



MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

CAROLINE VIEIRA BARROS



**POLÍTICA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA PROPULSÃO EM EMBARCAÇÕES
MERCANTES**

RIO DE JANEIRO

2014

CAROLINE VIEIRA BARROS

**POLÍTICA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA PROPULSÃO EM EMBARCAÇÕES
MERCANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador (a): Professor Hermann Regazzi Gerk

RIO DE JANEIRO

2014

CAROLINE VIEIRA BARROS

POLÍTICA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA PROPULSÃO EM EMBARCAÇÕES
MERCANTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: Prof. Esp. Hermann Regazzi Gerke

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que mais amo na vida, minha mãe Greice A. P. A. Vieira Barros e meu pai Domingos Jonas Vieira Barros, que tanto deram de suas vidas para que a minha obtivesse sucesso. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

De todo o meu coração, sou grata a Deus por todas as bênçãos na minha vida. Agradeço também à prof. MSc. Greice A. P. A. Vieira Barros e ao prof. Esp. Hermann Regazzi Gerk por esforço e dedicação indispensáveis para a realização deste trabalho.

“Escolhe um trabalho de que gostes, e não terás que trabalhar nem um dia na tua vida.”

(Confúcio)

RESUMO

Este trabalho explana e comprova a eficiência dos métodos atuais encontrados para tornar a embarcação mercante mais eficiente. Conceitua eficiência energética e expõe as legislações relacionadas à política da eficiência energética da propulsão, que priorizam controlar a emissão de gases poluentes atmosféricos através da limitação de índices de emissão e emissão de certificados. Discriminam-se os problemas enfrentados pela propulsão do navio, tais como, vibrações e resistências ao avanço, e identificam-se os recursos disponíveis para minimizá-los dispondo de alguns estudos de caso. Além de todos esses fatores relativos a gases poluentes e à hidrodinâmica da embarcação, este trabalho também analisa dados numéricos a respeito do retorno financeiro da implantação de alguns dispositivos de incremento de propulsão mais rentáveis. A política da eficiência da propulsão não se limita somente ao projeto da embarcação, é imperativo considerar os procedimentos a bordo, de responsabilidade dos tripulantes, para manter essa política.

Palavras-chave: Eficiência energética; Propulsão; Economia; Combustível; Gases poluentes; Lucro; Vantagens.

ABSTRACT

This paper explains and proves the efficiency of current methods available to construct the most efficient merchant vessel. Conceptualizes energy efficiency and exposes the laws related to the energy efficiency of propulsion which prioritize atmospheric polluting gases emission control by limiting emission rates and issuance certificate policy. Discriminates the problems faced by the propulsion of the ship, such as vibration and resistance to progress, and identifies available resources to minimize them using some case studies as well. Apart from all these factors, atmospheric polluting gases and the hydrodynamics of the vessel, this paper also provides numerical analysis regarding financial returns from deployment of some propulsion increased devices more profitable. The politics of the efficiency of propulsion is not only limited to the design of the vessel, it is imperative to consider the procedures on board the responsibility of the crew to maintain this policy.

Keywords: Energy efficiency; Propulsion; Economy; Fuel; Polluting gases; Profit; Advantages.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Tipos de ruídos oriundos de embarcações mercantes.	19
Figura 2	Tubo Kort	25
Figura 3	Duto Schneekluth aplicado a um navio de 207,40 metros	25
Figura 4	Duto Becker Mewis	26
Figura 5	Popa de navio norueguês em teste em CFD	28
Figura 6	Proa bulbosa: ondas de proa (azul claro) e ondas criadas pelo bulbo (roxo)	29
Figura 7	Comparação da eficiência de uma proa bulbosa com uma proa sem bulbo.	29
Figura 8	Medidas do propulsor recomendadas pela Sociedade Classificadora Det Norske Veritas para um navio de um único hélice	32
Figura 9	Rake nas pás do propulsor. Passo Constante (à esquerda) e Passo Progressivo (à direita)	33
Figura 10	Vista lateral da pá do hélice	33
Figura 11	A medida do skew em um propulsor de 5 pás	33
Figura 12	Propulsor de Hélices Gêmeas	38
Figura 13	Propulsor com hélices contrarrotativas de mesmo eixo (coaxial)	39
Figura 14	Propulsor tipo azipod operando frente a um propulsor convencional com rotação contrária	39
Figura 15	Gráfico comparativo da eficiência energética de navios dotados de Duto Schneekluth e navios sem o duto.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Exemplos de medidas para aumentar a eficiência da propulsão	24
Tabela 2	Vantagens e Desvantagens do Propulsor Voith-Schneider	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	POLÍTICA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	13
	2.1 MARPOL - Anexo VI	13
	2.2 O EEDI	15
	2.3 O SEEMP	15
	2.4 O EEOI	16
3	IDENTIFICANDO O PROBLEMA: fatores que reduzem a eficiência do propulsor	17
	3.1 Vibrações	17
	3.2 Cavitação	18
	3.3 Ruídos Subaquáticos	19
	3.4 Fluxo de água descontínuo no hélice	20
	3.5 Resistências	21
4	EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE PROPULSÃO	22
5	POSSÍVEIS SOLUÇÕES: minimizando os problemas	23
	5.1 Tubo Kort	24
	5.2 Duto Schneekluth (Wake Equalising Duct – WED)	25
	5.3 Duto Becker Mewis	26
	5.4 Design do casco e CFD	27
	5.4.1 Bulbo de Proa (<i>Bulbous Bow</i>)	29
	5.4.2 Design da Popa Otimizada	30
	5.5 Melhoria da interação de navio, propulsor e leme (fluidez)	30
6	AUMENTANDO A EFICIÊNCIA: Alterações nos Propulsores	31
	6.1 Dimensões e Formas ideais do propulsor helicoidal	31
	6.1.1 Medidas ideais do propulsor helicoidal	31
	6.1.2 Rake	33
	6.1.3 Cup	33

6.1.4 Skew	33
6.1.5 Propulsor end-plates (CLT)	34
6.2 Hélices Kappel	34
6.3 Hélice de Materiais Compósitos	34
6.4 Propeller Boss Cap Fins (PBCF)	35
6.5 Propulsor de Passo Controlável	36
6.6 Azipod	36
6.7 Propulsor Voith-Schneider	36
6.8 Propulsor de Hélices Gêmeas	37
6.9 Propulsor com Hélices Contra-Rotativas (Azipod CRP)	39
6.10 Permanent Magnet	40
6.11 Hélice CLT	41
6.12 Estudo de caso	41
7 ASPECTO FINANCEIRO DA POLÍTICA ENERGÉTICA	43
7.1 Calculando retornos de investimentos	44
7.2 Utilizando Dispositivos Equalizadores de Esteira	44
7.2.1 Duto Schneekluth	44
7.2.2 Duto Mewis	46
8 NAVEGAÇÃO E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	47
8.1 Velocidade ideal constante	47
8.2 Calado ideal e a Estabilidade	48
8.3 Registro Computadorizado	49
8.4 Frequências ressonantes	49
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
11 GLOSSÁRIO	55

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo consta do Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Ciências Náuticas da Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante, cujo objeto de estudo é os problemas hidrodinâmicos e mecânicos da propulsão de embarcações mercantes e a poluição atmosférica pela emissão de gases oriundos de navios.

O investimento na eficiência energética da propulsão em embarcações mercantes se mostra decisivo para a minimização desses problemas. Com a crescente demanda do comércio internacional, a indústria naval teve a necessidade de expandir seus navios a fim de transportar mais mercadorias em menos tempo. Para isso, foi imperativo o investimento em novos sistemas de propulsão mais eficientes: dispositivos de incremento da propulsão, novos tipos de propulsores, testes de casco, etc. E ser um navio eficiente engloba os fatores: emissão de poluentes, qualidade do combustível, economia de combustível e tempo de viagem. Nessa conjuntura, este trabalho objetiva definir eficiência energética, conhecer a legislação relacionada à política da eficiência energética da propulsão, identificar os problemas da propulsão do navio, identificar recursos disponíveis para minimizar os problemas da propulsão (tipos de sistemas de propulsão, dispositivos de incremento da propulsão, novos tipos de propulsores), investigar a viabilidade econômica da implantação de alguns dispositivos de incremento de propulsão e identificar as maneiras encontradas pelo oficial de náutica a bordo para melhorar a eficiência energética da embarcação. Além de se aperfeiçoar os padrões hidrodinâmicos do navio, o fator lucro também deve ser observado com cuidado, pois, afinal, sem lucro do transportador, não há transporte.

2. POLÍTICA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Eficiência Energética é a mínima relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização. Assim como, é a capacidade de se obter melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia (CELPE, 2013).

Uma máxima eficiência energética requer um gasto mínimo de combustível mantendo, ainda, o navio operando com seu melhor desempenho. Há diversas formas de se medir a eficiência de um navio, seja pela sua qualidade hidrodinâmica, seja pela concentração de gases poluentes emitidos pelos navios devido à qualidade do combustível e à da queima nos motores.

2.1. MARPOL - Anexo VI

O comércio mundial tem aumentado com taxas crescentes nos últimos anos. O elevado ritmo de crescimento da economia de países emergentes é o principal responsável por este crescimento. Como consequência do aumento do comércio mundial, verifica-se um correspondente aumento do transporte marítimo e, por conseguinte, uma progressiva carga de poluentes expelida por esse modal de transporte.

Seguindo a orientação da ONU e acompanhando a tendência global de preocupação com as mudanças climáticas, a IMO tem dedicado uma grande parte de seus esforços à prevenção da poluição do ar pelos navios. Assim, em 1997, a IMO incorporou à Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) um novo Anexo (VI), cujo propósito é prevenir a poluição do ar por meio da limitação das emissões de óxido de nitrogênio (NO_x), do teor de óxido de enxofre (SO_x) no óleo combustível utilizado a bordo dos navios mercantes, e da proibição de emissões deliberadas de substâncias que reduzem a camada de ozônio e contribuem para o aumento do efeito estufa. O Anexo VI entrou em vigor internacionalmente em maio de 2005, o Brasil o ratificou em fevereiro de 2010.

Em outubro de 2008, o MEPC adotou emendas ao Anexo VI da MARPOL para reduzir ainda mais a poluição oriunda de navios. Foi adotada uma redução progressiva do teor de SO_x no combustível utilizado em embarcações mercantes: inicialmente de 4,50% para 3,50% a partir de 01 janeiro 2012, e será de 0,50 %, a partir de 01 de janeiro de 2020, sujeito a uma análise de viabilidade a ser concluída antes de 2018. Os limites aplicáveis do teor de SO_x no combustível, ao navegar em Áreas de Controle de Emissão, foram reduzidos de 1,50% para 1,00%, em 01 de julho de 2010, e serão reduzidos para 0,10%, a partir de 01 de janeiro de 2015. Reduções progressivas de NO_x nas emissões de motores marítimos também foram acordadas. O Anexo VI, revisto, entrou em vigor em 01 de Julho de 2010.

