, conforme Woodyard (2004). Entende-se que esses ciclos diesel combinados demandam uma drástica mudança nos balanços térmicos que podem ser realizados com processo chamado de “combustão quente”. Os topos dos pistões e cabeçotes teriam o resfriamento eliminado, o resfriamento das camisas seria minimizado. E as perdas de calor concentradas no gás de escape seriam recuperadas em uma caldeira de alta pressão, que forneceria vapor para uma turbina com gerador elétrico.

3 REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM NAVIOS

Neste capítulo serão abordados os conceitos básicos que definem os requisitos de potência de máquina para a propulsão de navios. Um entendimento destes conceitos permite identificar alternativas de redução da potência dos motores principais, com a conseqüente redução do consumo de combustível, seja fóssil ou renovável. São apresentadas as equações do movimento do navio, que expressam a interação entre casco propulsor e máquina principal. Em seguida serão apresentadas as alternativas dessa redução, classificadas de acordo com a teoria apresentada. Finalmente, serão apresentados também combustíveis alternativos e renováveis.

3.1 Considerações básicas sobre redução de potência e consumo de combustível de motores diesel de propulsão

Existe um conjunto grande de propostas apresentadas para redução da potência usada na propulsão de navios e na emissão de poluentes. Para se ter uma melhor compreensão das diferentes alternativas, é interessante fazer um exame das equações do movimento do navio e de sua influência no consumo de combustível.

O objetivo desse trabalho, de análise de redução de potência e do consumo de combustível, é de buscar a maior eficiência global de propulsão (EG). Este parâmetro é definido como a razão entre a potência efetiva (P_{te}) e a potência fornecida pelo combustível (P_{comb}):

$$EG = P_{te} / P_{comb} \quad (3.1)$$

Sabe-se que a potência efetiva (P_{te}) depende da resistência ao avanço do navio (R_T) e da velocidade do navio (V), dado pela seguinte expressão:

$$P_{te} = R_T \cdot V \quad (3.2)$$

e que a potência fornecida pelo combustível é função da massa de combustível ($\dot{m}_{\text{comb}}$) e de seu poder calorífico (PC)

$$P_{\text{comb}} = \dot{m}_{\text{comb}} \cdot \text{PC} \quad (3.3)$$

Mas, a eficiência global de propulsão (EG) também pode ser definida em função do rendimento térmico do motor (η_t) e do coeficiente propulsivo do navio (C_{prop}):

$$\text{EG} = \eta_t \cdot C_{\text{prop}} \quad (3.4)$$

Sabe-se também que o coeficiente propulsivo do navio pode ser dado em função da seguinte expressão:

$$C_{\text{prop}} = \eta_{\text{po}} \cdot e_{\text{rr}} \cdot e_t \cdot e_h \quad (3.5)$$

onde:

η_{po} é a eficiência do propulsor em água aberta

e_{rr} é a eficiência relativa rotativa;

e_t é a eficiência de transmissão;

e_h é a eficiência do casco

Então, substituindo (3.5) em (3.4), a eficiência global de propulsão pode ser também expressa por:

$$\text{EG} = \eta_t \cdot \eta_{\text{po}} \cdot e_{\text{rr}} \cdot e_t \cdot e_h \quad (3.6)$$

Portanto a eficiência global de propulsão depende da eficiência térmica da máquina principal, que pode ser calculada pela análise termodinâmica do motor. Depende também dos quatro demais fatores da expressão (3.6) que determinam o coeficiente propulsivo do navio. Estes fatores podem ser analisados isoladamente.

Com relação à eficiência do hélice em água aberta (η_{po}), sabe-se que quanto maior for o diâmetro do hélice maior é a sua eficiência. Por isto, é recomendado usar-se o maior diâmetro de hélice possível no projeto. Com este diâmetro estabelecido, obtém-se a rotação de projeto do hélice e a sua correspondente eficiência do diagrama de série sistemática.

Quanto à eficiência relativa rotativa (e_{rr}), é a relação entre a eficiência do hélice operando na popa do navio e a eficiência do hélice no ensaio de água aberta.

$$e_{rr} = \eta_{prop} / \eta_{po} \quad (3.7)$$

Sobre a eficiência de transmissão (e_t), sabe-se que instalações Diesel de acoplamento direto têm maior eficiência de transmissão e pode-se adotar um valor de 0,99. As instalações com redução têm eficiência em torno de 0,97.

Com relação à eficiência do casco (e_h), sabe-se que este fator representa, na verdade, os efeitos de interação casco-hélice. Um destes efeitos é o aumento de resistência do casco, devido à operação do hélice. O outro é a redução de velocidade relativa água/hélice devido à presença do casco. Este parâmetro representa a relação entre a potência efetiva e a potência fornecida pelo hélice, e pode ser expresso por:

$$e_h = (1-t) / (1-w) \quad (3.8)$$

onde:

(t) é o coeficiente de redução do empuxo.

(w) é o coeficiente de esteira.

O roteiro de projeto tradicional de uma instalação propulsora consiste na conjugação de todos os fatores considerados acima, visando integrar a melhor solução casco-hélice-máquina. Ou seja, procura-se aquela alternativa que atenda aos requisitos de projeto com a melhor eficiência no ponto de operação considerado.

Uma vez definida a máquina, o fabricante informa o consumo específico de combustível (cec). É um dos itens de maior importância nas comparações entre instalações propulsoras, pois exprime a quantidade de combustível requerida para produzir uma unidade de potência por unidade de tempo.

A Figura 3-1 apresenta um esquema dos elementos envolvidos no projeto da instalação propulsora de um navio e os diferentes aspectos que devem ser considerados no processo. Como resultado, determina-se a massa total de

combustível (MT_{comb}) requerida para propulsão do navio. Este parâmetro pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$MT_{comb} = Pot_m \cdot (cec) \cdot NH \quad (3.9)$$

onde:

Pot_m é a potência fornecida pela máquina;

NH é o número de horas de operação.

Figura 3-1 – Diagrama de blocos para a determinação da massa total de combustível

Em um projeto tradicional de instalação propulsora, para se manter o navio em velocidade constante, o hélice deve fornecer um empuxo (força propulsora) igual à resistência “aumentada” do casco. Nestas mesmas condições, a potência absorvida pelo hélice deve ser igual à potência fornecida pela máquina menos a potência perdida na transmissão. Estas relações decorrem da aplicação das leis de Newton ao movimento do navio. A Figura 3-2 ilustra estas relações:

Figura 3-2 – Integração Casco-Hélice-Máquina – Sistema convencional

Quando se pensa em usar outras fontes de energia, deve-se pensar, portanto, em incorporar algum mecanismo que forneça um empuxo adicional, de modo que o hélice possa fornecer uma menor força propulsora ou e que forneça uma potência adicional ao eixo. Em ambos os casos o hélice vai demandar menor potência da máquina e, em consequência, há uma redução do consumo de energia. Este raciocínio está esquematizado na Figura 3-3. Por exemplo, um empuxo adicional (T_1) pode ser obtido com propulsão assistida por energia eólica. A mesma figura também ilustra o caso de uma potência adicionada ao hélice (P_{ad}) oriunda de sistemas de recuperação ou outros dispositivos auxiliares, como por exemplo células de combustível, combustível alternativo.

Figura 3-3 – Integração Casco-Hélice-Máquina - Suplementação de força propulsora ou potência

A redução de potência do motor pode também ser obtida com uma variedade de alterações no projeto do navio, envolvendo linhas do casco, propulsor e máquina principal. Nas seções seguintes serão analisadas as diversas alternativas.

3.2 Alternativas para redução da resistência ao avanço

Os fatores que minimizam a resistência ao avanço, conforme Brinati (2009) devem ser tratados durante o projeto do navio, pois são ligados às premissas básicas do armador referentes à velocidade, deslocamento e forma do casco.

Esses fatores devem ser re-analisados quando houver alguma mudança significativa, sempre que algum dos requisitos iniciais não seja mais necessário para um novo serviço ou rota do navio. Pode-se citar, por exemplo, alguma mudança básica, como a diminuição de deslocamento ou da velocidade. Outra situação ocorre quando alguma oportunidade tecnológica se implantada na geometria do navio possa reduzir a resistência, que também conduz à redução do consumo de energia.

O caso de redução de velocidade, uma tendência presente segundo Padovezzi et al. (2009), pode ocasionar uma sensível diminuição de consumo. Podem ser necessárias outras mudanças para adequar a máquina e propulsor, mas que podem ser feitas com vantagem e economia sempre que validadas por um estudo de viabilidade técnica e econômica.

Conforme cita Woodyard (2008) um cálculo simples demonstra que um navio porta contêineres dimensionado para uma velocidade de 25 nós requer potência de 70 MW, mas uma redução na velocidade para 20 nós necessitaria apenas 50% da potência. Como a viagem será prolongada com a redução de velocidade, a redução de consumo de combustível será um pouco menor, mas ainda em cerca de 40%.

Para O'Rourke (2006) uma proa bulbosa em substituição a uma proa convencional pode reduzir em até 5% a energia requerida pelo navio na velocidade de cruzeiro [caso particular de um navio militar tomado como exemplo].

Um exemplo inovador foi reportado por David Tinsley (2009), conforme Figura 3-4. Trata-se de um navio tipo porta contêineres de 1.800 TEU na linha européia. Trata-se de um casco principal tipo proa afunilada e alongada, com um apêndice do lado de bombordo, com melhor resultado quando comparado com

trimarans. Testes na rota Helsinki-Rotterdam indicaram economia de combustível de 21% em relação a um porta contêineres convencional.

Figura 3-4 - Navio com casco afunilado com apêndice lateral – fonte: Wärtsila

Outra proposta inovadora é a instalação de um flap de popa, conforme Figura 3-5. Trata-se de uma chapa relativamente pequena que se estende atrás da parte de ré do navio, aumentando o comprimento e alinhando a superfície do fundo do casco. Um flap de ré altera o fluxo da água de maneira a reduzir a resistência ao avanço do navio.

Figura 3-5 - Ilustração de flap de popa (O`ROURKE, 2006)

De acordo com O`Rourke (2006) os resultados de testes com flaps de popa nas embarcações DDG-51 mostraram economia de combustível de 6 a 7,5%. Nota-se que os valores apresentados são relativamente altos e promissores.

Outro exemplo de aletas de popa, conforme Figura 3-6, é apresentado pela Hynduai Heavy Industries, que equipou navios porta contêineres de 8.600 TEU, da armadora alemã Hapag-Loyd, com estes dispositivos em navios. A Hyundai reporta em HHI (2011) resultados comprovados em provas de mar, de economia de combustível de até 5% com este dispositivo.

Figura 3-6 – Aleta ou flap de popa. Fonte: HHI - Coreia

O aumento de rugosidade do casco do navio, decorrente de incrustações e de avarias do chapeamento durante a operação, é uma grande causa de aumento de resistência ao avanço. Há, em consequência, um aumento na energia consumida para que o navio mantenha a velocidade de serviço ao longo de sua vida útil, como demonstrado pelos estudos de R. Towsin, et al. (1981) e por M. Kresic, et al. (1983). Estes resultados foram recentemente confirmados por inúmeros outros estudos de fabricantes de tintas e revestimentos, universidades e demais instituições – H. Brinati (2009).

Como exemplo, o fabricante holandês PPG (2009) anuncia melhoria de economia de combustível entre 2,5 e 5% para dois de seus principais procedimentos: SylAdvance 800 anti-incrustante. Os resultados foram demonstrados em testes com 37 navios. Este desempenho foi endossado pela empresa V.Ships, em seu navio CSCL Quingdao, que obteve economia de 2,5% com o SA800.

Conforme anunciado por Nippon Paint (2009) foi desenvolvido um procedimento Chamado “LF-Sea” em cooperação com a Universidade de Osaka para redução da rugosidade do casco de navios. O procedimento consiste na aplicação de uma camada de revestimento que simula a pele elástica e suave de golfinhos e atuns, que são cobertos com uma mucosa para reduzir sua resistência à fricção. As concavidades do filme de pintura são preenchidas com água e criam uma superfície plana. A redução da resistência e redução de consumo de óleo combustível é de 4%, de acordo com estatísticas próprias do fabricante. Como vantagem adicional o procedimento é simples como pintura convencional e não requer jateamento completo do substrato.

Outro exemplo, citado por Tintas Internacional (2009) refere-se ao revestimento anti-incrustante “Intersleek 900”. Os resultados dos testes realizados em 2007 com o navio Prem Pride indicaram redução de consumo de combustível de 6%. Testes adicionais, com monitoramento no navio Prem Divya, confirmaram reduções de 9%.

3.3 Alternativas para aumento do coeficiente propulsivo

O coeficiente propulsivo é função da eficiência do propulsor, da eficiência rotativa relativa, da eficiência de transmissão e da eficiência do casco, conforme visto na equação 3.5. Serão examinadas, a seguir, alternativas de projeto ou manutenção que contribuam para aumentar, ou evitar a redução, de cada uma destas parcelas.

3.3.1 Aumento da eficiência do propulsor

A condição das superfícies do propulsor é relevante na economia de combustível. As incrustações e alta rugosidade diminuem a eficiência do propulsor. Além das ocasiões de docagens dos navios, que ocorrem a cada quatro ou cinco anos, a limpeza e polimento do propulsor, conforme ilustrado pela Figura 3-6, pode

também ser feita “in-water”, sempre vantajosa em período que anteceda a próxima docagem. Com isto consegue-se reduzir a rugosidade das pás do hélice próximo de seu valor original, mantendo assim a eficiência de projeto.

Figura 3-7 – Polimento subaquático (in-water) de hélice – Fonte: SMC – UK

Outro tratamento possível para a superfície de pás de propulsor é o revestimento com produtos especiais, que conferem as propriedades desejadas de baixíssima rugosidade, repelência à incrustação, e longa durabilidade, semelhantes aos procedimentos para os cascos dos navios. “A marinha americana comprovou que a aplicação de revestimentos nos propulsores do navio pode reduzir o gasto de combustível de 4 a 5%” (O’ROURKE, 2006).

Para ilustração, o fabricante Wärtsilä (2010) apresenta alguns destes fatores considerando aplicação de novas tecnologias e melhorias e indica o potencial de redução de consumo em relação à situação mais convencional.

Na Figura 3-8 apresentam-se alguns exemplos e possibilidades de melhorias na propulsão e os potenciais de melhoria de eficiência correspondentes.

Propulsores contra-rotativos (CRP propellers) – redução de consumo de 10 a 15% para arranjos mono-eixos

Propulsor combinado com leme – aumento de eficiência de 2 a 6%

Seleção avançada de hélice mais eficiente – aumento da eficiência do propulsor em 2%

Bocal com perfil de asa ao redor do propulsor - Até 5% de economia, comparado com o propulsor aberto

Figura 3-8 – Exemplos de melhoria de rendimento para propulsores – Fonte Wärtsilä

Outros fatores que afetam a eficiência propulsiva, e portanto, a eficiência global, são relativos ao arranjo da máquinas. O conceito e aplicação do arranjo de máquinas também dependem do tipo do navio e suas particularidades.