Ao mesmo tempo, a IMO, através do MEPC, iniciou estudos a respeito dos gases geradores de efeito estufa, *greenhouse gases* – GHG, que são gases com a capacidade de reter calor e que, por isso, alteram o equilíbrio térmico e climático da Terra –, verificando que é possível para o transporte marítimo reduzir a quantidade de gás carbônico emitido por tonelada de carga transportada por quilômetro (t/km), em algo próximo de 20% até 2020. Com isso, em 15 de julho de 2011, o MEPC adotou, por meio da Resolução MEPC. 203(62), novas emendas ao Anexo VI. Essas emendas, que incluem um novo Capítulo (4), pretendem melhorar a eficiência energética dos navios através de um conjunto de normas de desempenho técnico, que resultariam na redução das emissões das substâncias originadas na combustão do óleo combustível, incluindo aquelas já controladas pelo Anexo VI.

Para atender a essa expectativa, o MEPC desenvolveu, para novos navios, um Indicador de Eficiência Operacional de Energia (EEOI), um Plano de Gestão de Eficiência Energética (SEEMP) e um Sistema de Índices de Eficiência Energética de Projeto (EEDI).

2.2. O EEDI

O EEDI é uma fórmula matemática que fornece uma figura de eficiência energética específica para um projeto de navio individual, expressa em gramas de CO₂ por capacidade de milhas. O EEDI aplica-se apenas a navios novos e quanto menor o seu valor, mais eficiente é a arquitetura do navio em termos energéticos. Com esse objetivo, deverão ser priorizados melhoramentos na hidrodinâmica dos cascos, no desempenho dos motores e hélices, bem como a utilização de combustíveis menos poluentes e com um melhor rendimento.

Os requisitos EEDI serão aplicáveis aos novos navios acima de 400 AB (*GT*), onde "Navio novo" significa um navio:

- 1) para o qual o contrato de construção seja assinado em 1º de janeiro de 2013 ou depois; ou
 - 2) na ausência de um contrato de construção, cuja quilha tenha sido batida ou esteja num estágio de construção semelhante em 1º de julho de 2013 ou depois; ou
 - 3) cuja entrega tenha sido feita em 1º de julho de 2015 ou depois.
- (MEPC.203(62)p, 2013, p. 1)

2.3. O SEEMP

O Plano de Gestão da Eficiência Energética do Navio (SEEMP) fornece uma abordagem no plano de gestão da frota ao longo do tempo de sua vida útil, permitindo às companhias acompanhar e melhorar o desempenho de vários fatores que podem contribuir para a redução das emissões de CO₂, tais como o planejamento da viagem, o gerenciamento da velocidade, a otimização da potência dos motores, a manutenção do casco e o uso de diferentes tipos de combustíveis. Além de incentivar o proprietário do navio, em cada fase do plano, a considerar novas tecnologias quando se busca otimizar o desempenho do navio. O SEEMP é obrigatório para todos os navios com mais de 400 AB (*GT*) e a data de entrada em vigor foi a mesma que para o EEDI (1 de Janeiro de 2013).

2.4. O EEOI

O MEPC desenvolveu orientações para o uso voluntário do Indicador de Eficiência Energética Operacional (EEOI) do navio como ferramenta de monitoramento do rendimento energético em cada viagem do navio, ou durante certo período de tempo, o que ajudará os armadores e operadores de navios na avaliação do desempenho operacional de sua frota. Como a quantidade de CO₂ emitida por navios está diretamente relacionada ao consumo de óleo combustível, o EEOI também pode fornecer informações úteis sobre o desempenho de um navio tendo como referência a eficiência do combustível.

Ao contrário do EEDI, o EEOI muda de acordo com as condições de operação, fornecendo assim, valores distintos a cada viagem. A unidade de medição depende da carga transportada, mas, em geral, são gramas de CO₂ por tonelada-milha ou gramas de CO₂ por TEU-milha, que é calculado a partir da quantidade de CO₂ emitido pela queima do combustível e do trabalho realizado pela carga, assim como a seguir:

- Cálculo do CO₂: multiplicação da massa de combustível pelo fator de conversão para CO₂ deste combustível.
- Cálculo do trabalho do transporte da carga: multiplicação da massa de carga por milha navegada.

3. IDENTIFICANDO O PROBLEMA: fatores que reduzem a eficiência do propulsor

Assim como definido no Capítulo 2 deste trabalho, eficiência energética é a capacidade de se obter melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia (CELPE, 2013). Ou seja, para se maximizar a eficiência, deve-se minimizar as perdas. No caso de uma embarcação mercante, para se obter o maior rendimento da propulsão é necessário, primeiramente, identificar seus problemas que causam perdas energéticas e, posteriormente, reduzi-los ou anulá-los.

O meio no qual o navio está imerso é instável, portanto, há fenômenos que desperdiçam a energia do navio, tais como, ruídos subaquáticos, vibrações e resistências ao avanço da embarcação, cujos prejuízos à propulsão estão detalhados neste capítulo.

3.1. Vibrações

Vibrações podem perturbar as pessoas a bordo e também causar fraturas por fadiga na embarcação. Com isso, torna-se importante o estudo dos momentos de ressonância do navio, e os pontos mais estudados são o hélice, o eixo, a caixa redutora e o próprio MCP (motor de combustão principal).

O motor diesel marítimo, especialmente o de dois tempos, é uma fonte de excitação periódica com efeitos vibratórios excessivos para a estrutura primária do navio. Essas forças de excitação podem ser devido à explosão dos gases nos cilindros e às forças inerciais dos órgãos rotativos do motor, que provocam forças e momentos de desequilíbrio internos (oriundos dos desalinhamentos ou folgas excessivas dos órgãos rotacionais) e forças e momentos de desequilíbrio livres (oriundos da ação dos gases nos cilindros dos motores).

As forças e momentos de desequilíbrio livres são as principais fontes de excitação periódica proveniente dos motores diesel geradores. Através de uma seleção criteriosa dos parâmetros de rigidez e amortecimento desses dispositivos consegue-se normalmente alcançar excelentes resultados.

Definição, causa e como evitar os efeitos da ressonância em uma embarcação são

assuntos tratados no item 8.4 (Capítulo 8) desta obra.

3.2. Cavitação

Cavitação é o fenômeno decorrente da formação de bolhas de vapor nas regiões de baixas pressões que se formam próximo à superfície do hélice. Geralmente, esse fenômeno acontece no aumento exagerado de rotações com a formação de espuma na popa e nas proximidades do hélice na superfície. Quando existe uma velocidade relativa muito alta entre o ambiente aquático no qual o navio está inserido e o hélice, o líquido fica cheio de cavidades correspondentes às bolhas de vapor formadas. Essas bolhas, em razão do fluxo, são carregadas para regiões de altas pressões onde sofrem colapso e implodem. Pelo princípio da conservação de energia, a implosão das bolhas cria ondas de choque que, ao incidirem em qualquer superfície sólida provocam ruídos, trepidação e avarias no propulsor, além disso, a cavitação provoca perda de tração do hélice, erosão das pás devido à energia liberada pela implosão das bolhas de vapor, e vibrações no casco.

Esse fenômeno pode ser evitado anulando suas causas, que são: irregularidade na aresta ou bordo de ataque das pás do propulsor, porosidade na superfície da pá, *cup* em excesso, pá mal projetada, hélice parcialmente submerso, mau tempo, ventilação do hélice. Outras formas de solucionar a cavitação são:

- hélices desenhados para manter um mínimo de cavitação, ou seja, ao modificar o passo original, deve-se atentar aos procedimentos realizados nas modificações de hélices;

- de maneira resumida e simplificada somente modificar as áreas próximas ao bordo de ataque em intervenções progressivas (“*cupping*” ou curvamento), dessa forma, o bordo de ataque vai entrar na água nesse novo ângulo e à medida que a água passar pelo bordo, o passo da pá aumentará progressivamente produzindo um maior empuxo ou thrust de água, atentando também ao fato de que dobrar toda a pá ou todo o bordo de ataque costuma causar mais problemas que vantagens (*cup* em excesso).

3.3. Ruídos Subaquáticos

Os ruídos são ondas mecânicas transportadas pelo ar, pelas estruturas do navio e pela água, eles são oriundos essencialmente do funcionamento de motor de combustão interna (MCI), geradores, exaustores, thrusters e propulsores.

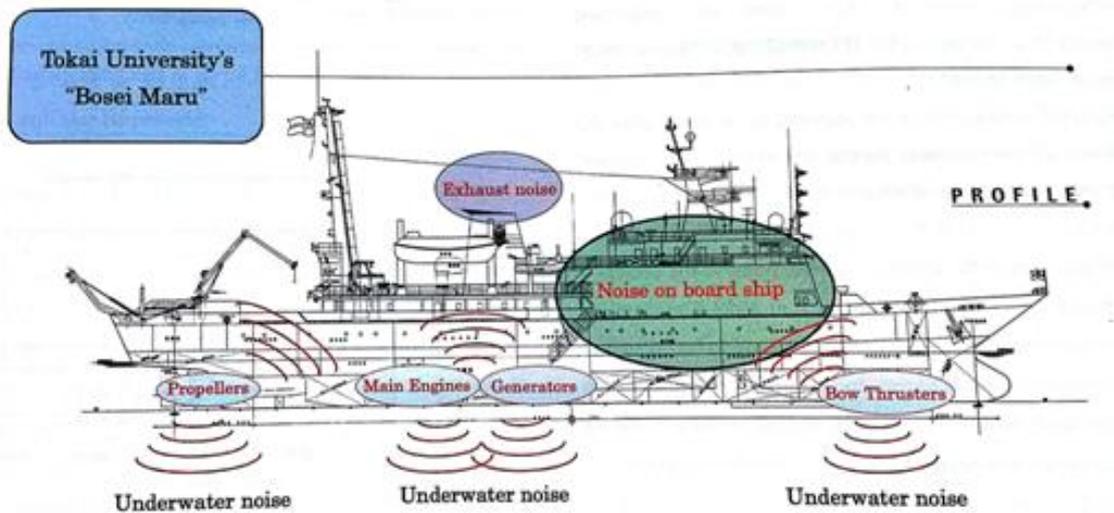


Figura 1 Tipos de ruídos oriundos de embarcações mercantes. Fonte: SHURI, HIDEYUKI. Development of Noise Prediction Programs for Acoustic Ship Designs. ClassNK TECHNICAL BULLETIN, NIPPON KAIJI KYOKAI, Vol. 31, Dec, 2013, 4 p.

Esses ruídos contribuem para o desconforto dos tripulantes e passageiros, principalmente quando os camarotes são posicionados na popa (próximo aos propulsores) ou próximos à praça de máquinas do navio - assunto de saúde tratado na Resolução A.468 (XIII) da IMO. Ruídos podem ser os responsáveis por:

- funcionamento deficiente de equipamentos acústicos instalados abaixo da quilha em navios de pesquisa,
- incapacidade de um navio de guerra manter-se indetectável e,
- causar danos à fauna aquática, pois golfinhos e baleias, por exemplo, são muito sensíveis a esse tipo de estímulo.

Esse assunto é de grande importância para IMO, por isso, em 2012, na MSC91, aprovaram-se emendas ao Code on Noise Levels on Board Ships (the Noise Code) e à Convenção SOLAS sobre a obrigatoriedade do cumprimento dos limites máximos de ruídos permitidos a bordo das embarcações mercantes.

Instituições renomadas, tais como, Det Norske Veritas (DNV), TNO (International Symposium Acoustics, 1976), Shipbuilding Association of Japan, ClassNK (Guide to Ship Noise Control), dentre outras estudam a origem dos ruídos, como medi-los, seus prejuízos e maneiras de suprimi-los. SEA (Statistical Energy Analysis), por exemplo, é um método de se analisar a origem dos ruídos desenvolvido por J. O. Jensen, T. Kihlman e J. Plunt, em 1976, e até hoje se mostra eficiente.