A Figura 3.9 ilustra um exemplo de melhorias relativas ao arranjo de máquinas e os potenciais de incremento de eficiência:

Figura 3-9 - Exemplo-melhoria de rendimento com arranjo Diesel-Elétrico. Fonte Wartsila(2010)

3.4 Alternativas para redução do empuxo do hélice

Conforme mostrado na Figura 3.2, uma das formas de redução do consumo de combustível na instalação propulsora é pela redução do empuxo fornecido pelo hélice para uma dada velocidade do navio. Esta redução se dá, ou pela redução da resistência ao avanço, conforme discutido em 3.2, ou pela geração de uma força propulsora complementar. Em ambos os casos será demandada menor potência do motor principal.

Inclui-se, neste caso, a propulsão auxiliada por energia eólica. De acordo com Clayton (1987) existem diversos arranjos de dispositivos em navios para aproveitamento desta energia. A Figura 3-10 mostra alguns esquemas possíveis; com exceção do arranjo com turbina de vento, todas as alternativas implicam em redução do empuxo do hélice.

Figura 3-10 – Tipos de esquemas para energia eólica para navio – Fonte: (CLAYTON, 1987)

3.4.1 Propulsão assistida por velas

A prática é milenar com aproveitamento da ação dos ventos que incide sobre uma superfície. Dependendo das características geométricas da superfície e de sua orientação em relação ao vento, pode-se obter força resultante favorável para a propulsão total ou parcial do navio. Esses esquemas com velas para serem efetivos precisam estar posicionados bem alto, e com isto causam aumento do jogo da embarcação, redução da estabilidade do navio, penalidade parcial pelo aumento da resistência ao avanço quando a componente do vento não está na mesma direção do destino, e altura elevada para rotas com passagem sob pontes, além de redução da manobrabilidade.

A Figura 3-11 ilustra o navio WindShip, citado por O'Rourke (2006). O desenvolvimento do "Windship" com armações eólicas tipo vela para um navio 50.000 DWT e 200 m de comprimento, indicou que o custo do navio seria acrescido de aproximadamente 10% em relação a um navio convencional. Os resultados mostraram uma economia, em uma região de ventos favoráveis, de cerca de 10-15% do consumo de combustível.

Figura 3-11 - Navios “WindShip” – Fonte: (O’ROURKE, 2006)

3.4.2 Propulsão assistida por “Kites”

Este é um esquema moderno de uso da energia eólica na propulsão de navios. O princípio baseia-se no brinquedo infantil de mesmo nome, o “kite” (ou como chamado no Brasil: pipa ou papagaio, dependendo da região). É um dos dispositivos para aproveitamento eólico muito promissor conforme os experimentos recentes. A principal empresa que tem investido nesta área, no desenvolvimento e testes para escala comercial em navios, é a Sky Sails. A Figura 3-12 ilustra um equipamento desenvolvido pela empresa.

Figura 3-12 – Navio Beluga equipado com kite. Fonte: Sky Sails

O uso de kites para empuxo adicional para os navios possibilita, em essência, um sistema híbrido de propulsão. Conforme Greuell et al. (2010), este sistema é uma inovação que permite que os ventos ajudem a mover os navios cargueiros modernos, diminuindo a potência dos propulsores ou aumentando a velocidade dos navios. Os navios MS BELUGA, THESEUS e MICKAEL A são os primeiros navios mercantes que foram equipados com este sistema. O sistema de lançamento do kite é automático e há auxílio de computador de bordo para assistir no lançamento e operação do dispositivo. Reporta-se economia de combustível de até 30%.

Conforme estudado por Silvanius (2009), os kites [como os demais dispositivos] atuam nos navios de vários modos e em várias direções conforme indicado na Figura 3-13. Eles se beneficiam da vantagem da magnitude e estabilidade de ventos em maiores alturas acima do nível do mar, e permitem a utilização de uma maior área no dispositivo, que não seriam possíveis na altura do navio.

Figura 3-13 – Diagrama de forças para navio equipado com kite. Fonte: (SILVANIUS, 2009)

Um dos problemas e penalidades é que os kites, mesmo no sentido dos ventos favoráveis, causam forças de “lift” no navio, que dependem do ângulo de

reboque em relação à linha d'água, normalmente ajustado para 35° , pois seria inseguro o kite operar mais próximo da água. Essas forças de “lift”, no sentido vertical do eixo Z, alteram o “trim” do navio e penalizam resistência e conseqüentemente aumentam a potência requerida para propulsão do navio. A altura de operação do kite é superior a 100-200 m, onde a velocidade do vento é adequada para produzir o empuxo compatível com o movimento do navio na velocidade de cruzeiro.

3.4.3 Rotores Flettner

Os rotores tipo Flettner são corpos cilíndricos giratórios que aproveitam o efeito Magnus dos ventos. O princípio aerodinâmico é baseado no fato de que um cilindro girante, imerso em uma corrente de fluido, cria uma força perpendicular à direção dessa corrente, ou seja, para o lado que acelera esta corrente de ar. Essa força causa o movimento do navio naquela direção, conforme ilustra a Figura 3-14.

Figura 3-14 – Ilustração do princípio de operação de navios usando rotores Flettner

O navio E-Ship 1, é equipado com 4 rotores Flettner de 27 m de altura e diâmetro de 4m. Foi lançado em 2010 pela empresa alemã Enercon GmbH, tem 130 m de comprimento e 22,5 m de boca, está ilustrado na Figura 3-15.

Figura 3-15 – Navio E-Ship 1 com quatro rotores Flettner. Fonte: Enercon GmbH

Conforme registro online no GL- Germanischer Lloyd (2011), o navio E-Ship 1 é equipado com dois motores elétricos principais de 3,5 MW cada, contando com 6 geradores de propulsão de 1758 kVA cada, e 3 geradores principais de 1300 kVA cada. O navio possui caldeira de recuperação e turbinas que acionam os rotores Flettner. Segundo a Enercon, a instalação permite economia de combustível de 30-40% a uma velocidade de 16 nós.

3.5 Alternativas para redução da potência fornecida pelo motor diesel

Neste grupo enquadram-se diversas formas de recuperação de energia ou emprego de outra fonte energética complementar ao motor principal, que proporcionem a substituição, parcial ou total, da potência fornecida pelo motor diesel. Em uma concepção mais abrangente, essa energia adicionada pode ser usada diretamente no eixo propulsor ou substituir outras demandas energéticas da instalação propulsora ou dos demais sistemas que consomem energia no navio.

Nesta categoria enquadram-se os sistemas de recuperação de energia térmica do motor diesel e as aplicações de novas fontes em paralelo, como células

de combustível, energia eólica (sem causar empuxo direto, como é o caso de turbinas de vento com geradores elétricos), e energia solar.

3.5.1 Sistemas de recuperação de energia térmica do MCP

Aqui se enquadram os sistemas de recuperação do MCP como os exemplos já descritos na seção 2.3, nos quais existe recuperação de energia térmica.

3.5.2 Células de combustível

As células de combustível são reatores de estado estacionário que, em princípio, funcionam como uma bateria. Como fundamentado por Rose (2009) a diferença em relação a uma bateria, é que uma célula de combustível não se extingue nem necessita recarga. Produzirá energia em forma de eletricidade e calor enquanto for abastecida de combustível e oxigênio do ar. Uma célula de combustível, ilustrada na Figura 3-16, consiste em dois eletrodos, localizados em cada lado de um eletrólito. O oxigênio passa por um eletrodo e o hidrogênio pelo outro, gerando eletricidade, água e calor.

Figura 3-16 – Esquema básico da célula de combustível. Fonte: (worldwide.fuelcells.org)

O combustível hidrogênio entra pelo ânodo da célula de combustível. O oxigênio (do ar) entra na célula pelo cátodo. Estimulado por um catalisador, o átomo de hidrogênio se separa em um próton e em um elétron, os quais tomam diferentes caminhos até o cátodo. O próton passa através do eletrólito. Os elétrons criam uma corrente separada que pode ser utilizada antes que regressem ao cátodo, para reunir-se novamente com o hidrogênio e o oxigênio em uma molécula de água.

Um sistema de célula de combustível que inclui um “reformador de combustível” pode usar o hidrogênio contido em qualquer hidrocarboneto – desde o gás natural até o metanol, e inclusive a gasolina. Já que a célula de combustível não depende da combustão, as emissões de um sistema deste tipo são muito menores que os processos de combustão de combustíveis mais limpos. “As emissões de células de combustível são dez vezes mais baixas que os rígidos padrões de emissão aceitos no estado da Califórnia” (BASU, 2007).

Os tipos de células disponíveis aumentam a cada dia, devido à grande corrida entre os investidores nesta tecnologia, com o aparecimento de células com potência cada vez maior e com menor custo. Os tipos disponíveis são os seguintes: Célula de Combustível de Ácido Fosfórico (PA ou PAFC), Membrana de Troca Protônica (PEM), Carbonatos Fundidos (MC ou MCFC), Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC), Célula Alcalina, Células de Combustível de Metanol Direto (DMFC), Células de Combustível Regenerativas, Células de Combustível de Zinco-Ar (ZAFC), Células de Combustível de Cerâmica Protônica (PCFC).

No setor marítimo, a aplicação de células de combustível está apenas começando, é ainda embrionária, pois não há de fato nenhuma instalação de propulsão ou mesmo auxiliar de grande porte disponível até o momento. Mas é a promessa de solução para o futuro no médio prazo, quando a tecnologia estiver mais madura e com custos mais assimiláveis para instalações de grande porte.

As potências requeridas na propulsão dos navios são muito superiores aos demais meios de transporte, como o automóvel e outros meios de transporte urbano de massa, que podem ser atendidos prioritariamente com investimentos menores. As células de combustível têm um mercado potencial para inúmeras aplicações populares de artigos de consumo de pequeno tamanho e popularidade,

que pode representar um retorno muito grande de curto prazo (como a aplicação de micro-células de combustível, por exemplo, para notebooks).

Pelo estágio de desenvolvimento, disponibilidade e preço desta fonte inovadora e não poluente, percebe-se aplicação atual apenas em embarcações menores, ainda limitadas pelo tamanho e preço. Os tipos de células utilizadas na área naval até o momento são SOFC e PEM. “O custo comparativo em 2008 era de: 2000 Euros/kW para geradores diesel, e 4500 Euros/kW para células de combustível” (SVENSEN, 2008).

O setor militar de países desenvolvidos tem investido fortemente na nova tecnologia e com certeza vai catalisar o seu barateamento. A marinha norte-americana tem avançado neste setor. “A tecnologia de células de combustível, se desenvolvida com sucesso para aplicação nos planos da marinha americana, pode reduzir substancialmente o consumo de combustível gerando eletricidade de uma maneira muito mais eficiente do que jamais foi possível através dos processos de combustão” (O’ROURKE, 2006).

A figura 3-17 mostra um comparativo de eficiências entre vários sistemas para produção de eletricidade e células de combustível.

Figura 3-17 – Eficiências de Usinas de Geração de Eletricidade (O’ROURKE, 2006)

Outras vantagens potenciais das células de combustível incluem a redução de custos de manutenção, de gases nocivos, da assinatura de localização dos navios, da assinatura acústica, do visual no radar devido à redução da pluma das chaminés. Podem permitir maior autonomia devido à diminuição do consumo, além de grande flexibilidade do projeto do navio.

Há forte interesse da Europa, Japão e Estados Unidos em desenvolver a tecnologia de células de combustíveis para navios, para propulsão e potência auxiliar. Na Europa, o programa de implantação de tecnologia de célula de combustível já foi incorporado nos submarinos com propulsão não nuclear, como o submarino alemão 212, e também está começando a ser utilizado nos meios civis.

Como publicado na MER (2007), a Wärtsilä lançou seu protótipo de célula de combustível de óxido sólido (SOFC – *solid oxide fuel cell*) de 20 kWe, ilustrada pela Figura 3-18. Houve o lançamento das primeiras unidades comerciais entre 20 e 80 kW em 2007, e agora para a faixa de 50 a 250 kW em 2010. As células operam alimentadas por gás natural, bio-gás ou metanol, e já existe pesquisa para utilização de óleo diesel de baixo teor de enxofre.

Figura 3-18 – Célula de combustível SOFC (WÄRTSILA)

Vários submarinos (alemães, italianos, gregos, coreanos dentre outros) já usam células de combustíveis em paralelo com as máquinas convencionais. Foram introduzidos sistemas de propulsão a ar independente, movidos com células de combustíveis, para uso excepcional em velocidade lenta e sem ruído. As vantagens são: alta eficiência e baixo consumo com baixíssima assinatura de calor e ruído.

Os submarinos da marinha alemã e italiana usam propulsão convencional por um gerador diesel e uma propulsão independente a ar utilizada para cruzeiro silencioso e em baixa velocidade. O sistema consiste de nove células tipo PEM provendo entre 30 kW e 50 kW cada. Para velocidades mais altas, o sistema é acoplado com uma a bateria que é carregada pelo motor diesel MTU 16V-396, conforme citado em MER (2007).

Conforme publicado em MER (2008), a primeira embarcação com propulsão com células de combustível foi o navio ZemShip para 100 passageiros, com comprimento de 25 m e boca de 5 m. O ZemShip opera no lago Alster no porto de Hamburgo – Alemanha, e tem propulsão híbrida, constituída por duas unidades de células de combustível tipo PEM da Proton com 48 kW/cada e uma bateria de chumbo/gel para oferecer duas vezes mais eficiência que um navio padrão com propulsão diesel; a Figura 3-19 ilustra esse esquema. O combustível é hidrogênio, com autonomia para três dias. O projeto custou de 2,4 milhões de euros.

Figura 3-19 – Esquema do sistema híbrido do navio ZemShip

Outro exemplo de aplicação em 2009 é o navio de apoio offshore Viking Lady, mostrado na Figura 3-20. O navio dispõe de célula de combustível de 320 kW, que é usada como um gerador elétrico integrado em seu sistema elétrico auxiliar, conforme MARITIME JOURNAL (2009). Este projeto de pesquisa pioneiro foi batizado como FellowSHIP e está sendo gerenciado pelo DNV, com apoio dos governos da Noruega e da Alemanha, tendo como parceiros empresariais: Wärtsilä, Eidesvik, NO_x e SO_x e MTU GmbH.

Figura 3-20 – Navio Viking Lady equipado com célula de combustível (MARITIME JOURNAL)

3.5.3 Energia eólica

Nesta categoria, diferente das velas, “kites” e rotores Flettner, classificam-se os geradores eólicos que permitem a utilização da energia eólica, mas necessitam convertê-la em energia elétrica para aproveitamento prático na propulsão ou sistemas auxiliares do navio.

Geradores eólicos, também chamados de turbinas de vento, têm sido muito usados em aplicações terrestres e oceânicas, em regiões de ventos fortes. Nos navios, podem ser montados no sentido vertical e a armação pode girar para atender ao sentido predominante dos ventos, ou no sentido horizontal e nesse caso podem atender aos ventos de qualquer direção sem ter que girar a armação. O tipo de montagem vertical é mais silencioso e eficiente, por esta razão é o tipo mais comumente instalado.