Os ruídos (ondas mecânicas), ao se propagarem pela estrutura do navio, provocam vibrações, que é um dos maiores prejuízos à navegabilidade, cujas medidas reparadoras estão descritas nos itens 3.1 e 8.4 dessa obra.

3.4. Fluxo de água descontínuo no hélice

Com um único propulsor, o Fator de Esteira se torna diferente para as pás do propulsor quando se encontram na posição de 12 horas (ponto morto superior) e na posição de 6 horas (ponto morto inferior). Na parte superior do hélice, o próprio casco do navio se torna uma barreira para a chegada da água ao hélice propulsor, o que não acontece nas pás que se situam na parte inferior do propulsor, onde a água possui um caminho livre abaixo da quilha. Isso determina carregamentos mecânicos diferenciais e que se alternam para cada pá do propulsor em função de sua rotação. Essa diferença de fluxo de água nas partes superior e inferior do hélice podem causar vibrações e rápido desgaste das pás. Com isso, são geradas ondas de choque que se transmitem pela água e pelos rolamentos do eixo até o casco.

Para certos valores de rpm do propulsor, essas ondas de choque entram em ressonância com a frequência natural do casco causando incômodo maior quando as acomodações estão posicionadas a ré, além de riscos de avarias por fadiga em toda a embarcação. Possíveis medidas para melhorar o desempenho do *single propeller*: reduzir o fator de esteira (W_f); utilizar skeg, que aprofunda o propulsor; utilizar um sistema de dois hélices, dois lemes e skeg duplo; utilizar um dispositivo equalizador de esteira adequado ao navio; evitar RPM ressoantes durante a operação do propulsor. O fluxo uniforme de água no hélice reduz as vibrações nas pás.

3.5. Resistências

Há essencialmente quatro tipos de resistências que influem na propulsão do navio.

- **Resistência Viscosa** (resistência de superfície e de forma): é a que tem maior interferência na resistência total que o navio possui.

- **Resistência de Forma** (blunt x streamlined vessel): Um navio rombudo apresenta grande resistência de forma, pois o seu formato facilita o rápido desprendimento da camada limite na popa do navio causando vórtices na esteira (Efeito Coanda). Quanto maior a resistência de forma, maior é a energia dissipada em vórtices.

- **Resistência a Ondas**: resistência causada pelo impacto das ondas no casco do navio.

- **Resistência ao Vento**: resistência causada pelo impacto do vento no navio, essa resistência não influencia tanto quanto a de ondas.

- **Resistência de Apêndices**: relacionada ao arrasto gerado pelos dispositivos atrelados ao casco. Os seguintes artifícios podem ser utilizados a fim de reduzir a resistência de apêndices e, simultaneamente, potencializar a propulsão: dois propulsores azimutais (dois azipods), duas hélices gêmeas, hélices contra-rotativos, skeg duplo (excelente desempenho em navios com alto coeficiente de bloco, grande boca e pequeno calado).

A fim de reduzir os efeitos da Resistência dos navios, primeiramente, deve-se escolher dimensões adequadas para os equipamentos envolvidos, e essas dimensões dependem do coeficiente de bloco do navio. A forma do navio é otimizada somente para diminuir as resistências.

4. EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE PROPULSÃO

Ao efetuar o projeto do sistema de propulsão de um navio de nova construção, os armadores e os estaleiros devem se concentrar nos seguintes aspectos da instalação: utilização do espaço a bordo (mínimo possível para sobrar mais espaço para carga e camarotes), confiabilidade, custos de manutenção e aspectos do meio ambiente. A seguir, estão apresentadas as vantagens da propulsão elétrica mediante a propulsão mecânica convencional (à combustão diesel):

- Flexibilidade de distribuição dos componentes permitindo a redundância;
- Não são necessários motores auxiliares, o que resulta na redução de equipamentos instalados;
- Não é necessário haver o alinhamento das máquinas acionadoras principais com as linhas de eixo, tornando desnecessária a utilização de engrenagens redutoras;
- Redução dos níveis de ruídos e vibrações, além disso, os motores elétricos apresentam assinaturas acústicas menores;
- Redução dos custos de instalação e de manutenção;
- Redução na emissão de poluentes atmosféricos, atendendo ao Anexo VI da MARPOL;
- Aumento na vida útil das embarcações.

Há também a possibilidade de se utilizar Turbina a Gás como gerador de energia elétrica. No maior transatlântico construído até a atualidade, o Queen Mary II, da Carnival Corporation & plc construído por STX Europe Chantiers de l'Atlantique, turbinas a gás são utilizadas para aumentar a potência gerada pelo navio quando potência extra aos quatro motores a diesel é necessária para mover seus quatro pods elétricos de propulsão. Por isso, as velocidades máxima de 30 nós e de cruzeiro de 26 nós, do Queen Mary II, são diferenciadas dos demais navios de cruzeiro como o MS Oasis of the Seas, que tem velocidade média de 22 nós. (O Propulsor, Lisboa, nº 33, Maio-Jun 2003, 53-56 p.)

5. POSSÍVEIS SOLUÇÕES: minimizando os problemas

Apesar dos novos desenhos e projetos de casco e as modificações estruturais introduzidas nas pás dos hélices, os problemas relacionados com a hidrodinâmica nas esteiras das embarcações continuam, sendo mais percebidos nos navios que apresentam grandes coeficientes de bloco. Os campos das esteiras, onde os propulsores atuam, caracterizam-se por serem campos não uniformes de velocidade e pressão capazes de provocar solicitações mecânicas intermitentes nas pás que induzem vibrações mecânicas indesejáveis, podendo produzir ressonância no casco, e também resultar em cavitação intermitente nas pás.

Tendo em vista os atuais recursos computacionais de simulação oferecidos pelo CFD (computational fluid dynamics), como também a utilização das técnicas de modelos reduzidos e de protótipos testados nos modernos tanques de provas, várias empresas estão desenvolvendo e produzindo os denominados Dispositivos Equalizadores de Esteira. O emprego desses dispositivos conduz a melhores eficiências de propulsão, e por consequência, menores consumos de combustível, acarretando redução na emissão de poluentes atmosféricos, advindo um ganho ambiental importante, conforme o disposto no Anexo VI da MARPOL. É importante acrescentar que a utilização de qualquer dispositivo equalizador de esteira não significa correção de nenhum defeito estrutural ou de construção, mas, sim, um aperfeiçoamento ou um ganho na hidrodinâmica no campo das esteiras.

Poucos Armadores despendem tempo e dinheiro investindo na melhoria da interação navio, propulsor e leme. Quando o navio atinge resultados satisfatórios nos testes de resistência e propulsão o Armador não tem mais interesse em melhorar a esteira por modificações na popa do navio. (HSVA NewsWave, The Hamburg Ship Model Basin Newsletter, 2006/1).

Na Tabela 1, a seguir, é possível analisar cada medida e podendo-se alcançar uma redução de até 50% dessas perdas, melhorando, assim, a eficiência da propulsão.

Tabela 1 Exemplos de medidas para aumentar a eficiência da propulsão. Fonte: SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V. Ship Design for Efficiency & Economy. 2 Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1998. Tradução Livre.

PERDAS	MEDIDAS	MELHORIA
Separações na popa	Schneekluth – nozzle	Até 4% de energia
	Grothues – spoiler	Até 3% de energia
	Fins (Peters/Mewis)	Até 3% de energia
	Vortex generator	Perdas até 2% para ótimo arranjo, e reduz pressão dos pulsos até 50%
Por Fricção	Reduzir a área do propulsor ao seu mínimo. Isso só é possível quando o propulsor opera em uma esteira otimizada.	Depende da área do propulsor
Rotacionais	Pre-swirl-fins	Até 5% de energia
	Rudder fins	Até 5% de energia
	Twisted Rudder	Até 2% de energia
	Twisted Rudder (com Bulbo Costa)	Até 4% de energia
Jato Axial	Grim's vane wheel	Até 9% de energia
Hub vortex	Efficiency Rudders	Até 6% de energia
	Bulbo Costa	Até 3% de energia
	Boss Cap Fins (PBCB)	Até 3% de energia
	Divergent propeller cap	Até 2% de energia

5.1. Tubo Kort

Tubo fixo que envolve o hélice organizando o fluxo de descarga, aumentando a aceleração da água e possibilitando um ganho de tração avante de até 30%.

São utilizados em rebocadores, barcos de apoio, etc. e necessitam de lemes, com flaps opcionais.

Com o navio em altas velocidades a resistência ao avanço do tubo (resistência de apêndice) contraria os benefícios do aumento de propulsão (cria mais arrasto em altas velocidades).

Com a utilização de tubos Kort, são atingidos consideráveis ganhos de empuxo e economia de combustível. Um rebocador com tubo Kort pode ter um aumento de até 40% de bollard pull em relação a outro com hélice convencional. Além da economia de combustível, o tubo Kort também proporciona maior velocidade final. Ele apresenta as seguintes vantagens: aumento do empuxo e bollard pull, maior eficiência da propulsão, proteção da hélice contra impactos, e menos vibração.

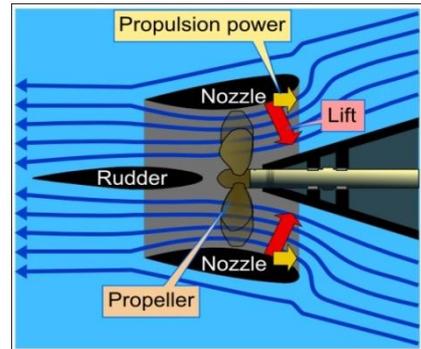


Figura 2 Tubo Kort

5.2. Duto Schneekluth (Wake Equalising Duct – WED)

Esse dispositivo pré-hélice criado pelo professor alemão Hebert Schneekluth consiste de um duto, posicionado avante do hélice, inclinado de um ângulo em relação ao plano da linha de centro que direciona o fluxo de água para parte superior do propulsor (nos dois terços superiores das pás do hélice, onde é mais efetivo), homogeneizando a esteira, assim, praticamente anulando o problema de um único propulsor (*single propeller*) descrito no item **3.4 Fluxo de água descontínuo no hélice**.

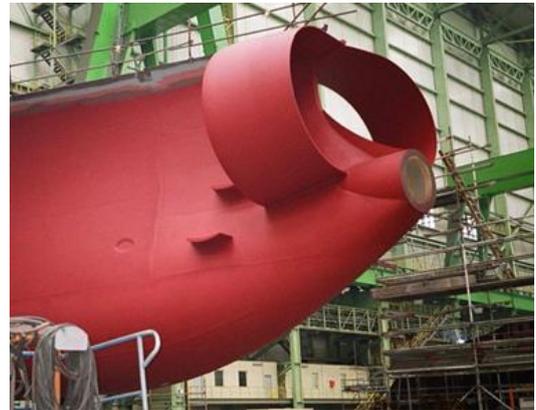


Figura 3 Duto Schneekluth aplicado a um navio de 207,40 metros

Ele acelera o fluxo por meio do lift gerado pela forma “D” de sua seção. Com a sua utilização, altas velocidades do navio requerem baixa rpm, o que acarreta economia de combustível. O fluxo uniforme de água no hélice também reduz as vibrações ao diminuir as cargas nas seções superiores das pás. O tamanho, forma e posição são

determinados pelas características do casco do navio em questão. Duto Schneekluth, assim como o Duto Mewis, é adequado para navios de grande porte, com alto coeficiente de bloco.

Ele é comercializado desde 1986 e continua atraindo o interesse dos projetistas que procuram melhorar o rendimento do hélice e reduzir vibrações. É possível evitar modificações caras e muito complexas nas partes estruturais de aço com o objetivo de atingir correções de frequências de ressonância se as vibrações forem fora do normal. Então, adaptar o navio com esse duto se prova muito mais eficiente do que se aventurar em modificar a parte estrutural do navio com sua superestrutura pronta. Mas não se pode criar uma expectativa muito alta, pois os méritos para atingir tal performance depende da individualidade da configuração de cada embarcação no campo de sua esteira. É importante salientar que esse duto não é uma correção de defeitos, mas sim, uma otimização hidrodinâmica: *“The duct on ship is a hydrodynamic upgrading and not a correction of faults” H. Schneekluth, 1998.*

5.3. Duto Becker Mewis

Esse duto pré-hélice pode não ser simétrico ao eixo. Uma de suas finalidades é homogeneizar a componente axial da esteira. O duto aumenta a eficiência da aleta pré-hélice ao prover um maior fluxo de água para o estator e contribui ainda para o *thrust* total através da geração de uma força de sustentação (lift) sobre suas paredes.



Figura 4 Duto Becker Mewis

É utilizado em navios com grandes coeficientes de bloco, tais como graneleiros, navios tanque e porta-contêineres, em que seus propulsores operam em campos de esteiras desfavoráveis. O modelo de teste do Duto Mewis atingiu uma velocidade de 16,45 nós o que equivale a uma economia de potência de 4,5%. Como resultado, o protótipo teve sua velocidade aumentada para 17 nós, que corresponde a uma redução

de potência de aproximadamente 6%. Propicia ainda, economia de combustível e menor índice de emissão de poluentes atmosféricos.

5.4. Design do casco e CFD

Além dos dispositivos de incremento da propulsão e dispositivos equalizadores de esteira, o design do casco é um dos artifícios mais preciosos para melhorar a eficiência hidrodinâmica da embarcação, pois, uma vez bem definido, é ele que reduz as resistências ao avanço (resistência de superfície e de forma). E é o teste CFD que garante essa lapidação.

As linhas do casco influenciam decisivamente na resistência de forma da embarcação, resistência adicional durante a navegação, manobrabilidade, qualidade de manter o rumo, amortecimento do balanço (roll), volume dos porões, qualidade de fender o mar e chocar-se com as ondas (H. SCHNEEKLUTH, 1998.). Essas características devem ser otimizadas, uma vez que, quanto melhor a navegabilidade do navio, maior será a sua economia de energia da propulsão. As principais dimensões a serem analisadas são: length over all (Loa), boca, calado e coeficiente de bloco. Essas dimensões devem estar relacionadas de forma que a razão Loa por boca seja máximo; a razão boca por calado seja mínimo; e o coeficiente de bloco deve ser mínimo também. A primeira e a última relação estão relacionadas à economia de combustível.

A relação ideal de comprimento/largura é um compromisso entre a capacidade de carga, dimensões do porto e de consumo de combustível. Ao aumentar a relação comprimento/largura partindo de 4,5 a 6,5, pode-se alcançar uma redução de combustível de 25 a 50%. A experiência mostra que um aumento de comprimento total do navio tem pouca influência na energia necessária para obter semelhante velocidade com a forma anterior. Como exemplo, um bulbo de proa foi instalado no navio de pesca norueguês ResearchKy Stfangst e mostrou uma redução de resistência de 25% em tempo calmo, e de 15% em mar severo. A quantidade de água do mar que invade o convés também foi reduzida. Porém, a construção de uma proa bulbosa tem de ser bem calculada, pois ela aumenta a área molhada, o que agrava a resistência viscosa. Para que a utilização do

bulbo tenha vantagem, esse agravamento deverá ser menor que o ganho na resistência à onda.

Na situação acima, durante o projeto deste navio, o CFD apontou áreas de baixa pressão (tons avermelhados, na Figura 4), o que indica a criação de vórtice e, conseqüentemente, o descolamento da camada limite. A empresa Voith sugeriu ao estaleiro que a borda das chapas não fossem arredondadas, pois esse arredondamento estava gerando o problema. A sugestão foi aceita e o problema foi corrigido.

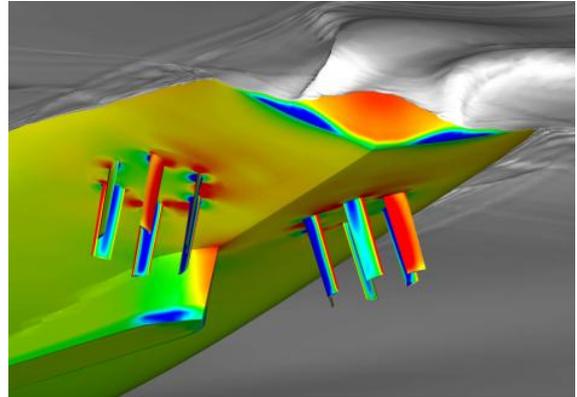


Figura 5 Popa de navio norueguês em teste em CFD

Atualmente, a construção de casco ainda não tem a atenção devida, pois poucas empresas no mundo se preocupam com tais efeitos hidrodinâmicos e fazem testes para assegurar um bom desempenho hidrodinâmico.

CFD é essencial para suportar modelos de teste com relação ao comportamento do protótipo do navio com seguimento. Em países como o Japão, por exemplo, não há navios que não sejam avaliados pelo CFD antes de serem construídos. Esse método é o mais barato e o mais rápido, porém, com uma precisão insuficiente, especialmente na previsão de energia requerida pela embarcação. Esse teste é usado na pré-seleção de variantes antes de testar e para estudar os detalhes hidrodinâmicos quando o navio está em movimento, a fim de descobrir como o design do casco do navio pode ser melhorado.

O design do navio é um dos maiores responsáveis pelos tipos de resistências encontradas nas embarcações, tais como, resistência viscosa, de superfície e de forma. Ou seja, otimizando o design do navio, minimiza-se os efeitos das resistências (perdas).

5.4.1. Bulbo de Proa (*Bulbous Bow*)

O atrito causado pelo contato do navio com o meio aquático no qual ele está inserido gera perda de energia cinética do navio para a água. Para evitar perdas, deve-se haver um dispositivo para diminuir essa resistência, para isso, foi criado o Bulbo de Proa. Ele atua como um redutor de Resistência de Ondas criando um trem de ondas

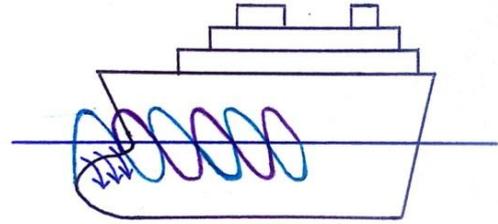


Figura 6 Proa bulbosa: ondas de proa (azul claro) e ondas criadas pelo bulbo (roxo).
Fonte: BARROS, Caroline, 2013.

(representado pela cor roxa, na figura 6) defasado de meio comprimento de onda em relação às ondas de proa (azul claro, na figura 6), o que provoca um trem de ondas resultante praticamente nulo.

Segundo, H. Schneekluth, em *Ship Design for Efficiency & Economy*, a proa é classificada de três maneiras: proa “normal”, proa com bulbo de proa (*bulbous bow*) e formas especiais de proa. A proa normal é a proa sem bulbo de proa, embora a *bulbous bow* seja predominante atualmente.

Experimentos com modelos comparativos mostram que navios com bulbo de proa requerem muito menos energia do sistema de propulsão do navio e tem consideravelmente menor resistência quando comparado com o mesmo navio sem bulbo de proa, como mostrado na figura 7, que compara a resistência ao avanço de um navio com bulbo de proa com

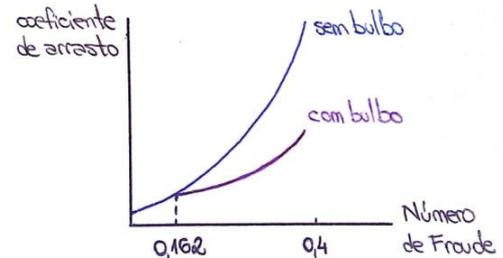


Figura 7 Comparação da eficiência de uma proa bulbosa com uma proa sem bulbo.
Fonte: BARROS, Caroline, 2013.

outro navio sem o bulbo. Nota-se também que, se o Número de Froude (Fr) for menor do que 0,162, a aplicação de bulbo de proa na embarcação é indiferente, com relação ao quesito eficiência energética. Porém, o cuidado que se deve possuir ao instalar um bulbo de proa é o cálculo da quantidade de metal utilizada para produzi-lo, para isso, deve-se encontrar o *steel-equivalent length*, que é o comprimento do navio com bulbo, que possui a mesma quantidade de metal em seu casco e mesmo deslocamento comparado com o

mesmo navio sem bulbo, ou com proa “normal”.

5.4.2. Design da Popa Otimizada

A popa otimizada, com alta eficiência na propulsão, deve oferecer baixa resistência, fluxo uniforme de água em direção ao propulsor, mínima separação do fluxo (acentuada em navios com dois propulsores), mínimo efeito da sucção do propulsor, e evitar vibrações.

5.5. Melhoria da interação de navio, propulsor e leme (fluidez)

O design do leme pode influenciar a eficiência da propulsão. Um leme rombudo (blunt) ou muito fino (streamlined) pode requerer maior potência do sistema de propulsão. Comparado com um arranjo médio, que não tenha sido otimizado, cerca de 4 a 6% pode ser economizado melhorando a interação do navio, propulsor e leme.

6. AUMENTANDO A EFICIÊNCIA: Alterações nos Propulsores

Um projeto de propulsão eficiente exige o mínimo de resistências hidrodinâmicas e de consumo de combustível. Os dados apresentados a seguir são oriundos de provas de mar de navios utilizando esses dispositivos e, de certa forma, quantificando a eficiência de cada um.

6.1. Dimensões e Formas ideais do propulsor helicoidal

O desenvolvimento do propulsor propriamente dito (Tip-Fin-, Kappel- ou outro High-Efficiency propellers) e o desenvolvimento aprofundado da planta do sistema de propulsão (redução da rpm do motor principal e aumento do diâmetro do propulsor) podem trazer grande melhoria à propulsão, quando as medidas padrões não são suficientes para oferecer um aumento da eficiência do sistema. As perdas abaixo são possíveis de serem reduzidas somente trabalhando com as medidas dos dispositivos envolvidos:

- Perdas na conexão com a esteira: separação do fluxo, vórtice visível acima do eixo propulsor na esteira;
- Perdas no propulsor: fricção, energia no fluxo rotacional, energia no fluxo axial e vórtice no hub.