3.5.4 Energia Solar

A utilização da energia do sol é a grande alternativa do futuro, sendo um recurso praticamente inesgotável. As duas formas principais de captação desse tipo de energia são: energia solar foto-térmica através dos coletores solares, e energia solar fotovoltaica através de células fotovoltaicas que convertem a luz em

eletricidade. Qualquer que seja a forma de captação, a área dos coletores e células é o requisito fundamental para o aproveitamento deste recurso.

O rendimento de conversão para uma condição ideal de irradiação de pico de 1000 W/m^2 é muito pobre, podendo ser aproveitado apenas cerca de 10% deste valor. Portanto, mesmo considerando a área total de um navio de grande porte e condição de pico, essa instalação produz uma potência baixa.

Além disso, o aproveitamento da energia solar é variável e depende principalmente da variação das condições climáticas e alternância do dia e da noite. Mas como esse recurso está disponível na natureza a custo zero, pode e deve ser usado como sistema complementar de suprimento de energia nos navios. Os navios, dependendo do tipo, podem acomodar estes coletores e células, para sua melhor adequação. Por exemplo, um navio graneleiro ou do tipo “ro-ro” pode acomodar muito mais células do que um navio tipo porta contêineres.

Na Figura 3-21 é apresentado o exemplo de um Trimarã Solar, construído pela empresa Solar Sailor (2010) para emissão zero de poluentes. A embarcação tem comprimento de 37 m e capacidade para 600 pessoas, e velocidade até 6 nós usando apenas energia solar. Há outros projetos com propulsão híbrida.

Figura 3-21 – Trimarã solar. Fonte: Solar Sailor

3.5.5 Projetos para o futuro

A empresa de navegação Japonesa NYK anuncia o projeto para um navio baseado nas maiores eficiências e em harmonia com o meio ambiente. Trata-se de um navio porta contêineres, batizado de Super Eco Ship 2030, ilustrado pela Figura 3-22, para carregar 8.000 TEU e consumirá 40.000 kW de potência principal, como mencionado por TINSLEY (2009). Atualmente para a capacidade de 8.000 TEU a potência requerida para os navios convencionais é de 64 MW, portanto 24 MW a mais do que o Super Eco, que terá potência requerida menor pela inovação de utilizar materiais bem mais leves e geometria que vai reduzir consideravelmente a resistência ao avanço do navio.

Figura 3-22 – Maquete do navio EcoShip 2030 – Fonte: NYK

A potência principal desse navio será provida por uma instalação de células de combustível, usando gás natural liquefeito como matéria prima. Além disso, energia adicional alternativa e complementar será produzida no navio, usando fonte eólica, por meio de velas múltiplas, obtendo de 1.000 a 3.000 kW e solar, com células solares produzindo 2.000 kW. No site da NYK há uma previsão para as próximas décadas, com um cronograma de implantação, conforme Figura 3-23.

Figura 3-23 – “Cronograma de implantação de células de combustível” – Fonte NYK

3.6 Combustíveis alternativos aos hidrocarbonetos de petróleo

Uma segunda estratégia da redução da dependência de combustível de origem fóssil é a utilização de combustíveis alternativos e mais limpos conforme Galvão et al. (2004).

Os combustíveis alternativos renováveis para a substituição do óleo diesel e óleo pesado de origem fóssil queimados hoje nos navios seriam: etanol, biodiesel, biogás, óleos vegetais ou minerais, combustíveis sintéticos, e o hidrogênio.

O uso do etanol para embarcações poderia ser uma solução, mas devido à preferência de consumo mais nobre nos centros urbanos ou para mistura da gasolina, essa aplicação ficaria restrita para casos particulares de embarcações de transporte de Etanol e suas máquinas devem ser adequadas para este combustível (motores de ignição por faísca). Há ainda restrições de segurança no uso do etanol para embarcações devido seu baixo ponto de fulgor e maior risco de incêndio.

O biodiesel é o substituto ideal do diesel e óleos pesados, mas devido a sua pequena produção atual fica muito restrito seu uso em embarcações. Poderia

ser usado em embarcações de transporte de biodiesel que podem otimizar o armazenamento da carga e do combustível.

Os óleos, vegetais e minerais, e combustíveis sintéticos despontam como alternativas promissoras no longo prazo, quando da viabilização em escala comercial destas soluções. Muitos estudos e pesquisas atuais para óleos especiais, e combustíveis sintéticos devem resultar em uma contribuição na matriz de solução do problema, por menor que seja. O futuro dirá, mas no médio prazo, várias destas alternativas poderão ser adequadas para uso em embarcações que tenham rota ou ligação comercial específica nos pontos geográficos da produção desses combustíveis.

O hidrogênio que é um importante vetor energético pode também ser usado como combustível com emissões muito baixas. Mas o armazenamento, além do custo de produção, é seu maior problema devido à baixa densidade energética, conforme Goldemberg et al. (2008). Será viável nas embarcações somente na forma comprimida, liquefeita ou na forma de hidretos metálicos. Entretanto, nota-se que células de combustível a base de hidrogênio também estão em desenvolvimento e esta solução é muito melhor do que a queima do hidrogênio.

3.7 Comentários

Nesta seção apresenta-se um resumo da avaliação das alternativas de novas fontes de energia para propulsão de navios que, direta ou indiretamente, sejam mais promissoras e recomendadas para tipos específicos de navio.

- Energia solar: adequada para navios graneleiros principalmente, para navios tanque com algumas restrições devido à segurança e acesso para tubulações/manutenção, e para navios tipo Ro-Ro de carga e de passageiros. Não se aplica a navios porta contêineres.
- Células de combustível e propulsão com motor elétrico: para todos os tipos de navios, será a mais promissora tecnologia do futuro. A

tendência natural é que sejam aplicadas em embarcações menores, na sequência de médio porte, e num futuro mais distante alcance os navios de grande porte

- Energia eólica com kites: aplicável a todo tipo de navio de grande porte e em rota longa e com ventos favoráveis.
- Energia eólica com Velas ou Rotor Flettner: graneleiro, tanque, e Ro-Ro de carga. Não se aplica a navios porta contêineres.
- Combustíveis alternativos: adequados para navios e embarcações que tenham uma relação direta ou geográfica com o tipo de combustível especial considerado. Exemplo: Gás para navios de transporte gás.

4 FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS

4.1 Considerações iniciais

Neste trabalho serão aplicadas as análises de energia e exergia para avaliação de eficiência dos sistemas de propulsão e auxiliares de navios. Essas análises dependem basicamente da observação dos balanços de energia e exergia, onde os insumos principais são o combustível e os recursos naturais (água, ar) quando utilizados para o sistema de propulsão (principal consumidor dos insumos energéticos) e para as máquinas e sistemas auxiliares do navio.

Deve-se observar que, além da propulsão, há outras demandas de energia a bordo, como energia elétrica para funcionamento dos demais equipamentos dos sistemas auxiliares do navio, bem como vapor ou fluido térmico para os requisitos de aquecimento. Estão incluídos nesta relação, o consumo de energia destinado aos setores de acomodações e hotelaria, armazenamento (por vezes com alto consumo de energia como é o caso de cargas frigoríficas), assim como o de movimentação de carga, e finalmente para área de instrumentos e sistemas de navegação e comunicações (apesar desse valor ser desprezível em comparação aos demais consumidores).

Foi feita uma pesquisa na literatura técnica para identificação das abordagens empregadas para avaliação do desempenho termodinâmico de instalações propulsoras marítimas, em particular sobre o uso de análise exergética. Constatou-se que há poucos trabalhos sobre o tema; há apenas trabalhos isolados para esta ou aquela inovação tecnológica. A referência acadêmica encontrada mais próxima ao estudo de interesse foi feita por Sugita et al. (2005) referente a uma avaliação termodinâmica (original em Japonês) executada para o motor principal e sistemas auxiliares do navio “Fukae-Marú”. Trata-se de um pequeno navio da Universidade de Kobe no Japão. Para este navio foram realizadas análises energética e exergética do sistema de propulsão do navio.

Observa-se, por outro lado, um número crescente de publicações com uso de análise exergética para algumas aplicações específicas. Por exemplo, a aplicação de células de combustível em sistemas auxiliares de submarinos e de navios. Frangopoulos et al. (2005), desenvolveram um modelo termodinâmico para otimização de projeto, usando análise exergética para um sistema de células de combustível tipo PEM, para atender a demanda elétrica de um navio de cargas frigoríficas. Na Espanha, Leo et al. (2008) desenvolveram um trabalho com análise exergética para aplicação de células tipo PEM alimentadas por metanol, para aplicação em navios e submarinos.

Como mencionado anteriormente, deve-se considerar em navios, dependendo de cada propósito e projeto, muitos outros usos de energia além da propulsão. Por exemplo, energia com fins específicos, seja para aquecimento e refrigeração, elétrica para diversas finalidades de carga, eletromagnéticas em casos de armas de navios militares, dentre outras.

Em cada caso, é necessário um estudo específico e, principalmente para os processos e equipamentos que envolvam o uso da energia térmica, as limitações de conversão das formas de energia devem ser consideradas.

Convém observar que existe, em geral, um ou mais passos nas conversões de energia a bordo para atender a demanda de um determinado uso final. É importante efetuar uma avaliação das diferentes alternativas de atendimento para cada consumidor.

Na figura 4-1 apresentam-se os rendimentos de diversos equipamentos, cujos princípios de operação estão associados a processos de conversão de energia (OLIVEIRA JUNIOR, 2009 *apud* MOORE, 1981).

É interessante perceber as limitações de conversão de energia envolvidas com o emprego destes equipamentos. É interessante também notar que a eficiência de conversão se reduz mais fortemente nas conversões limitadas pela segunda lei da termodinâmica, nos casos em que se requer conversão de energia mais desordenada (interna, calor, química) em energia cinética ou potencial.

Figura 4-1 - Rendimentos de processos e equipamentos (OLIVEIRA JUNIOR, 2009 *apud* MOORE, 1981)

A análise termodinâmica para os sistemas convencionais de propulsão de navios muito se assemelha ao estudo de uma usina de geração de energia elétrica. A diferença fundamental é que a usina é fixa e o navio é móvel, além da própria finalidade, que é distinta para as duas instalações.

A central de energia objetiva aproveitar o trabalho produzido para geração de energia elétrica para usos diversos em uma localidade. No caso do navio, o objetivo fundamental da instalação é fornecer a potência requerida ao eixo propulsor para atender a velocidade de serviço da embarcação; pode, eventualmente, também gerar energia elétrica complementar para os consumidores internos do navio. Mas os equipamentos, processos termodinâmicos e instalações envolvidas são muito

semelhantes.

Quando comparada com a análise energética, a análise exergética apresenta a vantagem de permitir visualizar as irreversibilidades dos processos. Apresenta-se na Figura 4.2 o exemplo clássico citado por Wall (1977) sobre essa diferença. Nota-se que a perda real da maior irreversibilidade desse processo térmico ocorre na caldeira, e não no condensador.

Figura 4-2 - Diferença entre diagramas de fluxo energético x exergético. (WALL, 1977)

A crescente preocupação da comunidade internacional com as questões ambientais tem estimulado a realização de pesquisas sobre o emprego de energias alternativas para substituição de combustível fóssil, não só para navios, como também para fontes estacionárias. Entre estas alternativas incluem-se: combustíveis alternativos, energia eólica, energia solar, e células de combustível, como já apresentado no Capítulo 3.

Vários outros pesquisadores têm também manifestado que os estudos e quantificações de impactos ambientais e questões ecológicas podem ser melhor e apropriadamente analisados, usando o conceito de exergia. Destaca-se dentre

outros, além de vários trabalhos para outros processos, o de Dincer et al. (2007), que apresenta também fundamentos e trabalhos conceituais para análises de exergia de fontes de energia renováveis.

4.2 Energia e Balanço Energético

Pela Primeira Lei da Termodinâmica (PLT) ou Lei da Conservação da Energia, todo tipo de energia pode ser convertida em outro tipo de energia, mas não pode ser criada nem destruída.

PLT para um ciclo:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (4.1)$$

PLT para um processo:

$$\delta Q - \delta W = dE \quad (4.2)$$

PLT para um sistema:

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + \frac{m(V_2^2 - V_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) + {}_1W_2 \quad (4.3)$$

Para avaliação dos balanços energéticos nos navios a PLT é, normalmente, aplicada para um volume de controle (V.C.), seja para o navio como um todo ou para cada sistema isolado, na seguinte forma:

$$Q_{v.c.} + \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g \right) = \frac{dE_{v.c.}}{dt} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + Z_s g \right) + W_{v.c.} \quad (4.4)$$

4.3 Exergia e perdas exergéticas

A Figura 4.3 apresenta um exemplo comparativo entre duas usinas para produção de energia elétrica, uma a partir de energia hidráulica e outra a partir de energia térmica. O exemplo ilustra a descoberta de Carnot em 1824, conforme Szargut (2005). No caso do sistema hidráulico (desprezando as perdas por atrito mecânico e viscoso), a energia potencial do reservatório elevado pode ser convertida totalmente em trabalho. Mas a usina térmica pode converter apenas parte do calor da fonte quente em trabalho (mesmo sem considerar nenhuma perda).

Figura 4-3 - Diferença entre usina hidroelétrica e termoeleétrica

E a Lei de Carnot pode ser expressa para a usina térmica:

$$W = Q \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (4.5)$$

A fonte quente pode ser melhor aproveitada, se um poço natural (“livre” e quase ilimitado) puder ser utilizado. O ambiente natural representa este poço ou fonte de calor. Portanto, a “qualidade” do calor não é constante, e depende das temperaturas absolutas da fonte quente e do ambiente natural. Chamando de T a temperatura absoluta da fonte quente e de T_0 a temperatura absoluta do ambiente, pode-se expressar o máximo trabalho que poderia ser realizado entre os dois reservatórios de calor como:

$$W_{max} = Q \frac{T - T_0}{T} \quad (4.6)$$

Na equação acima, válida para representar o máximo trabalho ideal para sistemas reversíveis, o fator $\theta = (T - T_0 / T)$ é conhecido como Fator de Carnot, e caracteriza a “qualidade” do calor da fonte em temperatura constante. Mas, pela 2ª Lei da Termodinâmica, todos os processos reais são irreversíveis, então nos processos reais a quantidade máxima de trabalho realizado será sempre menor que aquele resultante da Eq. (4.6)

É nesta linha que a habilidade de realizar trabalho mecânico tem sido aceita como medida de qualidade de várias formas de energia. Isso caracteriza, de fato, a sua habilidade de se transformar em outras formas de energia e que, para medida de referência, depende do ambiente em que ocorre. Esse índice de qualidade foi chamado pela primeira vez com o termo “Exergia” por Z. Rant em 1956 (SZARGUT, 2005).

Exergia de um sistema é definida como o máximo trabalho que pode ser realizado pelo sistema quando este evolui, por meio de processos reversíveis, do estado em que se encontra até um estado em que estiver em equilíbrio termodinâmico com o meio ambiente, interagindo apenas com o meio ambiente (OLIVEIRA JUNIOR, 2009).