6.1.1. Medidas ideais do propulsor helicoidal

As pás do hélice, ao rotacionarem regularmente passando próximas às partes fixas do navio, produzem impulsos hidrodinâmicos que são transmitidos para o interior do navio através de seu casco e também através do eixo do propulsor. A pressão desses impulsos diminui à medida que as pás do propulsor se afastam do leme e do casco do navio. Essas distâncias afetam a energia requerida para a propulsão, a vibração do propulsor e da popa, o diâmetro do propulsor e a velocidade ótima do propulsor. Por mais que os dispositivos do sistema de propulsão devam estar o mais afastado possível para diminuir as pressões,

eles devem estar próximos o suficiente para que haja uma propulsão e uma capacidade de manobra eficientes. Para isso, há a determinação de medidas ideais para o propulsor helicoidal. Na figura 8, pode-se constatar as determinações estipuladas pela Sociedade Classificadora Det Norse Veritas para um navio de um único propulsor. (H. Schneekluth, 1998, p.70)

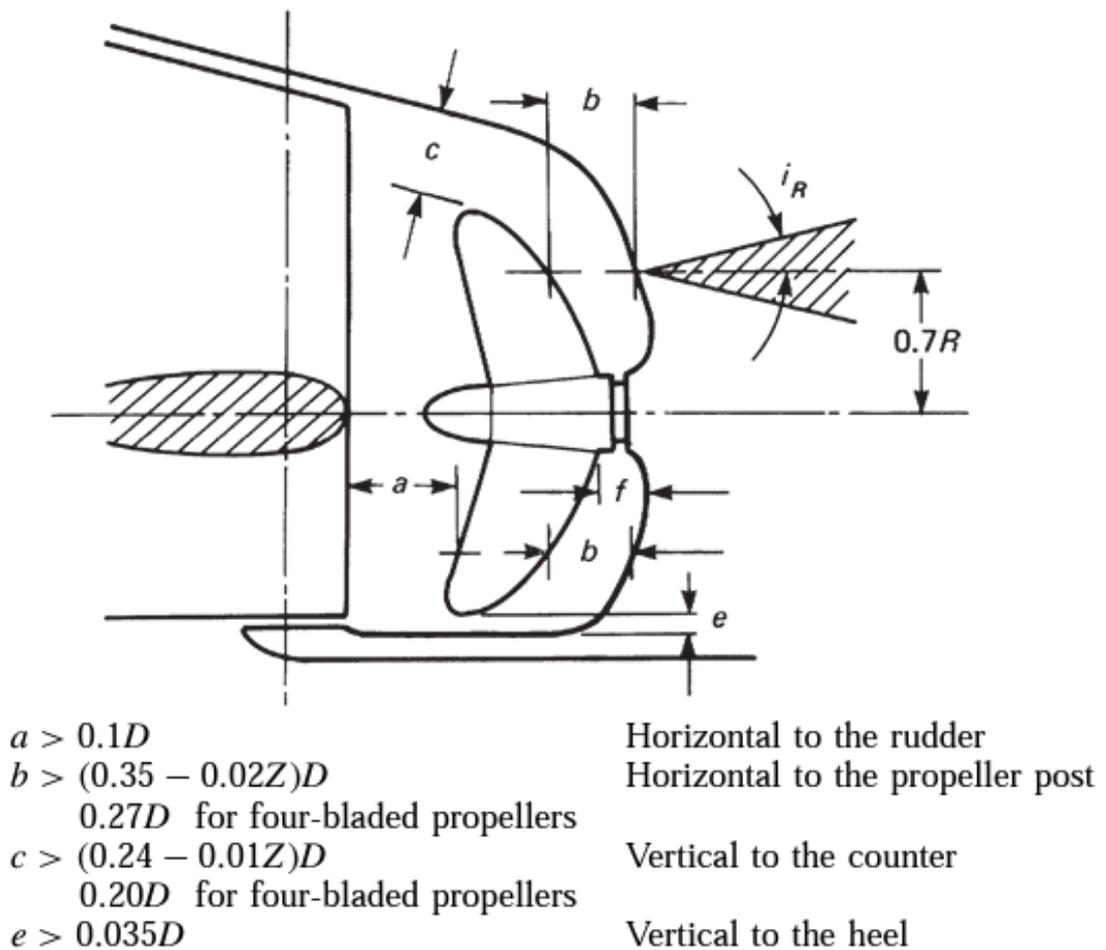


Figura 8 Medidas do propulsor recomendadas pela Sociedade Classificadora Det Norske Veritas para um navio de um único hélice. Fonte: SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V. *Ship Design for Efficiency & Economy*. 2 Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1998, 70 p.

Resumindo, grandes distâncias reduzem vibrações e pequena distâncias reduzem resistência. E, com relação às dimensões, tem-se que: c e e devem ser pequenos para acomodar um propulsor de grande diâmetro; a e e devem ser pequenos para garantir um retorno de energia rotacional na seção do leme; e b e f devem ser grandes para garantir uma boa eficiência do casco. (H. SCHNEEKLUTH, 1998, p.70)

6.1.2. Rake

O rake é a inclinação, medida em graus, para vante ou para ré que as pás possuem. Se a pá é perpendicular ao eixo, tem 0° de rake. Quanto maior o ângulo de rake, melhor é a habilidade do hélice trabalhar próximo à superfície, evitando os efeitos de cavitação e ventilação.

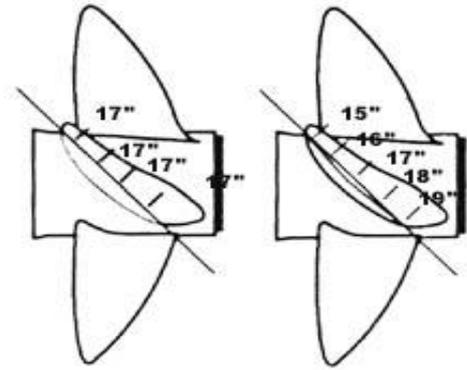


Figura 9 Rake nas pás do propulsor. Passo Constante (à esquerda) e Passo Progressivo (à direita).

6.1.3. Cup

Cup é a concavidade que se vê no bordo de fuga da pá de um propulsor, evitando, assim, que o fluxo de água passe da área de maior pressão para a de menor pressão, além de evitar a cavitação e proporcionar melhoras na atuação do hélice em altas velocidades.

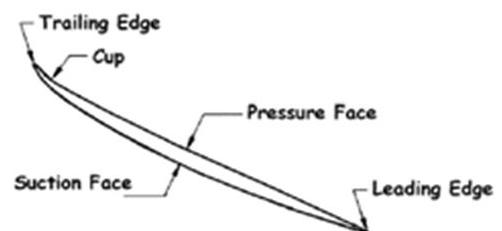


Figura 10 Vista lateral da pá do hélice.

6.1.4. Skew

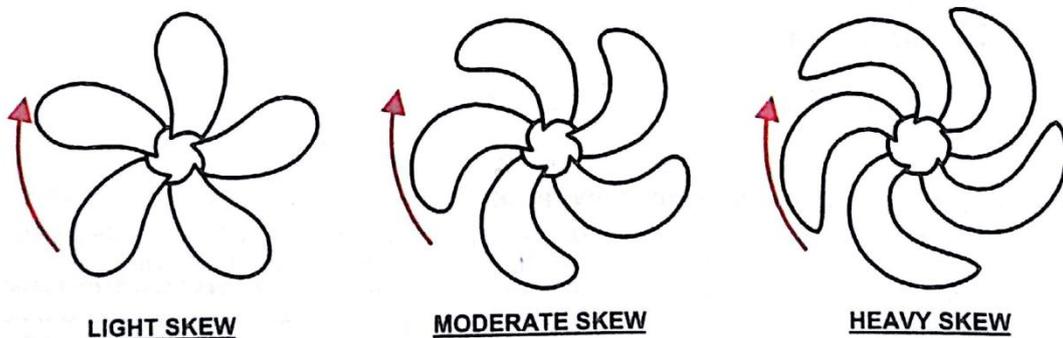


Figura 11 A medida do skew em um propulsor de 5 pás. Fonte: CLARK, I.C. Ship Dynamics for Mariners, 2005, 83 p.

Skew pode ser definido como a assimetria de contorno em relação à linha geratriz da pá. Uma pá com maior skew, ou mais inclinada radialmente, reduz a vibração da pá

quando entra na água. A quantidade de pás também influencia na vibração do navio: quanto mais pás, menos eficiência, mas também, menos vibração.

O skew reduz o problema da cavitação intermitente, o que pode provocar erosão, desbalanceamento e vibrações induzidas pelo propulsor quando está operando em campos não uniformes de velocidades e de pressões. Ele torna mais suave a passagem das pás do hélice nas diversas regiões de diferentes velocidades em campo de esteiras, desse modo, as flutuações ou variações de pressão junto às pás ficam reduzidas.

6.1.5. Propulsor end-plates (CLT)

Esse propulsor possui, ao invés de uma curvatura, placas nas pontas das pás do hélice para evitar que o fluxo de água passe da área de maior pressão para a de menor pressão, o que evita vórtices nas pontas das pás, assim como cavitação e consequente vibrações.

Ele proporciona: melhoria na eficiência de propulsão em 8~12%; redução de potência requerida da ordem de 12 a 14%; redução das vibrações para a terceira harmônica de vibração do hélic.

6.2. Hélices Kappel

Esses são hélices do tipo end-plates da JJ Kappel Marine Concept (projecto Kpriccio). Provas de mar do primeiro hélice Kappel, com o navio petroleiro Nordamerica, da D/S Norden, indicaram que o consumo seria reduzido em 4% a uma velocidade de 15 nós comparado com o hélice original convencional instalado no petroleiro. Foi assinalado, também, uma redução mais significativa dos níveis do impulso de pressão, em média 40%. (O Propulsor, nº 203, 14-15 p.)

6.3. Hélice de Materiais Compósitos

Materiais compósitos são mais leves do que o material que geralmente os

propulsores são fabricados (liga de bronze-níquel-alumínio).

Em 2003, realizaram-se com êxito provas de mar com hélices de materiais compósitos (fabricado por Qinetiq) e núcleo de bronze-níquel-alumínio (fabricado por Wärtsilä Propulsion) instalados no protótipo do navio de guerra Trimarã. O hélice, de 2,89m de diâmetro, pesa menos do que um tradicional equivalente fabricado na liga de bronze-níquel-alumínio. Nas provas foram observadas vantagens imediatas, tais como aumento da potência e redução das vibrações.

A utilização de materiais compósitos mais leves permitiu que as pás tenham uma espessura maior sem um aumento considerável do peso do hélice. As pás mais grossas têm melhor comportamento em relação à cavitação, reduzindo, portanto, as vibrações e a acústica submarina.

O menor peso será particularmente atrativo para os interessados em propulsores *pod*. A redução de peso nessa aplicação inicial foi da ordem de aproximadamente 20%, mas é possível uma redução de cerca de 30 a 40% se o núcleo do hélice também for fabricado com materiais compósitos.

Segundo a Qinetiq, as vantagens potenciais do hélice de material compósito são: redução de peso, redução de efeitos de corrosão, melhoria das características das vibrações, redução do desgaste no eixo, melhoria dos custos ao longo do seu ciclo de vida.

6.4. Propeller Boss Cap Fins (PBCF)

O Sistema PBCF projetado pela Mitsui OSK Lines primeiramente instalado em 1987 e, atualmente, em mais de 830 navios tem carapaça aplicada no núcleo do hélice com aletas que orientam os vórtices do núcleo do hélice e recupera energia rotacional que se perderia na esteira do hélice. Ele proporciona a vantagem de o impulso do hélice ser aumentado em mais de 1%, o que garante uma economia de combustível de até 5% e, com a mesma potência do motor, obtém-se um ganho de 2% na velocidade. Além de aumentar o rendimento propulsor, o PBCF reduz as vibrações à popa, o ruído do hélice e muitos problemas da erosão e do leme. Possui fácil instalação e não necessita de

manutenção em serviço.

6.5. Propulsor de Passo Controlável

O Propulsor de Passo Controlável incorpora uma tecnologia de resposta rápida com nível de ruídos e vibrações perto do limite de zero. O passo é controlado por um mecanismo hidráulico dentro do cubo e sem necessidade de caixas inversoras. O impulso (*lift*) é controlado pelo passo do hélice, fazendo com que o navio possa navegar com sua velocidade mais eficiente. Eles são extremamente robustos e preparados para operarem em condições adversas de mar, com baixo custo de manutenção e pode ser utilizado em qualquer tipo de embarcação.

6.6. Azipod

É uma unidade de propulsão elétrica com velocidade variável do motor elétrico de acionamento do hélice de passo fixo e é contido em *pod* submerso fora do casco do navio.

Podem rotacionar 360° em torno de seu eixo vertical para dar a propulsão livremente para qualquer direção. O navio não necessita de lemes e os propulsores transversais são posicionados dentro do casco do navio, com isso, economiza o espaço no interior do navio dando maior liberdade ao projeto e diminui o centro de gravidade do navio por ser posicionado abaixo da quilha. Proporciona também menor consumo de combustível, conseqüentemente, menor emissão de CO₂ (comparado com a propulsão mecânica).

O azipod tem aplicabilidade em diversas embarcações, tais como, plataformas (sistema DP), transatlânticos (Queen Mary II), etc.

6.7. Propulsor Voith-Schneider

Esse sistema de propulsão cicloidal (de propulsão elétrica ou de propulsão comum, diesel) é composto por lâminas verticais móveis fixadas em discos paralelos ao fundo da

embarcação. São utilizados dois conjuntos localizados na mesma linha transversal e, geralmente, avante da embarcação. É necessário um estabilizador (fin) localizado a ré, na altura do ponto de tração, com o objetivo de aumentar a estabilidade de governo.

Tabela 2 Vantagens e Desvantagens do Propulsor Voith-Schneider.

VANTAGENS	DESvantagens
Dispensa o uso de leme	É necessário um estabilizador para aumentar a estabilidade de governo, chamado fin, com a mesma função do skeg para propulsores helicoidais.
Imediata resposta ao comando	
Anula o efeito das ondas	
Pouca manutenção requerida	
Não trabalha na esteira	A resistência dos apêndices é de 2 a 3% e aproximadamente a metade se deve ao leme.
Roll Damping: atenuação do balanço	

O propulsor Voith-Schneider é um exemplo de propulsor de sucesso e muito solicitado em embarcações rebocadoras, pois dispensa o leme além de proporcionar imediata resposta ao comando. Sua rapidez na transição de direção e intensidade de empuxo permite, inclusive, que a embarcação anule o efeito de ondas, tornando-se absolutamente estável. A resistência dos apêndices é de 2 a 3% e aproximadamente a metade se deve ao leme.

6.8. Propulsor de Hélices Gêmeas

Também chamado de *Twin propeller*, ele é equipado com dois hélices que rotacionam no mesmo sentido. O sincronismo dos hélices e do tubo de governo com aletas integradas proporcionam um aumento significativo da eficiência se comparados a unidades com apenas um hélice. Ele possui um hélice frontal e um hélice de pressão dispostos entre si de tal maneira que a esteira de turbulência do hélice frontal flui por entre as pás do hélice de pressão posterior, sem obstruí-lo. Através da contração do jato

propulsor no hélice frontal, água adicional atinge lateralmente o hélice de pressão proporcionando um aumento da potência. Além disso, o eixo do propulsor é hidrodinamicamente otimizado e equipado com um sistema de difusor integrado (aletas). Dessa forma, o movimento de rotação produzido pelo fluxo do hélice é recuperado, aumentando assim o grau de potência.



Figura 12 Propulsor de Hélices Gêmeas.

Ademais, o fluxo do sistema de aletas é um componente da força de impulso na direção avante, que atua também elevando o impulso. Os níveis de ruído e vibração serão reduzidos consideravelmente.

Esse sistema propulsor é ideal para todas as embarcações de velocidade média com aplicações que usam cargas de hélice mais elevadas. Isso acontece por causa da tecnologia do duplo hélice que distribui a potência em dois hélices reduzindo a carga em cada hélice e aumentando a eficiência do sistema. Esse propulsor tem 20% a mais de eficiência propulsora comparado com propulsores comuns. A seguir, estão discriminadas características desse sistema:

1) O princípio hidrodinâmico:

- A distribuição da potência nos dois hélices contribui para uma diminuição da carga na superfície das pás.
- Recuperação das perdas rotacionais do hélice frontal através do sistema condutor integrado composto de tubo de governo e sistema de difusor integrado (aletas).
- Carcaça do hélice possui fluxo favorável.

2) O princípio mecânico:

- Ambos os hélices giram sobre um mesmo eixo e no mesmo sentido de rotação.
- Transmissão de potência comprovada sem engrenagem redutora adicional.
- Apenas um pacote de vedação adicional.

3) Vantagens:

- Eficiência maior que a dos sistemas azimutais-Z com apenas um hélice.
- Maior transmissão de potência do que apenas com um único hélice.

- Menor risco de cavitação devido a menor carga nos hélices.
- Menos flutuação na pressão e diminuição nas emissões de ruídos.

6.9. Propulsor com Hélices Contrarrotativas (Azipod CRP)

Hélices contra rotativas usam uma segunda hélice que rotaciona no sentido contrário à hélice principal, para aproveitar a energia cinética perdida no movimento circular do escoamento. A contrarrotação é também uma maneira de aumentar a potência sem aumentar o diâmetro da hélice e anular o efeito de torque nos motores de alta potência assim como os efeitos de precessão giroscópica. A contrarrotação pode ser de mesmo eixo (figura 13) ou pode ser obtida combinando um propulsor tipo Azipod operando frente a um propulsor convencional (figura 14). Com isso, o Azipod contribui para a manobra e para a propulsão.

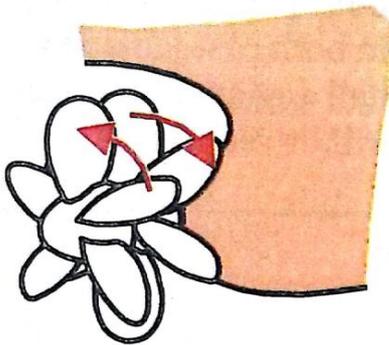


Figura 13 Propulsor com hélices contra-rotativas de mesmo eixo (coaxial). Fonte: CLARK, I. C. Ship Dynamics for Mariners. The Nautical Institute, 2005, 83 p.

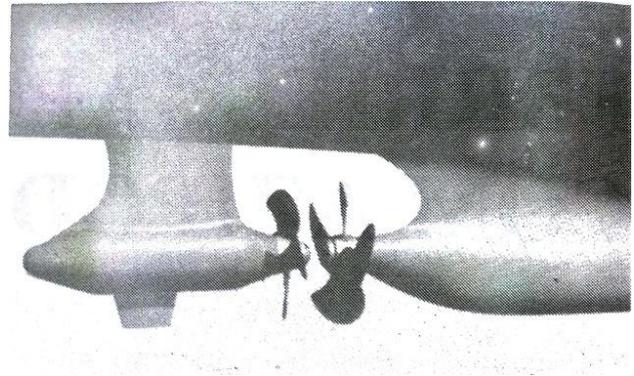


Figura 14 Propulsor tipo azipod operando frente a um propulsor convencional com rotação contrária. Fonte: REVISTA INGENIERIA NAVAL. Aperfeiçoamento dos Hélices para Melhorar a Propulsão. O Propulsor, Lisboa, nº 203, Nov-Dez 2004, 14 p.

Os benefícios dos hélices contrarrotativos são conhecidos há vários anos, mas o seu uso em aplicações de muita potência (usando meios coaxiais rotacionando em direções opostas) necessita de engrenagens e chumaceiras complexas. Mas, com o advento do propulsor elétrico *pod* surgiu uma solução CRP mais simples e confiável. Além de um aumento no rendimento de 10 a 15%, com correspondente economia de combustível, o Azipod orientável dispensa a utilização de leme, o que proporciona uma

redução de resistência de apêndices (um *pod* aumenta a resistência, segundo Wärtsilä, mas não tanto quanto os apêndices tradicionais). Além disso, proporciona uma melhor manobrabilidade em mau tempo com impulso adequado em todas as direções.

Experiências de navios Ro-Passageiros com propulsão elétrica provam que a nova instalação de máquinas CODED com um *pod* CRP oferece a maior parte dos benefícios associados às máquinas diesel-elétrica e diesel-mecânica sem os seus respectivos inconvenientes. O resultado é uma solução muito competitiva que proporciona um comportamento técnico e econômico extraordinário pra os navios Ro-Passageiros rápidos.

Segundo a empresa Wärtsilä, um hélice contrarrotativo de pás fixas situado diretamente atrás de um hélice convencional de pás controláveis, montado num só cadaste no centro da popa, proporciona um rendimento hidrodinâmico muito melhor do que o de um navio convencional com duas linhas de eixo e hélices, devido à energia rotacional do hélice de vante que é aproveitada pelo detrás e o casco com um só cadaste proporciona uma menor resistência e um campo de esteira mais favorável.

Um Azipod CRP proporciona um melhor rendimento de transmissão num navio totalmente elétrico, menor potência total instalada e bom comportamento em manobras.

Apesar da instalação mecânica de eixos coaxiais de contra rotação ser complicada, cara e requerer mais manutenção, os hélices contra rotativos eliminam as perdas rotacionais, não produzem forças laterais e minimizam a cavitação. A área aumentada das pás permite a utilização de relações de engrenagem maiores, além disso, mais energia pode ser transmitida para um dado raio de hélice, com isso, a eficiência do hélice é normalmente aumentada, há redução da emissão de óxidos de nitrogênio e os ganhos hidrodinâmicos são parcialmente reduzidos em perdas mecânicas nos eixos.

6.10. Permanent Magnet

Uma nova classe de propulsores utiliza a tecnologia de ímã permanente que consiste de um rotor anelado que circunda as pás do hélice. As pás propulsoras são envoltas por um aro que carrega uma série de fortes ímãs permanentes e convergem para

o casco. A parte anelada exterior constitui-se de um estator provido de uma série de bobinas, que criam um campo eletromagnético rotativo, quando ativadas. A corrente é fornecida às bobinas através de um conversor de frequência variável instalado dentro do casco e conectado ao sistema elétrico do navio. A interação entre o campo magnético rotativo gerado no estator com o rotor de ímãs permanentes cria uma força que movimenta o rotor dando a rotação do hélice.

No sistema de propulsão *permanent magnet*, o estator e a corrente elétrica, quando comparado com um propulsor que não possua a tecnologia de ímãs permanentes, fazem a função das engrenagens. Com isso, há uma transmissão sem perdas, pois não há atrito como há nas engrenagens. Evita-se perdas também ao utilizar um inversor de frequências, ao invés de caixas inversoras, com a finalidade de inverter máquina e regular a rpm do propulsor. Apesar de ser um propulsor mais robusto e pesado, sua minimização de perdas compensa o uso.