Um processo reversível para um sistema é definido como aquele que, tendo ocorrido, pode ser invertido sem deixar vestígios no sistema e no meio (VAN WYLEN, et al., 1976).

Sabe-se, porém, que há várias causas de irreversibilidades nos processos reais. Todas elas são consumidoras ou destruidoras de exergia, pois degradam a qualidade daquela fonte de energia [degrada sua habilidade de realizar trabalho = exergia] antes de produzir aquele efeito. Algumas delas estão listadas abaixo, conforme Bejan et al. (1996):

- Troca de calor através de diferença de temperatura finita
- Expansão de gás ou líquido para uma pressão menor
- Reações químicas
- Misturas de materiais de diferentes composições e estados
- Atrito fluido ou mecânico
- Fluxo de corrente elétrica através de resistor (aquecimento elétrico)

- Magnetização ou polarização com histerese
- Deformação inelástica

Conforme Kotas (1985, rev. 1995), os conceitos de reversibilidade e irreversibilidade, que são importantes em termodinâmica, são cruciais na Análise Exergética. Um processo reversível é uma idealização que não pode ser realizada completamente, mas conceitualmente é muito útil porque pode ser descrito mais facilmente em termos matemáticos do que um processo irreversível. Além disso, ele pode ser usado, de maneira conveniente, como um padrão de perfeição para que os processos reais sejam avaliados

A análise exergética é, basicamente, uma ferramenta de projeto e avaliação cujo ponto central e objetivo fundamental é localizar e identificar as irreversibilidades para tentar eliminá-las ou minimizá-las.

É claro que fatores econômicos sempre vão estar presentes e são determinantes nesse dilema, pois um grau de irreversibilidade só pode ser admitido em um processo por questões econômicas, caso contrário seria um erro técnico. Essa então é a função principal de engenharia de processos térmicos: reconhecer e avaliar estas irreversibilidades e desenvolver uma maneira efetiva e econômica (salvo algum outro requisito ambiental mandatório) para otimizar o processo.

4.4 Análise Energética x Análise Exergética

A análise energética é fundamentada na Primeira Lei da Termodinâmica, PLT, que postula que a energia pode variar de forma, mas não pode ser criada e nem destruída. Essa análise é uma ferramenta que, à luz do balanço de energia, possibilita conhecer as informações do processo e analisar a conversão da energia e as perdas de calor.

Para Dincer et al. (2007), uma das limitações da análise energética isolada, é a falta de informação disponível sobre a degradação de energia [e identificação de irreversibilidades] nos processos; tampouco fornece informação sobre a quantidade de “utilidade” ou a “qualidade” desse calor no fluxo de saída dos

processos, seja como produto seja como resíduo.

Pode existir uma grande diferença de qualidade entre várias formas de energia, mesmo que se apresentem com a mesma quantidade. Como exemplificado por Kotas (1985, rev. 1995), “a capacidade que 100 J de energia elétrica tem de causar efeito em algum processo é muito maior do que 100 J de energia térmica a 1000 K, que por sua vez é muito maior que a mesma quantidade de energia disponível a 400 K”. Mas no balanço energético, as três quantidades são iguais.

E, complementado por Dincer et al. (2007), o método de exergia supera as limitações da análise baseada na Primeira Lei (da análise energética). Isso porque o conceito de exergia é baseado na aplicação conjunta da 1ª e 2ª leis da termodinâmica. A análise exergética pode indicar claramente a localização das degradações de energia num processo e pode guiar o projetista na melhoria do processo ou tecnologia, como pode também identificar a quantidade e qualidade de perdas de calor em uma corrente ou processo. As diferenças das duas abordagens são ilustradas na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Comparações entre energia e exergia – fonte: (DINCER, et al., 2007)

ENERGIA	EXERGIA
Depende das propriedades da matéria ou fluxo de energia, e independe do meio ambiente	Depende das propriedades de ambos: matéria ou fluxo, e também do meio ambiente
Tem valores diferentes de zero quando em equilíbrio com o meio ambiente	Tem valor igual a zero quando no chamado “estado morto” por estar em completo equilíbrio com o meio ambiente
É conservada para todos os processos; baseado na 1ª Lei da Termodinâmica	É conservada para processos reversíveis e não é conservada para processos reais (onde é parcial ou completamente destruída devido as irreversibilidades), baseado na 2ª Lei da Termodinâmica
Não pode ser produzida nem destruída	Não pode ser produzida nem destruída em um processo reversível, mas é sempre destruída em um processo irreversível
Aparece em várias formas (por ex.: energia cinética, energia potencial, trabalho, calor) e é medida nessa forma	Aparece em várias formas (por ex.: exergia cinética, exergia potencial, trabalho, exergia térmica), e é medida em termos de trabalho ou habilidade de realizar trabalho
E uma medida de quantidade apenas	É uma medida de quantidade e qualidade

Nos processos mais convencionais, onde os efeitos eletromagnéticos, nucleares e de tensão superficial não são comuns, a exergia total de um sistema pode ser dividida em quatro componentes básicos da Figura 4-4: exergia física, cinética, potencial e química (OLIVEIRA JUNIOR, 2009):

Figura 4-4 – Componentes básicos da exergia total

A exergia total, B , pode ser expressa por:

$$B = B_{fis} + B_{cin} + B_{pot} + B_{qui} \quad (4.7)$$

Ou pode ser expressa em base mássica por:

$$b = b_{fis} + b_{cin} + b_{pot} + b_{qui} \quad (4.8)$$

A exergia física corresponde ao máximo trabalho resultante de um sistema ou fluxo ao passar de um estado inicial ao estado de referência restrito; para a exergia física basta que o meio ambiente seja representado pela pressão e temperatura do estado de referência restrito, com $(p_0$ e T_0)

- Para um sistema, a exergia física pode ser representada por:

$$B_f^s = B - B^* + p_0 (V - V^*) - T_0 (S - S^*) \quad (4.9)$$

Ou em base mássica:

$$b_f^s = b - b^* + p_0 (v - v^*) - T_0 (s - s^*) \quad (4.10)$$

- Para um fluxo, a exergia física pode ser representada por:

$$\dot{B}_f = \dot{m} [(h - h^*) - T_0 (s - s^*)] \quad (4.11)$$

Ou em base mássica:

$$b_f = (h - h^*) - T_0 (s - s^*) \quad (4.12)$$

- Para um gás perfeito, admitindo C_p constante, o cálculo da exergia física fica:

$$b_f = C_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + R T_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (4.13)$$

- Para sólidos e líquidos, com a hipótese de calor específico constante, a expressão da energia física fica:

$$b_f = C \left[(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] - v_m (P - P_0) \quad (4.14)$$

onde v_m é o volume específico médio entre p e p_0

Para a determinação da exergia química é necessário definir um modelo de meio ambiente padrão, como proposto por Szargut (2005). Nesse modelo são definidas as seguintes substâncias de referência, para um estado de equilíbrio termomecânico com $T_0 = 298,15 \text{ K}$ e $P_0 = 101,325 \text{ kPa}$ (estado de referência restrito):

- Gases da atmosfera (O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , D_2O , Ar , He , Ne , Kr , Xe)
- Substâncias sólidas de referência da crosta terrestre
- Substâncias iônicas de referência dos mares
- Substâncias de referência, forma molecular, não-ionizáveis dos mares.

A exergia química (b_{qui}) dos combustíveis pode ser estimada em relação a seu poder calorífico inferior (PCI) com expressão do tipo:

$$b_{qui} = \phi \cdot PCI \quad (4.15)$$

onde ϕ pode ser calculado com fórmulas baseadas na composição do combustível. Exemplo: para gás natural ϕ é de 1,04 e para petróleo ϕ é

cerca de 1,08 conforme Oliveira Jr (2009). Para Szargut (2005) este coeficiente b_{qui} / PCI é igual a 1,07 para hidrocarbonetos líquidos.

4.5 Balanços de energia, entropia e exergia

Conforme Mora-Bejarano (2009), a análise exergética é uma ferramenta de avaliação dos processos de conversão de energia, consiste na aplicação conjunta da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica. Ela possibilita uma efetiva análise termodinâmica dos sistemas e processos, pois pode quantificar as irreversibilidades no curso desses processos.

Pode-se recorrer à Figura 4.5 para realizar o balanço de exergia com o emprego combinado da PLT e SLT. Nesta figura, onde está representado um volume de controle genérico, a aplicação seqüencial dos balanços de energia e entropia conduz ao esperado balanço da exergia:

Figura 4-5 - Volume de controle para aplicação dos Balanços de Energia, Entropia, e Exergia

- Balanço de energia (desprezadas energias cinética e potencial):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{H}_s - \dot{H}_e \quad (4.16)$$

- Balanço de entropia:

$$\frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{ger} = \dot{S}_s - \dot{S}_e \quad (4.17)$$

- Balanço de exergia:

É a combinação dos dois balanços, multiplicando-se a equação do balanço de entropia e somando à equação do balanço de energia, onde obtém-se:

$$\dot{H}_s - \dot{H}_e - T_0 (\dot{S}_s - \dot{S}_e) = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - \dot{W} - T_0 \dot{S}_{ger} \quad (4.18)$$

que é o balanço de exergia para o volume de controle considerado, formado pelos termos indicados na Figura 4-6.

(Variação da taxa de exergia entre os fluxos de entrada e saída)
$\dot{H}_s - \dot{H}_e - T_0 (\dot{S}_s - \dot{S}_e)$
=
(Taxa de exergia associada ao calor trocado)
$\dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$
+
(Taxa de exergia pura = trabalho realizado)
$\dot{W}$
-
(Taxa de exergia destruída)
$T_0 \cdot \dot{S}_{ger}$

Figura 4-6 – Demonstração da equação do balanço de exergia – (OLIVEIRA JUNIOR, 2009)

A equação (4.18) do balanço de exergia pode ser considerada como a Lei da degradação da energia, porque denota a quantificação da redução da capacidade de realizar trabalho devido às irreversibilidades durante o processo de conversão de energia.

Portanto, a exergia, que é a capacidade de realizar trabalho, não se conserva e será sempre reduzida, sempre que houver algum processo irreversível

no volume de controle considerado. As perdas de exergia podem ser divididas em: parcela de exergia destruída devido às irreversibilidades do sistema, e a parcela de exergia perdida inerente ao fluxo de material ou energia rejeitada ao meio ambiente.

4.6 Eficiências energética e exergética

As eficiências energéticas e exergéticas são, geralmente, medidas de acordo com as seguintes expressões:

a) Eficiência Energética:

$$\eta_{energ} = \frac{\text{Energia na saída}}{\text{Energia na entrada}} = 1 - \frac{\text{Perda de energia}}{\text{Energia na entrada}} \quad (4.19)$$

ou na forma mais apropriada, para aplicação no exemplo do capítulo seguinte:

$$\eta_{energ} = \frac{\text{Energia útil (propulsão+recuperação)}}{\text{Energia na entrada (combustível+energia elétrica)}} \quad (4.20)$$

b) Eficiência Exergética:

$$\eta_{exerg} = \frac{\text{Exergia na saída}}{\text{Exergia na entrada}} = \frac{\text{Exergia na saída}}{\text{Exergia do combustível}} \quad (4.21)$$

ou na forma mais apropriada, para aplicação no exemplo do capítulo seguinte:

$$\eta_{exerg} = \frac{\text{Exergia útil (propulsão+recuperação)}}{\text{Exergia na entrada (combustível+energia elétrica)}} \quad (4.22)$$

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

5.1 Dados e características do navio exemplo

O navio escolhido na frota nacional para exemplo neste trabalho é do tipo porta contêineres, capacidade total para 2.532 TEU, ilustrado na Figura 5-1.

Figura 5-1 - Foto do navio-exemplo

5.1.1 Dimensões e dados principais do navio e seus equipamentos

As tabelas 5-1, 5-2, 5-3, 5-4 e 5-5 apresentam as dimensões e dados principais do navio exemplo. A Tabela 5-1 apresenta as dimensões principais do navio, sua capacidade de carga e distribuição de contêineres; bem como a capacidade dos tanques de combustível e lastro do navio. Apresenta ainda velocidade e raio de ação do navio.

A Tabela 5-2 descreve o arranjo dos porões do navio e dos equipamentos de movimentação de carga. A Tabela 5-3 apresenta as características de outros equipamentos do navio.

A Tabela 5-4 apresenta as características principais do motor de propulsão e dos motores auxiliares. A Tabela 5-5 apresenta os dados básicos dos sistemas auxiliares do motor principal, bem como das propriedades dos fluidos que entram e saem do motor.

Tabela 5-1 – Dados principais do navio

Comprimentos: Total (LOA)	208,39 m
Comprimento entre Perpendiculares (LBP)	195,00 m
Boca Moldada (B)	29,80 m
Pontal	16,40 m
Calados de Projeto / Máximo	10,10 m / 11,40 m
Coeficiente de Bloco – carga total / em lastro	0,6536 / 0,6745
Deadweight – design draught - 10,10 m	27.280 tdw
Deadweight – Summer draught – 11,40 m	33.891 tdw
Deslocamento (displacement) - summer	44.521 t
GRT (Gross tonnage)	25.709 GT
Net tonnage	12.098 NT
Capacidade p/ contêineres – IMO 8'-6" de altura	
Nos Porões / No Convés / Total	966 / 1.566 / 2.532 TEU
Tomadas para Containers Frigoríficos	300 / 181
Capac. Geradores x tomadas TEU (3 D/G – 85%)	354 x 11 kW x 0,6
Capacidade de Óleo Pesado	2.478 m ³
Capacidade de Tanques Água de Lastro	1.460 m ³
Velocidades (10,10 m e 90% CMC) – prova de mar / serviço (15% de margem de mar)	22,8 / 22,1 nós
Raio de ação	15.000 nm
Tripulação / incluindo prático	24 pessoas
Sociedade classificadora / classe do navio	GL / 100 A5 E container ship

Tabela 5-2 – Arranjos e equipamento de carga do navio

Área de abertura do porão No 1	12,56 x 15,70 m
Área de abertura do porão No 2	12,56 x 20,80 m
Área de abertura do porão No 3 a 10	12,56 x 25,95 m
Carga empilhada nos porões	144/180 t por pilha TEU/FEU
Carga empilhada no tampão No 1	40/60 t por pilha TEU/FEU
Carga empilhada nos tampões No 2 a 10 e ré	60/90 t por pilha TEU/FEU
Guindaste de carga (Eletro-Hidráulicos)	3 x SWL 45 t x 26,80 m

Tabela 5-3 – Outros equipamentos do navio

Leme semi-balanceado	Area = 41,4 m ² – plena carga
Propulsor de proa (Bow thruster)	1 x 950 kW – 330 rpm
Guinchos combinados	2 x âncora + 4 x atracação
Embarcação salva-vidas (free-fall lifeboat)	1 x 24 pessoas
Guindaste de provisões / serviço	SWL 1,6 t / 12 m

Tabela 5-4 – Componentes principais do setor de máquinas

Motor principal – diesel - 2 tempos	CMCR 20.930 kW / 110 rpm
Propulsor tipo MMG – passo fixo – 6 pás	D= 6.750 mm, P= 6.087 mm
Turbocompressores: 2 x MAN NA 57/TO9	Eficiência min. no CMCR = 68%
Aquecedores de fluido térmico / exaustão	1.600 / 1.800 kW
Geradores diesel	4 x 1.290KWe / 900 rpm