6.11. Hélice CLT

Vantagens segundo a empresa espanhola Sistemar:

- Redução do consumo de combustível em mais de 8% ou aumento da velocidade do navio para o mesmo consumo;
- Redução/eliminação das vibrações (cavitação e ruídos) induzidas no casco;
- Melhoria na manobrabilidade (círculo de revolução menor e avanço mais curto em paradas de emergência);
- Melhoria na Estabilidade de rumo.

6.12. ESTUDO DE CASO

Exemplo: Ro-Pax Vessel (escolha de dimensões adequadas)

1. Problema: A potência requerida é surpreendentemente alta embora a forma do casco tenha sido otimizada.
2. Parecer: O comprimento é muito curto e o coeficiente de bloco é muito alto

para a velocidade alvo “hard points” no corpo de popa para acomodar o motor principal abaixo de convés principal causa correr desfavorável das linhas da popa.

3. Solução: Alongamento da embarcação de 3,5%, aumentando a profundidade para o convés principal e mover a posição do motor principal (suavizando, assim, as linhas de popa).

4. Resultado: Economia de 15% de potência, conseqüentemente, de combustível também.

Exemplo: Product Carrier (otimização da forma do casco)

5. Problema: A potência requerida é inesperadamente alta.

6. Parecer: A guinada do esgoto por ante avante do navio (fore body) é muito difícil, resultando em separação de fluxo na área inferior (percebido no teste de fluxo de tinta)

7. Solução: aumentar a curvatura.

8. Resultado: Economia de Potência de 8%.

7. ASPECTO FINANCEIRO DA POLÍTICA ENERGÉICA

Para o armador, não basta construir o maior navio e o mais veloz, mas sim, o navio que lhe dê mais lucro. Logo, um projeto perfeito do aspecto hidrodinâmico não é suficiente, se não for do interesse do construtor, financeiramente. Porém, não deve ser analisado somente os custos de cada equipamento instalado a bordo, mas também, o quanto de retorno financeiro esse equipamento fará retornar ao armador. Exemplo: há dois dispositivos equivalentes, um mais caro custando US\$ 30,000.00 e outro mais barato custando US\$ 10,000, o primeiro possui uma economia anual de combustível de US\$ 30,000.00 comparado com o segundo, logo, o dispositivo mais caro acaba sendo o mais rentável, pois em um ano de operação há retorno certo do investimento e os demais anos de operação do navio são somente lucro.

Quanto menos energia for desperdiçada em esforços dispensáveis, como resistência viscosa, por exemplo, maior será a economia de combustível (fonte de energia para o sistema propulsor), ocasionando menos custos e menos danos ao meio ambiente com a eliminação de gases poluentes oriundos da queima de combustível.

Um navio novo bem projetado pode economizar 50% dos custos operacionais quando comparado com um navio antigo, e até 30% pode-se salvar através de economia de combustível. Possíveis melhorias são: melhor movimentação de carga, melhor forma do casco e design de proa, melhor hélice e sistema de propulsão, melhor automação e tripulação melhor preparada. (SEAGULL CBT, Energy Conservation – CD 97)

O número exato para uma modificação do navio deve ser obtido a partir de um estaleiro. O custo real é calculado a partir do investimento inicial, taxas de juros e amortização, ou o tempo de expectativa de vida útil da embarcação. Em geral, os navios em rotas fixas duram mais do que os navios de fretamento irregular em uma situação financeira instável.

Ainda na fase de projeto, adição de várias melhorias é feita através da multiplicação da percentagem de ganho para cada um deles. Exemplo:

- 1) Melhoria do hélice: ganho de 15%, que corresponde a 85% do consumo de combustível anterior;

2) Redução da resistência do casco: ganho de 12%, que corresponde a 88% do consumo de combustível anterior;

3) Ganho total: $(85 \times 88) / 100 = 75\%$ do consumo de combustível anterior.

Isso significa que uma economia de combustível de 25% pode ser atingida com essas duas melhorias (SEAGULL CBT, Energy Conservation – CD 97).

7.1 Calculando retornos de investimentos

Conservação de energia requer um investimento inicial. Como será lucrativo depende muito do tipo de carga a ser transportada, a expectativa de vida do navio, as taxas de juros, preços dos combustíveis, etc. Como regra geral, o consumo de combustível representa cerca de 20% do custo total de funcionamento de um navio de carga comercial. Para medir o benefício do investimento, deve-se considerar o tempo de demora para reembolsar o investimento inicial. Medidas de curto prazo podem economizar 10% do consumo de combustível. Medidas de longo prazo devem reduzi-lo por, pelo menos, 20 a 30%.

7.2. Utilizando Dispositivos Equalizadores de Esteira

7.2.1. Duto Schneekluth

Propaganda do fabricante: “0,3 knots faster, 4t fuel saving daily, 50% vibration reduction”.

Esse tipo de equalizador de esteira consiste de um duto anular, montado antes e a partir da metade do propulsor e em torno da metade de seu diâmetro. É moldado para acelerar a metade de cima do fluxo de água na direção do disco do propulsor, cujo fluxo de água teria sua velocidade reduzida devido à fricção com o casco. O duto, entretanto, também retarda a alta velocidade na metade de baixo do fluxo que vai na direção do propulsor. Dessa maneira, o fluxo direcionado para área do propulsor fica equalizado, assim, garantindo uma massa de água mais homogênea na passagem pelas pás, o que

aumenta diretamente o thrust.

Durante vários anos, o duto Schneekluth foi usado em uma série de 25 navios, o que possibilitou um grande estudo de casos, de medições e evolução do sistema para futuras melhorias e aperfeiçoamentos (esse perfil hidrodinâmico desenvolvido é patenteado pela “Messrs Schneekluth Hydrodynamik”). Depois de um certo tempo descobriu-se que a eficiência do duto seria aumentada se fossem incluídos no projeto duas aletas em cada bordo, uma acima da linha de centro e mais próxima do duto e outra mais afastada e abaixo da linha de centro.

A utilização desse sistema gerou um aumento na velocidade do navio em 0,3 nós. A partir de várias medições em diferentes potências e diferentes velocidades, criou-se o gráfico abaixo, que apresenta uma comparação de 36 navios com o duto e 18 navios sem o duto.

O aumento da eficiência em navios com o duto representa um ganho de potência médio de 950 kW ou 5%, o que representa uma economia de 4t de combustível por dia.

O aumento da velocidade do fluxo de admissão, resultante da instalação do

duto, ajuda o hélice a rotacionar mais facilmente por 1,5 – 2 rpm, em comparação com uma embarcação sem o duto. Uma melhoria dessa magnitude não requer uma adaptação do propulsor quando está realimentando uma embarcação com duto, nem nenhuma mudança do projeto do propulsor para um novo navio com o duto.

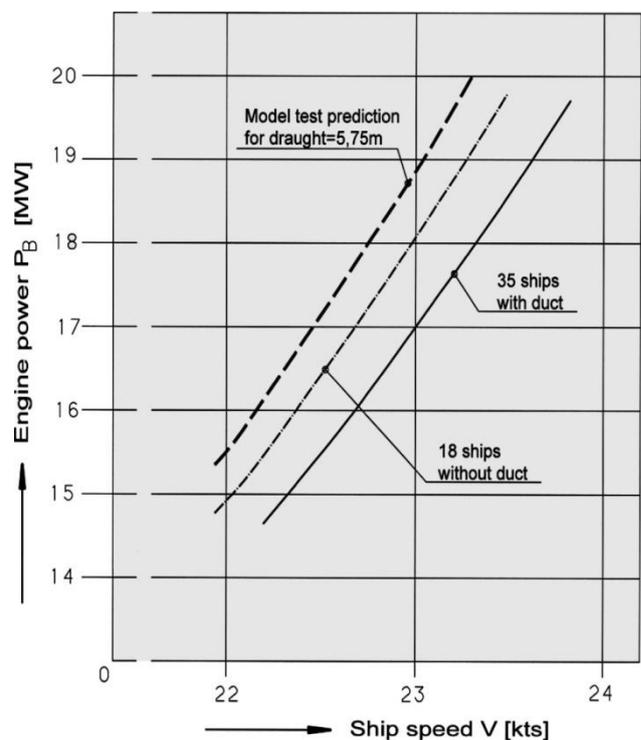


Figura 15 Gráfico comparativo da eficiência energética de navios dotados de Duto Schneekluth e navios sem o duto.

7.2.2. Duto Mewis

O modelo de teste com o duto Mewis atingiu uma velocidade de 16,45 nós, ou seja, houve uma economia de aproximadamente 4,5% de potência de propulsão. Isso corresponde a um aumento na velocidade do navio de 17 nós se uma redução de potência de aproximadamente 6% for encontrada nas medições, por mais que a propaganda da construtora preveja uma eficiência de 2~9%. Isso corresponde a uma estimada economia de bunker na faixa de US\$23,000 por ano, considerando o valor de US\$460 por toneladas durante 220 dias de operação por ano e há também a redução dos gases de efeito estufa e gases poluentes atmosféricos.

É utilizado em navios com grandes coeficientes de bloco, tais como, graneleiros, navios tanque e porta-contêineres em que seus propulsores operam em campos de esteiras desfavoráveis.

8. NAVEGAÇÃO E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Somente o melhoramento da característica hidrodinâmica e a diminuição da emissão de gases poluentes não garantem a máxima eficiência energética de uma embarcação. Deve-se manter também essa política durante a viagem, o que é responsabilidade da tripulação a bordo do navio.

O planejamento da viagem, o gerenciamento da velocidade, a otimização da potência dos motores, as rpm de ressonância serem evitadas, a manutenção do casco e o uso de diferentes tipos de combustíveis podem contribuir para a economia de combustível e a redução das emissões de CO₂.

A conversão para combustível pesado, por exemplo, pode resultar em uma economia de cerca de 20%, em função dos preços de mercado para qualidades diferentes de combustível. Em alguns exemplos, a conversão para combustível pesado mostrou um tempo de amortização de 5 a 10 anos. Porém, para converter em combustível pesado, tem-se que investir em separadores de combustível pesado, separadores de óleo lubrificante, isolamento térmico para tanques, pré-aquecedor de óleo combustível, instrumentos de controle de viscosidade e modificações no motor.

Os requisitos mínimos de instrumento para melhor economia de combustível são fluxômetro e Speed log. Um programa também pode ser instalado para cálculo de consumo de óleo combustível em relação à distância percorrida e a velocidade da embarcação. Se usado corretamente, pode reduzir o consumo de combustível por quase 10%. (SEAGULL CBT, Energy Conservation – CD 97)

Não basta investir em mecanismos eficientes energeticamente sem manter a política de eficiência energética da propulsão a bordo durante a viagem. Neste capítulo, estão apresentadas medidas que os tripulantes devem tomar para manter essa política a bordo.

8.1. Velocidade ideal constante

A velocidade de cruzeiro ideal é a velocidade na qual o navio é mais econômico, e

isso depende de alguns fatores, especialmente gastos com combustível. A economia mais importante pode ser feita reduzindo a velocidade do navio, porém, infelizmente, isso também reduz a capacidade de transporte por tempo de travessia. Para um navio típico, um ganho de velocidade de 1% aumenta o consumo de combustível por unidade de tempo até 6%, e o combustível, de acordo com a distância cruzada, até 5%. Como resultado, um aumento de velocidade marginal resulta num considerável aumento de consumo de combustível (SEAGULL CBT, Energy Conservation – CD 97).