Tabela 5-5 – Especificações e capacidades do MCP

Fabricante: MAN B&W – mod. 7L70MC Mk6		
Ponto Especificado MCR (SMCR)		
Potência no Eixo do Motor	20.930	kW
Rotação do motor	110	rpm
Bombas:		
• Circulação de Óleo Combustível	9,7	m ³ /h
• Alimentação de Óleo Combustível	5,4	m ³ /h
• Bomba de Água das Jaquetas	180	m ³ /h
• Água de Resfriamento Central	540	m ³ /h
• Bomba de Água do Mar	640	m ³ /h
• Bomba de Óleo Lubrificante	445	m ³ /h
• Bomba do Eixo de Cames	10,9	m ³ /h
Resfriadores:		
• Resfriadores de Ar de Lavagem:		
Dissipação de calor	8600	kW
Consumo de água da central	309	m ³ /h
• Resfriador de Óleo Lubrificante:		
Dissipação de calor	1590	kW
Vazão de óleo lubrificante	445	m ³ /h
Consumo de água da central	231	m ³ /h
• Resfriador de Água de Jaquetas:		
Dissipação de calor	3130	kW
Vazão de água de jaquetas	180	m ³ /h
Consumo de água da central	231	m ³ /h
• Resfriador de Água Central:		
Dissipação de calor	13.320	kW
Vazão de água central	540	m ³ /h
Vazão de água do mar	640	m ³ /h
• Pré-aquecedor óleo combustível	240	kW
Dados de Ar e Gases (SMCR – condição ISO):		
Consumo de Ar do Motor	54,8	Kg/s
Vazão de gases de exaustão	200.800	Kg/h
Temperatura de gases de exaustão	236,5	°C

5.1.2 Preparação dos dados do MCP para a análise termodinâmica:

Na análise da documentação do MCP do navio-exemplo, encontrou-se uma diferença entre os dados do modelo 7L70MC padrão MAN e os do modelo realmente instalado no navio-exemplo. O motor é também MAN, licenciado pela IZAR - Espanha. Estes motores são uma exceção ao padrão MAN de série normal e entendeu-se que foram especialmente adaptados e configurados para as necessidades/requisitos do armador dos navios. O modelo real adquirido para os navios foi chamado de “7L70MC – uprated”. A Figura 5.2 ilustra os pontos do diagrama do motor.

Figura 5-2 – Diagrama de carga do MCP

As diferenças do diagrama de carga entre o motor padrão e o motor “uprated” existente no navio-exemplo, estão indicadas na Tabela 5.6, indicando para cada ponto os valores de potência no freio, rotação e pressão média efetiva no freio.

Tabela 5-6 – Comparação entre os valores dos diagramas de carga

Características dos pontos	7L70MC - padrão	7L70MC uprated
Curso do embolo (mm)	2268	2268
L1 – pot./rot./press. (kW / rpm / bar)	19810 / 108 / 18	20930 / 110 / 18,7
L2 – pot./rotação (kW / rpm / bar)	12670 / 108 / 11,5	13386 / 110 / 15,4 (*)
L3 – pot./rotação (kW / rpm / bar)	14840 / 81 / 18	15698 / 82,5 / 18,7 (*)
L4 – pot./rotação (kW / rpm / bar)	9520 / 81 / 11,5	10046 / 82,5 / 15,4 (*)
Lo - pot./rotação (kW / rpm / bar)	Seleção pelo cliente	18839 / 106,2 / 17,42
Ponto otimizado		

(*) Valores prováveis, calculados proporcionalmente aos encontrados em tabela da MAN para a série L70MC em MAN B&W (2010) .

A análise termodinâmica será efetuada para a condição de operação de 20.930 kW, ou seja, 100% do MCR. Para esta condição, o consumo específico de combustível medido em testes deste MCP é de 180 g/kWh; a alimentação de ar, dada pelo fabricante, é de 54,8 kg/s na condição ISO. Pode-se, então, calcular a vazão de combustível, bem como a vazão de gases de descarga.

a) vazão em massa de combustível é dada por:

$$\dot{m}_{\text{comb}} = \text{potência do motor} \times \text{c.e.c.} \quad (5.1)$$

$$(\dot{m}_{\text{comb}})_{100\% \text{ da carga}} = 1,047 \text{ kg/s}$$

b) vazão de gases da descarga

O ponto de partida para determinação da vazão dos gases de descarga é o processo da combustão e a quantidade de ar em excesso para esse processo. O fabricante do motor determina para cada série de MCP, nas guias de projeto informadas ao proprietário, as vazões e pressões de ar e dos gases de descarga após a turbina, adotando normalmente uma sobrepressão na descarga da turbina para vencer as perdas de carga do sistema de recuperação e suas tubulações até a chaminé.

O fabricante informa também dados de vazão e pressão em diversos pontos, bem como os procedimentos e fatores de correção para as diversas temperaturas. As propriedades do ar e dos gases de escape podem ser calculadas por aproximação como gás ideal e corrigidas, quando apropriado, nos cálculos térmicos.

As Figuras 5.3 e 5.4 (MAN B&W) apresentam dados importantes para esta finalidade, mostrando respectivamente os valores de calor específico a pressão constante e do expoente isoentrópico dos gases de escape. Observe-se que nestas figuras são apresentadas também, para efeito de comparação, as propriedades dos gases de descarga quando se use mistura combustível-ar em proporções estequiométricas.

Figura 5-3 – Calor específico ar e gases do MCP. Fonte: (MAN B&W, 1985)

Figura 5-4 – Expoente isoentrópico – ar e gases do MCP. Fonte: (MAN B&W, 1985)

Com estes dados é possível calcular a vazão de gases na saída, corrigida para a condição de operação:

$$\dot{m}_{\text{gases}} = 200.800 \text{ kg/h} = 55,778 \text{ kg/s}$$

5.1.3 Demandas elétricas do navio na condição de viagem

A demanda de cargas elétricas para máquinas auxiliares, em condição de viagem, informada pelo navio, é de 1.000 kW, que é atendida por um dos quatro geradores auxiliares de capacidade 1.290 kWe. Estes geradores são acionados por motores Diesel de média rotação, que também consomem óleo pesado (HFO – heavy fuel oil). Existe ainda demanda de energia elétrica para carga frigorífica, no valor de até 2.400 kW, dependente do número de contêineres refrigerados do navio no trecho da viagem. Esta carga frigorífica, quando necessária, é atendida por dois geradores. O quarto gerador é de reserva.

5.1.4 Demandas de aquecimento do navio na condição de viagem

As diversas demandas para aquecimento no navio estão listadas na Tabela 5-7. Os dados estão considerados para carga do MCP de 100% em viagem. O total de calor para aquecimento está baseado proporcionalmente no potencial energético de 1500-1800 kW de recuperação no ecomizador de óleo térmico.

Tabela 5-7 – Demandas de aquecimento para carga de 100% do MCP – condição de viagem

CONSUMIDOR	Calor – kW aquecimento	Demanda percentual %
Soma tanques de armazenamento de HFO	561	37,23
Soma tanques de serviço de HFO	34	2,26
Tanques de MDO	Eventual	-
Armazenamento e manuseio de MDO	Eventual	-
Vazamento de óleo	Eventual	-
Tanque de resíduos de óleo	51	3,38
Soma de armazenamento de água fresca	48	3,19
Tratamento e aquecimento final de HFO	180	11,94
Tratamento de MDO	-	-
Tratamento de LO	83	5,51
Transporte/aquecimento de HFO	150	9,95
Ar condicionado (aquecimento – inverno)	300	19,91
Aquecimento ambiente	50	3,32
Outros consumidores	50	3,32
TOTAL	1507 kW	100 %

Embora tanto o motor principal como os auxiliares operem com óleo pesado em condições permanentes, utiliza-se óleo diesel marítimo (MDO) para partida e purga do sistema de óleo pesado. Isto porque o óleo pesado não tem viscosidade adequada para bombeamento enquanto o aquecimento não elevar sua temperatura acima de 50-60°C.

5.2 Avaliação das Máquinas do navio exemplo

5.2.1 Análise energética e exergética para o MCP

As análises, energética e exergética, do sistema de propulsão existente do navio-exemplo serão feitas como exercício de aplicação para investigação inicial da situação atual. É efetuada a aplicação dos fundamentos termodinâmicos, com foco no motor existente, consumindo óleo combustível pesado do tipo IFO380, com o volume de controle limitado ao motor principal e seus sistemas básicos.

A apresentação dos dados e resultados será sinótica através do fluxograma, tabelas e gráficos ilustrativos, com os resultados dos balanços e cálculos. Os pontos de interesse da análise são a observação e comparação das eficiências energéticas e exergéticas e a localização das irreversibilidades ao longo do processo com as opções de equipamentos e sistemas de recuperação de calor.

O MCP do navio exemplo, como já mencionado, é um motor diesel de 2 tempos, MAN modelo 7L70MC. O motor tem sete cilindros em linha, e máquinas auxiliares, como bombas, trocadores de calor, aquecedores, purificadores e demais periféricos do motor principal, conforme dados apresentados em tabelas anteriores. A alimentação de ar é feita com dois turbocompressores e os gases de escape passam por um economizador, aproveitando a energia para os consumidores de aquecimento (predominantemente armazenamento, tratamento e aquecimento de óleo combustível) em circuito fechado com fluido térmico. Para preparação de partida do sistema existe um aquecedor de óleo térmico que é retirado de operação tão logo o economizador possa assumir o regime permanente.

A Figura 5-5 apresenta o fluxograma simplificado do MCP e do sistema de recuperação conjugado com o economizador e sistema de fluido térmico para os consumidores de aquecimento, como base para a aplicação das análises. Os pontos de interesse estão numerados no limite do volume de controle do MCP, para os quais são associados os dados básicos levantados na documentação do navio.

Figura 5-5 – Diagrama simplificado do motor principal

A Tabela 5.8 apresenta os principais dados dos pontos de interesse, numerados de 1 a 9, que são as entradas e saídas do sistema dentro do volume de controle considerado, requeridas para os balanços de energia e exergia do MCP.

Tabela 5-8 - Dados básicos para análise termodinâmica do MCP do navio-exemplo

PT	PRODUTO	CARACTERÍSTICAS			
		T (°C / K)	m (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)
1	ÓLEO COMBUSTÍVEL	65 / (338)	1,047	PCI = 42.000	-
2	AR PARA TURBINA	25 / (298)	54,8	298,4	5,695
3	POTÊNCIA NO EIXO	-	-	-	-
4	ENERGIA ELÉTRICA	-	-	-	-
5	ENTRADA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO	25 / (298)	182,22	104,2	0,3648
6	SAIDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO	42,5 / (315,5)	182,22	177,3	0,6032
7	PERDAS DIVERSAS	-	-	-	-
8	FLUIDO TÉRMICO	190 / (463)	17,92	Cp = 2.385	NA
9	GASES NA CHAMINÉ	160 / (433)	55,78	434,8	6,072

Os cálculos e balanços das análises energética e exergética para o MCP foram executados com o auxílio do programa EES (Engineering Equation Solver) disponível no Depto de Eng. Mecânica - POLI-USP, utilizando-se as seguintes premissas e equações já apresentadas no Capítulo 4. O relatório do programa mencionado é apresentado no Anexo A.

Premissas e fórmulas:

- O estado de referência restrito foi considerado, nível do mar (navio) e temperatura ambiente de 25°C, coincidindo com os dados disponíveis.
- O poder calorífico considerado para o óleo combustível IFO380, API 15,7, foi de 42.000 kJ/kg conforme citado no livro Pounder's Marine

Diesel Engines and Turbines, em Woodyard (2004). A relação entre PCI e exergia química do combustível é dada pela Equação 4.15, abaixo reproduzida, e foi adotado coeficiente ϕ de 1,07 conforme recomendado por Szargut (2005).

$$b_{qui} = \phi \cdot PCI$$

- c) Para o balanço de energia é usada a equação 4.4, reproduzida abaixo. Não há diferenças entre velocidades e cotas das entradas e saídas, e o regime é permanente.

$$Q_{v.c.} + \sum m_e (h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e g) = \frac{dE_{v.c.}}{dt} + \sum m_s (h_s + \frac{V_s^2}{2} + Z_s g) + W_{v.c.}$$

- d) No cálculo das entalpias e entropias dos pontos de interesse foram usados os recursos internos do programa EES.
- e) Nos cálculos, os gases de escape foram considerados como sendo gás ideal.
- f) Para o balanço de exergia no volume de controle considerado é usada a equação 4.18, reproduzida abaixo:

$$\dot{H}_s - \dot{H}_e - T_0 (\dot{S}_s - \dot{S}_e) = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - \dot{W} - T_0 \dot{S}_{ger}$$

- g) O cálculo das eficiências energética e exergética é feito com auxílio das equações 4.20 e 4.22, reproduzidas abaixo:

$$\eta_{energ} = \frac{\text{Energia útil (propulsão+ recuperação)}}{\text{Energia na entrada (combustível+energia elétrica)}}$$

$$\eta_{exerg} = \frac{\text{Exergia útil (propulsão+recuperação)}}{\text{Exergia na entrada (combustível+energia elétrica)}}$$

As eficiências calculadas pelo programa foram:

$$\text{Eficiência Energética} = \eta_{\text{energ}} = 50,54 \%$$

$$\text{Eficiência Exergética} = \eta_{\text{exerg}} = 46,83 \%$$

Na Tabela 5-9 são apresentados os dados e os resultados finais dos balanços de energia (e) e exergia (b) do motor principal do navio-exemplo, resumizando os valores dos pontos de interesse:

Tabela 5-9 – Dados e resultados dos balanços de energia e exergia do MCP

PT	PRODUTO	CARACTERÍSTICAS					
		T (°C / K)	m (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	e (kW)	b (kW)
1	ÓLEO COMBUSTÍVEL	65 / (338)	1,047	PCI = 42.000	-	43.974	44.940
2	AR PARA TURBINA	25 / (298)	54,8	298,4	5,695	-	-
3	POTÊNCIA NO EIXO	-	-	-	-	20.930	20.930
4	ENERGIA ELÉTRICA	-	-	-	-	1.000	1.000
5	ENTRADA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO	25 / (298)	182,22	104,2	0,3648	-	-
6	SAIDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO	42,5 / (315,5)	182,22	177,3	0,6032	13.320	376
7	PERDAS DIVERSAS	-	-	-	-	1.017	22.663
8	FLUIDO TÉRMICO	190 / (463)	17,92	Cp = 2.385	NA	1.800	585
9	GASES NA CHAMINÉ	160 / (433)	55,78	434,8	6,072	7907	1.385

Os resultados da Análise Energética podem ser visualizados no Diagrama de Sankey simplificado para o MCP, conforme Figura 5-6, como um diagrama de fluxo energético. Pela Lei da Conservação da Energia, demonstra-se que a soma das energias das fontes alimentadas no MCP se mantém constante e as parcelas são convertidas nas diversas formas assinaladas. Os valores apresentados não são os potenciais de exergia para aproveitamento, apenas os valores de energia transformados.

Figura 5-6 – Diagrama de Sankey simplificado para o MCP – Análise Energética

Os resultados da Análise Exergética podem ser visualizados no Diagrama de Grassman simplificado para o MCP, conforme Figura 5-7, como um diagrama de fluxo exergético. Nota-se que da exergia disponível do Combustível + Energia Elétrica, somente foram aproveitadas a exergia útil no eixo (pela definição), e a exergia útil recuperada para aquecimento. As demais perdas pelo resfriamento e pela chaminé, apesar de representarem um potencial exergético, não podem ser praticamente aproveitadas no navio. A análise exergética permite visualizar que as maiores irreversibilidades não estão nas perdas de resfriamento e chaminé, que são pequenas comparadas com a combustão e demais equipamentos internos do MCP.

Figura 5-7 – Diagrama de Grassman simplificado para o MCP – Análise Exergética

5.2.2 Avaliação das Instalações de Máquinas

A análise energética e a exergética do MCP fornecem informações básicas úteis para avaliação do desempenho termodinâmico da instalação de máquinas do navio, que servem para o exame de possíveis alternativas para sua melhoria. A avaliação será feita para cada elemento representativo da instalação. Serão considerados, assim, os pontos relevantes de consumo de energia e de possível destruição de exergia, identificando se a instalação existente está dentro da melhor tecnologia disponível ou se há possibilidade de melhorias a serem recomendadas.

- Tipo básico do MCP: o motor é de 2 tempos, já comprovado como mais eficiente para aplicação em navios, com ponto de operação próximo do ponto de projeto do motor. Trata-se de um motor MAN 7LC70MC com eixo de cames controlado. A aplicação do opcional VIT (ajuste do início de injeção) já existente no motor é muito importante para melhor eficiência. Este acessório é usado para avançar o início da injeção, a fim de obter a máxima pressão de combustão em cada ponto de operação contínua do motor. Suplantando a tecnologia MC, existem os motores tipo ME que, em vez de eixo de cames, possuem comando eletrônico do sistema de injeção e da válvula de descarga. Os motores ME são chamados de “motores inteligentes”, pois através do controle otimizado da injeção e da descarga permitem reduzir o consumo de combustível e das emissões de poluentes, sendo, portanto, uma tecnologia mais eficiente que a anterior. Os armadores devem ficar sempre atentos aos novos desenvolvimentos dos fabricantes, alguns deles de adaptação simples para permitir atualização e melhor eficiência no motor.
- Turbocompressores: no motor existente são do tipo NA57/TO9, fabricados pela MAN, com eficiência total mínima demonstrada na folha de testes de 68% para a condição CMCR. Lembra-se aqui que o turbocompressor já é um equipamento de recuperação de energia,

pois permite aproveitar a energia dos gases da combustão para acionar o compressor de ar de alimentação do motor. Deve-se ressaltar que cada ponto percentual de ganho em sua eficiência é representativo na eficiência global. Porém, essa faixa de eficiência acima já é muito boa para qualquer alternativa moderna. Para motores antigos, com turbinas de menor eficiência, a substituição dos turbocompressores por outros mais eficientes pode representar uma significativa economia de energia.

- Gerador de eixo: O motor principal do navio exemplo não está equipado com gerador de eixo e possui MCA's que queimam também óleo pesado. Os MCA's de 4 tempos MAK têm c.e.c medido de 194 g/kWh enquanto que o MCP de 2 tempos tem c.e.c. medido de 180 g/kWh, ambos próximo do ponto otimizado a 85% da carga. Portanto, se fosse selecionado um MCP com potência aproximadamente 5% maior, e se houvesse um gerador de eixo e para cobrir as cargas de navegação, não haveria necessidade de acionar MCA's, que apresentam um maior consumo específico. Os MCA's seriam apenas utilizados com o MCP parado ou para atender demanda de cargas frigoríficas. No caso de navios, cujos MCA's consomem MDO e MGO, a vantagem do uso de gerador de eixo é ainda maior, pois além da diferença de eficiência existe a grande penalidade do custo superior dos combustíveis mais leves.
- Sistema de Recuperação Térmica: O sistema de recuperação do navio utiliza economizador com óleo térmico, diferente dos sistemas mais convencionais com caldeiras de recuperação com vapor. Já é uma tecnologia de ponta e adequada para navio porta contêineres. As grandes vantagens desse sistema são: menor energia requerida devido à baixa pressão do fluido térmico em relação às instalações de vapor, temperatura e troca térmica mais efetiva com os consumidores de fluido de aquecimento, e menor perda no circuito fechado de fluido térmico porque não precisa fazer as purgas de condensado das instalações de vapor. Para essa instalação não cabe a introdução dos

sistemas STG e TES da MAN, pois estes dependem de instalações com vapor. Poderia ser considerado o sistema PTG, que se baseia no emprego de uma turbina a gás de potência. Este sistema poderia ser adotado com um MCP de potência ligeiramente maior, que suprisse a vazão de gases requerida pela turbina de potência. Esta turbina acionaria os geradores elétricos com maior eficiência e menor custo do que os MCA's.

- Trocadores de calor : como visto no diagrama do MCP, os trocadores de calor principais (Resfriador de Ar, Resfriador de Óleo Lubrificante, e Resfriador de Água dos Cilindros) são responsáveis por 13.320 kW, que é cerca de um quarto de toda energia fornecida pelo combustível. Paradoxalmente, eles não são os vilões da destruição da exergia nesta mesma razão. O maior deles, que é o Resfriador de Ar, representa 65% desse total (8.860 kW/13.320 kW), mas desempenha um papel importante no rendimento global e tamanho do motor, pois permite a admissão de uma quantidade muito maior de ar resfriado (com maior densidade) para combustão no motor. Os demais trocadores desempenham papel de manter condição operacional pela temperatura de óleo lubrificante e para proteção dos materiais dos cilindros nos parâmetros de projeto. Nesses trocadores, é importante manter o mínimo requerido das condições de projeto para não destruir exergia sem necessidade. Lembra-se também, neste ponto, a importância da limpeza periódica desses trocadores para manter bom rendimento de troca térmica.
- Bomba de Água de Resfriamento: o consumo de energia é proporcional à vazão da bomba. Este equipamento é um dos grandes consumidores contínuos de energia, e produz destruição de exergia desnecessariamente se estiver fora do ponto de projeto, seja com vazão superior à necessária para um determinado ponto de operação, seja com vazão menor pela restrição de válvula de controle. A melhor tecnologia atualmente recomendada para eficiência ótima dessas bombas é usar controle variável da rotação de seus motores elétricos,

através de inversores de frequência, e não promover nenhuma restrição nas válvulas.

- Gerenciamento das condições operacionais do motor: trata-se de importante tarefa, que permite manter o melhor desempenho do motor ao longo do tempo. De fato, através da observação, avaliação e ação corretiva, consegue-se otimizar cada parâmetro das diversas seções do MCP. Em síntese, trata-se da análise e ações conjuntas de todos os outros pontos observados isoladamente, e permite identificar oportunidades de melhor ajuste economia da global. O fabricante do motor disponibiliza esse sistema e o motor é provido com a instrumentação necessária para esta avaliação e cabe à tripulação zelar por seu acompanhamento.
- Consumidores de energia de aquecimento: é o caso dos sistemas de armazenamento, tratamento e manuseio do óleo pesado. Este sistema consome cerca de 10 % da energia de propulsão, incluindo neste total a energia de aquecimento e a dos equipamentos de tratamento e movimentação do combustível. Pode-se, assim, antever uma grande vantagem da substituição do óleo pesado por combustíveis alternativos, que prescindiriam desta energia. Porém, como no projeto de navios existentes o óleo pesado é uma realidade, resta como recomendação primar pelo gerenciamento do uso eficaz de energia nestes pontos e cuidados com isolamento térmico.
- Gases da chaminé: Observa-se que a condição operacional real apresenta freqüentemente uma temperatura acima de 160-180°C, portanto com uma margem acima do ponto de orvalho. Mas não há potencial representativo de recuperação de energia nesta faixa. Adicionalmente, deve-se observar que devido à queima de óleo combustível com alto teor de enxofre não seria recomendado aproveitar energia reduzindo a temperatura dos gases. Neste caso haveria risco de condensação do vapor d'água e formação de ácidos

que poderiam ser muito nocivos, que causariam corrosão dos dutos e dos equipamentos de recuperação.

- Utilização combinada de gás como combustível: O tipo de motor existente permite o uso de gás em lugar do óleo pesado, exigindo adaptações pelo fabricante para o próprio motor, além da necessidade de sistema de armazenamento de gás. Esta alteração permite melhor rendimento global, pois a queima é mais completa e também redução de poluição na proporção equivalente de uso do gás. A alternativa, apesar de possível tecnicamente, não parece adequada ao navio exemplo. De fato, o ganho de eficiência não compensa o custo das modificações requeridas na instalação. Assim, entende-se que a alternativa seria mais efetiva em um projeto novo ou outros tipos de navio que transportam gás. Há ainda a examinar a questão logística de abastecimento nos portos escalados pelo navio exemplo.

5.3 Avaliação global do navio exemplo para redução de combustível fóssil

Apresenta-se aqui, em continuação ao exemplo de aplicação para avaliação das máquinas isoladamente, uma avaliação do navio de maneira mais abrangente. São avaliadas, de maneira particular, as novas tecnologias disponíveis e sua aplicação ao navio exemplo. São também avaliadas as medidas de operação e manutenção pertinentes ao navio exemplo. Ao final desta seção serão simuladas algumas configurações do navio exemplo, com aplicações de novas tecnologias, bem como e medidas de operação e manutenção, para aumento de rendimento e redução do consumo de combustível.

5.3.1 Avaliação de novas tecnologias disponíveis e sua aplicação no navio exemplo

Conforme discutido no capítulo 3, a redução do consumo de combustível para a propulsão de um navio depende da seleção de valores convenientes de deslocamento e velocidade do navio e do projeto adequado de três elementos básicos: casco, hélice e máquina principal. São as linhas do casco que, juntamente com a velocidade, influenciam a resistência ao avanço. Por outro lado, a forma da popa e o tipo de propulsor selecionado determinam o coeficiente propulsivo e, em última análise, a potência requerida da máquina principal. E, finalmente, é a eficiência térmica da máquina principal que determina o consumo de combustível necessário para suprir a potência requerida. A atenção no projeto ou seleção de cada um destes elementos é fundamental quando se busca reduzir o consumo de combustível. Atualmente, outras formas de minimizar o consumo de combustível fóssil incluem o emprego de outras fontes de energia, seja para gerar uma força propulsora adicional, seja para gerar potência suplementar.

Melhorias para redução de consumo de energia, bem como emprego de novas tecnologias serão aqui avaliadas para aplicação no navio exemplo. Essa avaliação será feita com base em alternativas disponíveis que sejam apropriadas para o tipo de navio. Será analisado o projeto do navio, verificando se ele se encontra dentro da melhor tecnologia disponível ou se há possibilidade de melhorias que serão recomendadas.

- Melhoria 1 – Instalação de flaps de popa: como são dispositivos simples, cuja aplicação em navios tem eficiência comprovada, devem ser priorizados, em virtude de seu baixo custo. A sua implementação pode representar economia de combustível de 1 a 2%.
- Melhoria 2 - Otimização do hélice: um projeto de hélice adaptado à esteira, com otimização de diâmetro e do perfil das seções das pás, pode resultar em uma elevada eficiência do propulsor. A substituição

do hélice existente por um hélice otimizado por ocasião da docagem do navio pode representar até 3% de economia de combustível.

- Outras melhorias: Todas outras sugestões de melhorias para aperfeiçoamento de linhas do casco e de otimização básica de projeto encontradas na pesquisa não se aplicam a um navio existente; seriam apenas viáveis para consideração na fase de projeto.
- Energia eólica: Os kites são recomendáveis para navios porta contêineres. Trata-se do dispositivo eólico que proporciona maior redução no consumo de combustível, pois aproveita a energia dos ventos que, em grande altitude, têm alta velocidade. Resultados práticos indicam economia de até 30% e são altamente recomendados para implantação no navio exemplo. Velas não são tão apropriadas pela interferência com as pilhas de contêineres. Rotores Flettner não são aplicáveis pela mesma razão. Turbinas de vento poderiam ser aplicadas em algumas partes do navio, para acionar geradores elétricos de pequena capacidade.
- Energia nuclear: Não será considerada como alternativa no navio exemplo, pois um navio com propulsão nuclear deve obrigatoriamente nascer com projeto e classificação específica, e licenciamento especial.
- Energia solar: Não há área representativa para aproveitamento de energia solar devido ao espaço maximizado para contêineres. Resta uma pequena área no topo da acomodação e na proa do navio, que é também muito pequena para justificar o sistema elétrico e seus acessórios para aproveitamento dessa energia. A aplicação é recomendada em navios com grande área para instalação dos painéis solares, como navios graneleiros, navios tanque, navios de passageiros e balsas de travessia.

- Células de Combustível: despontam como os mais eficientes dispositivos para substituir os motores de combustão, e com rendimentos muito promissores. Para comparação, as células de combustível são 50% mais eficientes que os motores de combustão interna. Por ser uma tecnologia ainda embrionária e cara, existem atualmente poucas aplicações comerciais. É o caso de alguns poucos submarinos e navios. Eles possuem células de combustível empilháveis e sistemas de potência da ordem de centenas de kW. Para navios de grande porte, as células somente poderiam ser consideradas na substituição dos MCA's. Espera-se que com o desenvolvimento e barateamento desta tecnologia, será atingida a aplicação comercial para os sistemas de propulsão dos navios no futuro.
- Combustíveis alternativos: Uso de biodiesel parcial ou total pode ser uma solução para substituição efetiva de combustível de origem fóssil. Mas, devido à disponibilidade limitada desse combustível e provável recomendação para alguns usos mais nobres, acredita-se que seu uso será mínimo em casos isolados para uso na navegação. Outros tipos de combustíveis alternativos apropriados dependem de desenvolvimento futuro.

5.3.2 Avaliação de medidas de operação e manutenção no navio exemplo

Ainda considerando o navio como um todo, após a análise já feita para as máquinas isoladamente, serão analisadas medidas de operação e manutenção que podem contribuir para a melhoria de rendimento e possibilitar a redução de consumo de combustível. Serão examinadas alternativas disponíveis que sejam apropriadas para o tipo de navio, identificando se a política de operação e manutenção está dentro da melhor prática existente ou se há possibilidade de melhorias que serão recomendadas.