Ou seja, uma vez estabelecida a derrota, o melhor é respeitá-la e chegar ao destino no horário programado.

Exemplo: está previsto que um navio cubra uma certa distância a 10 nós. No entanto, 3/4 da distância é feita em 11 nós e um quarto, em 7,5 nós. O navio chega na hora marcada, mas o consumo de combustível aumentou em 12%. O tempo gasto no porto tem que ser otimizado, encontrando melhores procedimentos de carregamento e de descarregamento do navio. (SEAGULL CBT, Energy Conservation – CD 97)

O exemplo anterior mostra claramente os prejuízos no consumo de combustível ao utilizar velocidades irregulares, e isso ocorre porque se economiza combustível ao se manter uma carga contínua imposta ao eixo propulsor. A carga contínua é melhor alcançada quando se mantém uma contínua velocidade do eixo propulsor. Baseado na experiência e previsão do tempo da derrota, a rpm ideal deve ser avaliada na saída do porto, e continuar até a chegada ao destino.

Quando o tempo de chegada é prioridade e as condições meteorológicas indefinidas, é sensato permitir uma suficiente margem de tempo.

Manobras no porto devem ser executadas em acelerações progressivas e moderadas, se as condições permitirem. Qualquer manobra brusca representa pressão sobre o motor e um desperdício de combustível.

8.2. Calado ideal e a Estabilidade

Em geral, quanto menor o calado, mais rápido o navio navegará. Mas é importante que um lastro mais leve não comprometa a estabilidade do navio.

Calado ideal de projeto representa maior velocidade e menor consumo. Navio com calado impróprio pode ser responsável por cerca de 3% do consumo extra de combustível. Navio com uma tendência a embicar terá de levantar a proa para aumento da eficiência energética e velocidade. (SEAGULL CBT, Energy Conservation – CD 97)

8.3. Registro Computadorizado

Computadores fazem registro e análise da derrota facilmente: a velocidade média é calculada a partir do tempo gasto no mar e a distância percorrida, e o consumo médio de combustível pode ser feito da mesma forma. Alguns desses dados variaram de acordo com a precisão do instrumento, condições meteorológicas ou alterações da derrota. Por isso, é necessário manter a manutenção dos equipamentos de registro e, também, manter-se na derrota planejada.

8.4. Frequências ressonantes

Qualquer sistema físico que é posto a oscilar livremente possui a tendência natural de oscilar com uma frequência específica denominada frequência preferencial de vibração, que pode ser única, ou mais de uma, dependendo do sistema físico considerado. Quando, em um sistema físico qualquer, são injetados periodicamente impulsos de energia (forças de excitação) com uma frequência igual a uma de suas frequências preferenciais de vibração, o sistema passa a vibrar com ondas de amplitudes progressivamente crescentes, tendendo a um valor máximo. Nesse caso, dizemos que o sistema em questão entrou em ressonância. Pode-se também conceituar ressonância como sendo a tendência de um sistema a oscilar em máxima amplitude em certas frequências, conhecido como frequências ressonantes. Nessas frequências, até mesmo pequenas forças de excitação periódicas podem produzir vibrações de grande amplitude, pois o sistema armazena energia vibracional.

O propulsor, pelo fato de se encontrar em movimento permanente enquanto o navio se desloca, é um dos órgãos mais susceptíveis de criarem vibrações. A maneira

encontrada pelos manuais e chefes de máquinas é acelerar as máquinas próximo do ponto de ressonância da embarcação, de maneira que a ressonância não tenha tempo de ocorrer. Além disso, deve-se manter a manutenção dos aparelhos para evitar ruídos e consequentes vibrações.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aumentar as proporções dos navios de carga não é o suficiente para se garantir um transporte eficiente, mas também, deve-se investir na minimização das resistências ao avanço do navio. O sistema tradicional de propulsão não era eficiente para os novos padrões nos quesitos: emissão de poluentes, vibração, qualidade do combustível, economia de combustível e tempo de viagem. Soluções antigas não eram suficientes e as novas soluções se mostraram eficientes e econômicas. Atualmente, há diversos tipos de hélices, cascos, sistemas de propulsão, etc, que podem diferir de empresa para empresa, e cumprem o papel de garantir a política de eficiência energética da propulsão.

Para se equipar um determinado navio, esses dispositivos devem cumprir alguns requisitos de eficiência hidrodinâmica comprovados em testes em protótipos, porém, para que o navio deixe de ser um protótipo e seja efetivamente construído, deve-se ter recursos do armador, que somente dará aval à construção se for totalmente convencido de que aquele projeto garantirá o retorno do seu investimento e lucro ao longo da vida útil do navio.

A política da eficiência da propulsão não se limita somente ao projeto da embarcação, é imperativo considerar também os procedimentos a bordo, de responsabilidade dos tripulantes, para manter essa política.

A partir desse estudo, pode-se constatar que não é possível excluir os problemas enfrentados pela propulsão do navio, mas sim, minimizá-los e, na medida do possível, evitá-los. Assim como, não é possível desenvolver um tipo de propulsão ideal para cada classe de navio antes de ser testado pelos atuais sistemas de teste, ou seja, cada navio individualmente deve ser testado antes de ser lançado ao mar, independentemente de sua classe ou tipo. Para isso, o armador deve deixar claro seus objetivos e possíveis rotas do navio para que a empresa se encarregue de construir aquele navio em específico.

Dessa forma, o estudo contribuirá para chamar a atenção a esse assunto que tanto é de interesse das empresas de navegação, quanto do armador, quanto dos tripulantes. Todos os envolvidos no transporte marítimo estão comprometidos para transportar a mercadoria com economia e eficiência.

Espera-se ainda que esse estudo possa contribuir para que os alunos dos cursos de graduação em Ciências Náuticas sintam-se estimulados ao estudo da eficiência hidrodinâmica, propulsora e energética da embarcação mercante que, apesar de ser riquíssima, apresenta algumas lacunas ao longo de seu desenvolvimento. Pretendo também que possam utilizar esse material como fonte de consulta em sua vida acadêmica e como instrumento de valorização dos profissionais que ajudaram a construir esse conhecimento.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAO, Karl K.-Y.; GATCHELL, Scott. Advancements in viscous Flow Computations For Ships. **HSVA NewsWave: The Hamburg Ship Model Basin Newsletter**, Hamburg, 2006/1, 8-9 p.

CLARK, I. C. **Ship Dynamics for Mariners**. The Nautical Institute, 2005. 41-272p.

FONTES, Alberto. Grandes Obras da Engenharia Marítima: o canal que fez nascer um país. **O Propulsor**, Lisboa, nº 200, Maio-Jun 2004, 44-45 p.

KESSLER, Joachim. **Schneekluth W.E.D. Wake-Equalizing-Duct: use of the wake equalizing duct of Schneekluth design on fast container vessels of medium size**. Exclusive Distributor: von Pereira Maritime Services

MEWIS, Friedrich; HOLLENBACH, Uwe. Special Measures for Improving Propulsive Efficiency. **HSVA NewsWave, The Hamburg Ship Model Basin Newsletter**, 2006/1. 1-4 p.

ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL. ANEXO VI In: **Convenção Internacional para Prevenção da Poluição por Navios, 1973/78**. Rio de Janeiro: Diretoria de Portos e Costas, 1986.

ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL. Emendas ao Anexo VI da MARPOL sobre Regras para a Prevenção da Poluição por Ar por Navios pela Inclusão de Novas Regras Sobre Eficiência Energética para Navios, In: **Resolução MEPC.203(62)p**. Rio de Janeiro: Diretoria de Portos e Costas, Jan 2013.

REVISTA ENGENIERIA NAVAL. O Azipull abre novas perspectivas aos hélices azimutais. **O Propulsor**, Lisboa, nº 33, Maio-Jun 2003, 43-47 p.

REVISTA INGENIERIA NAVAL. Aperfeiçoamento dos Hélices para Melhorar a Propulsão. **O Propulsor**, Lisboa, nº 203, Nov-Dez 2004, 13-17 p.

REVISTA INGENIERIA NAVAL. Experiências com Turbinas a gás a bordo de navios de passageiros. **O Propulsor**, Lisboa, nº 33, Maio-Jun 2003, 53-56 p.

REVISTA INGENIERIA NAVAL. Ferries Japoneses com Azipod CRP. **O Propulsor**, Lisboa, nº 203, Nov-Dez 2004, 55-57 p.

SACHS, IGNACY. Do crescimento econômico ao Ecodesenvolvimento. In: **Desenvolvimento e Meio ambiente no Brasil**. Porto Alegre: Palotti, 1998.

SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V. **Ship Design for Efficiency & Economy**. 2 Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1998.

SEAGULL . **Energy Conservation**. Computer-Based Training Systems for the Maritime Industry (CD 97). Disponível em: <http://www.ship-technology.com/contractors/simulators/seagull>. Acessado em: Jul 2011.

SHURI, HIDEYUKI. Development of Noise Prediction Programs for Acoustic Ship Designs. **ClassNK TECHNICAL BULLETIN**, NIPPON KAIJI KYOKAI, Vol. 31, Dec, 2013, 1-6 p.

11. GLOSSÁRIO

Aletas: sequência de hidrofólios (1 ou mais por bordo) projetados para baixo e para fora nas laterais da popa da carena (ou nas laterais de um pod) posicionados avante do propulsor, a fim de criar um fluxo axial mais uniforme e acelerá-lo antes de atingir a parte superior do disco do propulsor.

CRP: propulsor de hélices contra-rotativas (Contra-Rotating Propeller).

Dispositivo Equalizador de Esteira: apêndice hidrodinâmico posicionado a vante ou a ré do hélice com a finalidade de tornar o fluxo homogêneo (sem vórtices) tanto na entrada quanto na saída do propulsor. Dispositivos pré-hélice direcionam o fluxo para o disco do propulsor, exemplos: aletas, duto Schneekluth, duto Mitsui, estatores, duto Becker Mewis, Pre Swirl Stator. Tem-se também os dispositivos pós-hélice, que diminuem a componente rotacional do fluxo na saída para, assim, ser recebido pelo leme com menor componente rotacional possível, exemplos: bulbo de leme (costa), boss cap, aleta de impulso no cadaste, Volante Grim Vane, leme assimétrico.

Efeito Coanda: tendência que todo fluido possui de acompanhar, por aderência, o contorno de uma superfície sólida, quando apresentam deslocamento relativo.

Fator de esteira (Wf): relação entre a velocidade do navio (V_s) e a velocidade relativa do propulsor em relação a água (V_a : velocidade de avanço) determinada pela seguinte fórmula: $W = \frac{V_s - V_a}{V_s}$. Cada ponto do hélice possui um Fator de Esteira diferente, caso encontre fluxos com velocidades diferentes ao longo de sua rotação. Reduzi-lo significa aumentar a velocidade do fluxo no propulsor.

Fluxômetro: dispositivo responsável pela medição do fluxo de um fluido, no caso, óleo combustível.

rpm: frequência de rotação do eixo do propulsor (rotações por minuto).

Skeg: extensão do casco para baixo com perfil em forma de “V” contendo o eixo do propulsor, aprofundando-o, a fim de homogeneizar e direcionar favoravelmente o fluxo para o propulsor.

Speed log: mecanismo indicador e registrador de velocidade.

Thrust: força reativa da água sobre o propulsor responsável por impelir a embarcação para vante.