- Redução de Velocidade: É uma medida que deve ser estudada, especialmente para navios porta contêineres, que têm sido projetados para velocidades muito altas. A redução de velocidade, nos casos em que a rota e o emprego do navio permitem, é um fator relevante na redução de energia requerida e consumo de combustíveis, fóssil ou renovável. Pode-se considerar que a adoção de velocidades menores em navios porta contêineres, que são projetados para velocidades acima de 20 nós, conduz à redução do consumo de combustível da ordem de 20-40%.
- Limpeza e pintura de casco e polimento de hélice: São medidas que permitem manter menor resistência ao avanço, e maior eficiência do propulsor, reduzindo a potência requerida do motor. Portanto as medidas mencionadas, se feitas com frequência de dois anos, devem permitir economia de combustível de 2 a 5%.
- Bombas com controle variável: Aplicação de inversores de frequência para variação de rotação (e capacidade) das bombas principais do navio, que podem ter sua vazão reduzida com carga abaixo da nominal para não destruir a exergia disponível com as irreversibilidades nas restrições de válvulas de controle, ou mesmo rodar com vazão acima do necessário. Esta medida pode representar economia de até 1%.
- Automação e gerenciamento: medidas de automação e gerenciamento de sistemas integrados do navio, e ajuste de piloto automático, podem representar economia relevante no consumo de combustível.

5.3.3 Simulação de configurações alternativas

É interessante avaliar que redução no consumo de combustível fóssil pode ser obtida com as tecnologias alternativas disponíveis. Para isto serão

simuladas algumas opções, que representam substituição parcial ou total do uso de combustível fóssil. Para representar mais apropriadamente a racionalidade das melhorias obtidas, são considerados os diferentes fatores de conversão de energia, envolvidos na aplicação de cada uma destas configurações alternativas.

As seguintes premissas são adotadas:

- a) Os valores apresentados correspondem a regime permanente.
- b) As variáveis de operação do motor principal e os valores de consumo de combustível se referem a cargas de viagem nas condições de projeto, com 100% da capacidade do MCP (20.930 kW), mais a potência fornecida por um MCA (1.000 kW).
- c) A eficiência relativa entre célula de combustível e motor diesel foi adotada como 50% maior para a célula de combustível em relação ao motor diesel substituído. Foi considerada a relação (0,75/0,50) adotando-se um motor diesel rendimento aprox. de 50%, como é o motor do navio exemplo; e uma célula de combustível com rendimento de aprox. 75%, com recuperação com turbinas, conforme diagrama apresentado na Figura 3-17 (O'ROURKE, 2006).
- d) A conversão de energia eólica está considerada com fator de 100% pois foi considerada a energia efetiva disponível na natureza e aproveitada desta fonte diretamente, significando o mesmo percentual de economia de combustível.
- e) Os valores percentuais de redução e melhoria de rendimento para as diversas tecnologias consideradas, apesar das divergências das referências consultadas, foram admitidos como sendo factíveis para o navio exemplo.

A Figura 5-8 mostra um esquema ilustrativo do emprego de fontes alternativas de energia no navio exemplo:

Figura 5-8 - Esquema ilustrativo da utilização de fontes alternativas de energia

As simulações das diversas alternativas e tecnologias apropriadas para o navio exemplo foram feitas usando o programa EES (Engineering Equation Solver) disponível no Depto de Eng. Mecânica - POLI-USP. O relatório do programa mencionado é apresentado no Anexo A.

São simuladas seis condições diferentes. A configuração Nº 1 corresponde à instalação original do navio. Nas demais configurações simuladas, são exemplificadas diferentes tecnologias alternativas com combustível fóssil e com combustível renovável. Os resultados são apresentados sumarizados na Tabela 5-12, onde:

- Pot_{tot} é a potência total requerida
- Pot_f é a potência parcial requerida e suprida por combustível fóssil
- Pot_r é a potência parcial requerida e suprida por combustível renovável
- Pot_{Ad} é a potência adicional oferecida por fontes alternativas ao combustível.
- $Pot_{equiv. Reduzida\ c/\ T1}$ é a potência equivalente, reduzida com o emprego de um empuxo adicional T1

Tabela 5-10 – Resultados da simulação das diversas alternativas

	SIMULAÇÃO DAS ALTERNATIVAS	Pot _{tot} (kW)	Pot _r (kW)	Pot _r reduzida (kW)	Pot _{Ad} adic. (kW)	Pot equiv. reduzida c/ T1 (kW)	CONSUMO COMBUSTÍVEL %
1	Situação original do navio consumindo comb. fóssil	21.930	21.930	0	0	0	100
2	Estágio 1- Melhorias de 10% em relação ao original	19.737	19.737	0	0	0	90
3	100% subst. por células de combustível – combustível fóssil	19.737	19.737	0	0	0	60
4	100% subst. por células de combustível – combustível renovável	19.737	0	19.737	0	0	60
5	100% substituição do combustível fóssil por Biodiesel - Renovável	19.737	0	19.737	0	0	90
6	Híbrido: Redução de 20% de combustível da Situação 2 com kites + 1 MCA com células de combustível	19.737	14.803	4.934	987	3.947	70,5

Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 5-9:

Figura 5-9 – Resultados percentuais de redução de consumo de combustível fóssil

Comentários sobre os resultados:

- 1- A situação 1 representa o consumo atual de combustível fóssil pela instalação propulsora e auxiliar do navio exemplo, sem a implantação de nenhuma melhoria.
- 2- A situação 2 considera os efeitos de redução de consumo de combustível obtidos com instalação de flaps de popa, emprego de pinturas especiais e limpeza de casco/hélice, substituição do MCP do tipo MC para tipo ME, e otimização do propulsor; estes efeitos totalizam 10% de economia. É importante assinalar que as melhorias adotadas são baseadas em tecnologias disponíveis e factíveis para execução em curto prazo; dependem somente de avaliação de viabilidade econômica para a vida útil do navio.
- 3- As configurações 3 e 4 são referentes ao emprego de células de combustível para toda carga de propulsão. Não há no momento tecnologia comercial para este caso, que está limitada a capacidade de poucas centenas de kW. O exemplo serve para ilustrar e ensaiar o futuro, demonstrando a grande redução de consumo de combustível devido ao rendimento muito superior das células de combustível.
- 4- A situação 4, além da vantagem anterior pelo uso de células de combustível, considera o uso de combustível renovável. Mas em termos de emissões de poluentes, as duas alternativas são muito favoráveis, pois as células de combustível têm emissões praticamente zero.
- 5- A configuração 5, que considera a substituição integral de combustível por biodiesel é utópica; serve apenas para ilustrar uma possibilidade futura, mas não é viável para consideração no momento.

- 6- A configuração 6 é uma composição híbrida balanceada com as melhores alternativas de momento e viáveis para o navio exemplo a curto prazo. Inicia com o Estágio 1 de implantação de melhorias com redução de combustível em 10%. Avança para utilização de *kites* que são dispositivos bastante promissores para o aproveitamento eólico e já considera o uso de célula de combustível para um dos MCA's, que logo deverá estar disponível e adequada para a faixa de potência de 1MW.

A configuração 2 pode ser implementada a qualquer tempo conveniente, se decidida pelo armador do navio, permitindo imediata economia após sua execução. A configuração 6, com soluções híbridas, permite uma redução bem significativa de combustível fóssil e as tecnologias estão sendo viabilizadas em curto prazo. Entretanto, as configurações 3, 4 e 5 somente poderão ser consideradas no futuro, após comprovada a viabilidade técnico-econômica dessas tecnologias para aplicação em navios de grande porte .

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Síntese do trabalho

O trabalho se propôs a analisar o problema de consumo de combustíveis em instalações de máquinas de navios, com foco especial no sistema de propulsão. Foi feita uma pesquisa das instalações que consomem essencialmente derivados de petróleo, e das alternativas que estão sendo propostas para redução do consumo, ou para sua substituição.

Sabe-se que a escolha de uma instalação propulsora deve levar em consideração uma série de critérios. No presente trabalho, o foco principal é a redução do consumo de combustível fóssil, que pode ser obtido de diversas formas. Para análise do problema, procurou-se identificar as variáveis mais relevantes que determinam a demanda de combustível de uma instalação propulsora marítima. A partir deste ponto, foram analisadas diferentes alternativas que podem contribuir para: redução da resistência ao avanço, aumento do coeficiente propulsivo e da eficiência térmica do motor. Foram também consideradas fontes alternativas de energia que reduzem o empuxo requerido do hélice e/ou a potência demandada do motor principal.

Foram revistos e apresentados fundamentos termodinâmicos, com foco na análise energética e exergética do motor principal do navio, como ferramentas para a avaliação dessas instalações. Foi exemplificada uma aplicação da avaliação pretendida para um navio porta contêineres da frota nacional. Foi também realizada uma simulação de aplicação das alternativas e medidas para redução de consumo de combustível e o resultado foi sintetizado e comentado.

6.2 Conclusões

A solução do problema de redução e substituição de combustíveis fósseis em navios passa pelo estudo de melhoria de rendimento e aplicações de novas

alternativas de fonte de energia, bem como pela adoção de medidas eficazes para o uso racional de energia nas instalações dos navios existentes ou novos projetos.

Conforme a viabilidade técnica e econômica permitir, a substituição gradual dos combustíveis fósseis utilizados atualmente deve ser encaminhada, parcial ou totalmente, para o uso de novas tecnologias e fontes de energia chamadas limpas e renováveis.

Os recursos energéticos, sejam eles de origem fóssil ou renováveis, devem ser utilizados com tecnologias cada vez mais eficientes, não apenas no uso final desses recursos nos navios. O processo de uso da energia deve ser abordado como um todo, incluindo as fases de produção, conversão, transporte e uso final dos combustíveis; deve-se procurar não só buscar a melhor eficiência, mas também garantir o menor impacto ambiental possível em toda cadeia produtiva.

É recomendado que a avaliação das máquinas e sistemas energéticos de cada navio seja embasada em uma análise termodinâmica, para permitir conhecimento completo das diversos consumidores de energia e as oportunidades de substituição de suas fontes.

A análise exérgica é a ferramenta termodinâmica mais adequada para tratar os problemas em relação ao meio ambiente e permite identificar as irreversibilidades. Nos casos típicos de navios convencionais com motores diesel, foi constatado que os rendimentos pela análise exérgica ou energética conduziram a resultados semelhantes. Não houve diferença significativa nos rendimentos pelo fato que as demandas do navio exemplo foram essencialmente trabalho. Em aplicações com navios de transporte de gás ou cargas refrigeradas, por exemplo, a vantagem do uso da análise exérgica seria ainda mais evidenciada.

Várias alternativas foram pesquisadas e expostas neste trabalho, resumindo as aplicações mais apropriadas para cada tipo de navio. O exemplo de aplicação apresentado particularizou as alternativas adequadas para navios do tipo porta contêineres. Fica também evidente que a implantação dessas alternativas é sempre recomendável na fase de projeto dos navios, mas elas podem e devem ser consideradas para navios existentes, sempre que houver interesse econômico ou de natureza ambiental.

A célula de combustível desponta como um dos mais promissores dispositivos para melhoria de rendimento e redução de impacto ambiental. Sua aplicação pode atender qualquer tipo de navio. Ainda depende de redução de custo e produção de escala para viabilidade econômica. Percebe-se um início de aplicação de células de combustível com capacidades até 1 MW, para substituição dos motores auxiliares em uma primeira etapa. Mas o uso para uma faixa maior de potência, correspondente à propulsão de navio, certamente só ocorrerá á longo prazo.

O aproveitamento da energia eólica pelos “kites” se mostra como tecnologia cada vez mais confiável, e passa a ser uma aplicação segura de um recurso natural disponível na natureza. Sua viabilidade econômica é limitada à amortização financeira do equipamento, já que o custo da energia eólica é zero. O seu emprego deveria ser praticamente obrigatório para rotas onde há abundância de correntes favoráveis, e conseqüentemente viável no curto prazo. As demais aplicações de energia eólica dependem do tipo de navio.

A energia solar, a mais abundante fonte disponível na natureza, tem aplicação ainda incipiente nos navios. O emprego desta fonte vai depender dos avanços e desenvolvimentos futuros para melhoria do rendimento e redução de custo dos dispositivos e acessórios de conversão desta fonte de energia.

6.3 Recomendações

Como sugestão para próximos trabalhos sobre o tema, recomenda-se aprofundar no detalhamento dimensional das soluções apresentadas e sua influência nos espaços dos navios e custos correspondentes.

Recomenda-se também que o dimensionamento de novas frotas, em que são definidos os valores de deslocamento e velocidade do navio, leve em consideração critérios de consumo de energia e ambiental. Certamente, o emprego de velocidades mais baixas resulta em menor energia requerida pelo produto carga vezes distância transportada.

Em caso de interesse do armador do navio exemplo, um trabalho mais específico e detalhado seria recomendado visando à implantação das melhorias adequadas ao navio.

REFERÊNCIAS

- AALBORG INDUSTRIES. **Complete Solutions Marine**. Disponível em: http://www.aalborg-industries.com/marine_solutions/complete_solutions_ship_types.php. Acesso em: 21/08/2010
- BASU, Suddhatsatwa. **Recent Trends in Fuel Cell Science and Tecnology**. New Delhi : Springer, 2007.
- BEJAN, Adrian, TSATSARONIS, George e MORAN, Michael. **Thermal Design and Optimization**. Canada : John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- BUNKER INDEX. **Daily port prices - Santos/Brazil**. 2011. Disponível em: http://www.bunkerindex.com/prices/portfree_xmdo.php?port_id=663 . Acesso em: 21/02/2011
- BRINATI, Hernani Luiz. **Instalações Propulsoras**. PNV-411 - Vol I e II. São Paulo : EPUSP - Depto de Engenharia Naval e Oceânica, 1980.
- . **Tópicos Especiais de Instalações Propulsoras** - PNV 5753 - Notas de aula. São Paulo : Depto de Engenharia Naval e Oceânica, 2009.
- CLAYTON, Brian. **Wind-assisted ship propulsion**. UK : IOP Publising Ltd, 1987.
- DINCER, Ibrahim e ROSEN, Marc. **Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development**. Oxford : Elsevier. 2007.
- FRANGOPOULOS, Christos A. e NAKOS, Lambros G. **Development of a Model for Thermodynamic Design and Operation Optimization of a PEM Fuel Cell System**. Zografou, Greece : Elsevier Ltd, 2005.
- GAINZA, Jorge A.N. **Estudo de Instalações Propulsoras para Navios Porta Contêineres**. São Paulo : EPUSP - Depto de Eng. Naval e Oceânica, 2009.
- GALVÃO, Luiz Claudio Ribeiro, GRIMONI, José Aquiles Baeso e UDAETA, Miguel Edgard Morales. **Iniciação e Conceitos de Sistemas Energéticos para o Desenvolvimento Limpo**. São Paulo : EDUSP, 2004. p. 308p.
- GL - Germanisher Lloyd. **Fleet online. Identification. Classification**. Disponível em: <http://app.gl-group.com/register/index.jsp?STyp=204&RegNo=112856>. Acesso em via [www. equasis. org](http://www.equasis.org) em 21/02/2011
- GOLDEMBERG, José e LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo : EDUSP, 2008. p. 400p.

GREUELL, S. C. e MARKT, D.C. **Estudo de sistema híbrido de propulsão usando energia eólica tipo "SkySails" para um navio comercial**. s.l. : PNV-2511 - Projeto de Formatura I - EPUSP, 2010.

HHI. **Thrust Fin Reduces Fuel costs By More Than Five Percent**. Hyundai Korea. Disponível em: http://english.hhi.co.kr/press/news_view.asp?idx=447&page=1. Acesso em: 05/02/2011.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Malabar : Krieger Publishing Company, 1985, rev. 1995. p. 328 p.

KRESIC, Miro e HASKELL, Bruce. **Effects of Propeller Design-point Definition on the Performance of a Propeller/Diesel Engine System with Regard to In-Service Roughness and Weather Conditions**. s.l. : SNAME Transactions, Vol. 91, 1983. pp. 195-224.

LEO, T.J, DURANGO, J.A, e NAVARRO, E. **Exergy Analysis of PEM Fuel Cells for Marine Applications**. Madrid, Spain : Elsevier Ltd, 2008.

MAN B&W. **The MC Engines - Exhaust Gas Data and Waste Heat Recovery Systems**. 1985.

MAN B&W. **Low Speed Engines - Guide Tools**. 2010. Disponível em: <http://www.mandieselturbo.com/0000077/Products/Marine-Engines-and-Systems/Low-Speed.html>. Acesso em: 20/08/2010.

—. **Thermo Efficiency System (TES) for Reduction of Fuel Consumption and CO2 Emission**. Copenhagen : s.n., 2009. 13 páginas - disponível em www.manbw.com/files/news/files/5055/P3339161.pdf em 11/10/2009.

MARITIME JOURNAL. **Fuel cell vessel moves towards sea trials**. Martime Journal. Disponível em: http://www.maritimejournal.com/archive101/2009/october/power__and__propulsion/fuel_cell_vessel_moves_towards_sea_trials. Acesso em: 21/12/2009

MER. **Fuel Cell for Future Power Generation**. Revista MER. November 2007, pp. 16-19.

MER. **World's first fuel cell-driven passenger ship**. Revista MER. October 2008, p. 37.

MORA-BEJARANO, Carlos Humberto. **Avaliação Exergoecológica de Processos de Tratamento de Esgoto**. São Paulo : Escola Politécnica da USP - Depto de Engenharia Mecânica - Teses de Doutorado, 2009.

MOORE, D.F. **Thermodynamic Principles of Energy Degrading**. London : The Macmillan Press, 1981.

NIPPON PAINT. **LF-Sea**. Anúncio em revista. Shipping World & Shipbuilder. London : IMAREST, July/August/2009, Vol. 210. 2009. contracapa.

O'ROURKE, Ronald. **Navy Ship Propulsion Technologies: Options for Reducing Oil Use - Background for Congress**. Washington, USA : Congressional Research Service, 2006. Order Code RL33360.

OLIVEIRA JUNIOR, Silvio. **Análise Exergética e Termoeconômica de Processos: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo : s.n., p. 353p. Texto sistematizado (Livre Docência) - Escola Politécnica da USP. Depto de Eng. Mecânica, 2009.

PADOVEZZI, Carlos D. e GELEHRTER, Rui. **Tendências Tecnológicas da Propulsão de Navios** - Seminário. São Paulo : CELACADE - Centro Latinoamericano de Capacitacion y Desarrollo de Empresas, 2009.

PPG. **Paints and Coatings**. Anuncio em revista Ship Repair Journal. Vol. 7. 2009

ROCHA, Antonio Carlos D. B. 1983. **Introdução ao Uso Racional de Energia em Embarcações** - Seminário de Engenharia Naval. São Paulo : EPUSP - Depto de Eng. Naval e Oceânica, 1983. p. 37p.

ROSE, Robert. **O que é uma célula de combustível?** Breakthrough Technologies Institute/FUEL CELLS 2000. Disponível em:
http://worldwide.fuelcells.org/po_base.cgim?template=po_what1s. Acesso em: 10 de Novembro de 2009

SILVANIUS, Marten. **Wind Assisted Propulsion for Pure Car and Truck Carriers**. Stockholm : KTH. Centre for Naval Architecture, 2009.

SOLAR SAILOR. **Hybrid Marine Power Solutions**. Disponível em:
<http://www.solarsailor.com/solutions.htm>. Aceso em: 08/08/2010

SUGITA, Hideaki, et al. **Thermodynamic Evaluation of "Fukae-maru" Propulsion Plant**. Kobe : Kobe University - NII - Electronic Library Service, 2005.

SVENSEN, Tor. **DNV looks to the future**. s.l. : MER, 2008. pp. 17-18. July/August 2008.

SZARGUT, Jan. **Exergy Method - Technical and Ecological Applications**. Southampton : WIT Press, 2005.

TINSLEY, David. **Containerships - Thinking outside the box**. London : IMAREST, June de 2009, Revista Shipping World & Shipbuilder, 2009. p. 36.

TINTAS INTERNACIONAL. **Intersleek boosts tanker performance**. Shiprepair and Conversion Technology. 3rd quarter 2009, London : RINA, 2009.

TOWNSIN, R.L., et al. **Estimating the Technical and Economic Penalties of Hull and Propeller Roughness**. s.l. : SNAME Transactions - Vol. 89, 1981. pp. 295-318.

VAN WYLEN, G.J e SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo : Edgard Blücher, 1976.

WALL, Goran. **Exergy - a useful concept within resource accounting**. Goteborg, Sweeden : Institute of Theoretical Phisics, 1977.

WÄRTSILÄ. **Energy-efficiency**. articles Disponível em:
<http://www.wartsila.com/en/marine-solutions/overview>. Acesso em 28/11/2010

WOODYARD, Doug. **Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines**. 8ª edição. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. p. 884 páginas.

ANEXO A - RELATÓRIOS DO PROGRAMA EES

- 1) Relatório do programa EES para os cálculos e balanços da análise energética e exergética do motor principal:

"Análise energética e exergética para motor principal de navio e sistema de recuperação"

"0 - Dados do estado morto"

"Pressão atmosférica ao nível do mar"

$P[0] = 101,33 \text{ [kPa]}$

"Temperatura ambiente escolhida em função dos dados disponíveis, coincidindo ambiente"

$T[0] = 298 \text{ [K]}$ "25 [°C]"

"1 - Óleo Combustível"

"vazão mássica de combustível, sendo para 100% do MCR"

" $180 \text{ g / kW} \times \text{h} \times 1 \text{ kg / } 10^3 \text{ g} \times 20.930 \text{ kW} \times 1 \text{ h} / 3,6 \times 10^3 \text{ s} = 1,047 \text{ kg/s}$ "

$m[1] = 1,047 \text{ [kg/s]}$

"óleo pesado tipo IFO 380 - API 15,7"

"considerado PCI = 42000 kJ/kg - Pounder's"

$PCI_1 = 42000 \text{ [kJ/kg]}$

$T[1] = 338 \text{ [K]}$ "65 [°C]"

$P[1] = P[0]$

$h[1] = PCI_1$

$e[1] = m[1] \times PCI_1$

"Fundamentos ---> relação entre exergia química do combustível líquido e PCI"

" $b_ch / PCI = 1,07$ - fonte: Szargut- Exergy Method - pag.37"

$b[1] = 1,07 \times PCI_1$

"2 - Ar de admissão para turbocharger"

"Dados com T,P ambiente"

$b[2] = 0$

$e[2] = 0$

"Vazão de ar ambiente para turbina"

$m[2] = 54,8 \text{ [kg/s]}$

$T[2] = 298 \text{ [K]}$ "25 [°C]"

$P[2] = 101,33 \text{ [kPa]}$

"Entalpia do ar de entrada - idem estado morto"

$h[2] = \text{enthalpy}(\text{air}; T = T[2])$

"Entropia do ar de entrada - idem estado morto"

$s[2] = \text{entropy}(\text{air}; T = T[2]; P = P[0])$

"3 - Potência no eixo propulsor"

$$e[3] = 20930$$

$$b[3] = 20930$$

"4 - Alimentação de máquinas elétricas do navio"

$$e[4] = 1000$$

$$b[4] = 1000$$

"5-6 - Central de Resfriamento"

$$m[5] = 182,22 \text{ [kg/s]}$$

$$m[6] = 182,22 \text{ [kg/s]}$$

$$T[5] = 298 \text{ [K]} \text{ "25 °C"}$$

$$h[5] = \text{enthalpy}(\text{water}; P=P[0]; T=T[5])$$

"para determinação indireta de T[6], conhecido e[6] = 13300 do trocador central"

$$h[6] = \text{enthalpy}(\text{water}; P=P[0]; T=T[6])$$

$$e[5] = 0$$

$$e[6] = 13320$$

$$e[6] = m[6] * (h[6] - h[5])$$

$$s[5] = \text{entropy}(\text{water}; P=P[0]; T=T[5])$$

$$s[6] = \text{entropy}(\text{water}; P=P[0]; T=T[6])$$

$$\text{" Fundamentos } b_f = m * (h - h^*) - T_0 (s - s^*) \text{"}$$

$$b[5] = m[5] * (((h[5] - h[5])) - (T[0] * (s[5] - s[5])))$$

$$\text{" Fundamentos } b_f = m * (h - h^*) - T_0 (s - s^*) \text{"}$$

$$b[6] = m[5] * (((h[6] - h[5])) - (T[0] * (s[6] - s[5])))$$

"7 - Perdas por radiação"

"Neste caso vamos determinar as perdas e_7, pelo Balanço de Energia:"

$$e[7] = e[1] + e[4] - e[2] - e[3] - e[5] - e[6] - e[8] - e[9]$$

"8 - Recuperação com fluido térmico para aquecimento"

"Dados: Calor na saída do aquecedor - fluido térmico"

$$e[8] = 1800 \text{ [kW]}$$

$$T[8] = 463 \text{ [K]} \text{ "190 °C"}$$

"Calculo do Delta T entre fluido térmico na saída e no retorno, Cp a 150 °C = 2385 J/Kg para vazão de 75 m3/h com densidade 860 kg/m3"

$$DT = (e[8] * 1000 * 3600) / (75 * 860 * 2385)$$

"Cálculo da temperatura de retorno do fluido térmico"

$$TR = T[8] - DT$$

" Cálculo da DTML entre T[8] e TR"

$$DTML = DT / (\ln (T[8] / TR))$$

" Cálculo da exergia no ponto 8, pela exergia associada taxa de transferência

de calor do fluido térmico entre T[8] e TR considerado retorno de fluido

térmico na temperatura DTML = 441,6 K ou 168,6 °C - com a expressão: $Bq = Q (1 - T_o / T)$ "

" desprezada exergia do retorno"

$$b[8] = e[8] * (1 - T[0] / DTML)$$

" 9 - Gás da chaminé"

" Cp do gas de chaminé dado por MAN = 1,05 kJ/kg.°C para a faixa de 150-200 °C"

$$Cp_9 = 1,05$$

" Dado - vazão mássica na saída da chaminé"

$$m[9] = 55,78$$

" Dado - Temperatura na saída da chaminé"

$$T[9] = 433 [K] \text{ "160 [C]"} "$$

" Dado - Pressão na saída da chaminé - atmosférica"

$$p[9] = P[0]$$

$$Q_9 = m[9] * Cp_9 * (T[9] - T[0])$$

$$e[9] = Q_9$$

$$h[9] = \text{enthalpy}(\text{air}; T = T[9])$$

$$s[9] = \text{entropy}(\text{air}; P = P[0]; T = T[9])$$

" Cálculo da Exergia do fluxo na saída da chaminé"

" Calculado como gas ideal "

$$b[9] = m[9] * Cp_9 * ((T[9] - T[0]) - T[0] * \ln(T[9] / T[0])) + (R \# * T[0] * \ln(P[9] / P[0]))$$

" Análise Energética:"

$$eta_e = ((e[3] + e[8]) / (e[1] + e[4])) * 100$$

$$\eta_{\text{energ}} = 50,54 \%$$

" Análise Exergética:"

" Balanço de Exergia"

$$b[7] = b[1] + b[4] - b[2] - b[3] - b[5] - b[6] - b[8] - b[9]$$

$$eta_b = ((b[3] + b[8]) / (b[1] + b[4])) * 100$$

$$\eta_{\text{exerg}} = 46,83 \%$$

2) Relatório do programa EES, para as simulações da seção Simulação de Configurações Alternativas:

"Avaliação Global de máquinas do navio - Simulação de diversas condições e tecnologias com diferentes combustíveis, fóssil e renovável"

"Condição 1 - Navio exemplo conforme original - combustível fóssil"

Pot1 = 21930 [kW] "Potência requerida do MCP + 1 MCA - navio exemplo original"
 Mcomb%[1] = 100 "Consumo percentual de combustível fóssil em relação ao original"
 PotF[1] = Pot1 "Potência com combustível fóssil"
 PotAd[1] = 0 "Potência adicionada"
 PotR[1] = 0 "Potência com combustível renovável"

"Condição 2 - Navio exemplo, adotando melhorias de rendimento totalizando 10%"
 "por exemplo com aplicação das seguintes medidas: flaps de popa, limpeza de casco/hélice e pintura especial, otimização do hélice e mudança do MCP para tipo ME"

Mcomb%[2] = Mcomb%[1] - 10 "Consumo percentual de combustível fóssil em relação ao original"
 PotF[2] = PotF[1] * Mcomb%[2]/100 "Potência requerida do MCP - navio exemplo após melhorias"
 PotAd[2] = 0 "Potência adicionada"
 PotR[2] = 0 "Potência com combustível renovável"

"Condição 3- Navio exemplo com 100% de substituição do MCP por Células de combustível e motor elétrico - ainda usando combustível fóssil nas células de combustível – Relação rendimentos célula de combustível / motor diesel = 0,75/0,5"

Mcomb%[3] = Mcomb%[2] * 0,5/0,75
 PotF[3] = PotF[2]
 PotAd[3] = 0 "Potência adicionada"
 PotR[3] = 0

"Condição 4- Navio exemplo com 100% de substituição do MCP por Células de combustível e motor elétrico - mas usando combustível renovável para alimentação das células de combustível - 100% renovável"

Mcomb%[4] = Mcomb%[2] * 0,5/0,75
 PotF[4] = 0
 PotAd[4] = 0 "Potência adicionada"
 PotR[4] = PotF[2]

"Condição 5 - Navio exemplo com 100% de substituição do combustível fóssil por Biodiesel - 100% renovável"

Mcomb%[5] = Mcomb%[1] - 10
 "Consumo percentual de combustível em relação ao original"

$PotF[5] = 0$ "Potência requerida do MCP - navio exemplo após melhorias –
 desprezadas as diferenças de PCI"
 $PotAd[5] = 0$ "Potência adicionada"
 $PotR[5] = PotF[1] * Mcomb\%[2]/100$

"Condição 6 - Navio exemplo com tecnologias mescladas, considerando: (MCP com combustível fóssil mas com redução de consumo de 10% por melhorias da condição 1)F + (Eólico de 20% adicional+ Solar = zero + Células de Combustível nos MCA´s 5%)R"

$PotAd[6] = PotF[2] * 0,2$ "Potência adicionada por kites, 20% da potência total"
 $PotR[6] = PotAd[6] + PotF[2] * 0,05$
 $PotF[6] = PotF[2] - PotR[6]$
 $Mcomb\%[6] = Mcomb\%[2] * 0,75 + Mcomb\%[2] * 0,05 * 0,5/0,75$