

**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAIS DE NÁUTICA**

**ESTRATÉGIAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EMBARCAÇÕES**

**LEANDRO TIMM MALTZ JUNIOR**

**RIO DE JANEIRO  
OUTUBRO – 2013**

**LEANDRO TIMM MALTZ JUNIOR**

**ESTRATÉGIAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EMBARCAÇÕES**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para a conclusão Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Náutica - APNT, ministrado no Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

**Orientador: CLC Orlando Carlos Souza da Rocha**

**RIO DE JANEIRO**

**2013**

**LEANDRO TIMM MALTZ JUNIOR**

**ESTRATÉGIAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EMBARCAÇÕES**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para a conclusão Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Náutica - APNT, ministrado no Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

**Orientador: CLC Orlando Carlos Souza da Rocha**

Banca Examinadora (apresentação oral):

---

Prof. (nome, titulação e instituição)

---

Prof. (nome, titulação e instituição)

---

Prof. (nome, titulação e instituição)

Nota: \_\_\_\_\_

Nota Final: \_\_\_\_\_

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

À minha amada família, ao contribuinte brasileiro que paga pelo ensino público no país e aos queridos colegas Garcia, Souto e Tormento, sem os quais eu não teria condições de completar esse curso de aperfeiçoamento que originou este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os professores pelo aprendizado adquirido e pelo auxílio prestado, em especial ao professor orientador Orlando Rocha, que se mostrou em todo momento empenhado a colaborar no desenvolvimento desta monografia.

*" O pessimista queixa-se do vento. O otimista espera que ele mude. O realista ajusta  
as velas".*

*Willian George Ward*

## RESUMO

Aumentar a eficiência energética significa realizar o mesmo trabalho, utilizando uma quantidade menor de energia. Isso aplicado para motores a combustão, pode ser interpretado como menor queima de combustíveis e redução de todos os gases de exaustão resultantes. Uma vasta gama de opções estão disponíveis para aprimorar a eficiência de uma embarcação. O Presente estudo se propõe a analisar as novas regras adotadas para melhorar a eficiência energética do transporte marítimo internacional, que entraram em vigor em primeiro de janeiro de 2013. As emendas a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) incluem um novo capítulo 4 ao Anexo VI, tornando mandatário o Índice de Eficiência Energética de Projeto (EEDI) para novos navios, e o Plano de Gestão de Eficiência Energética (SEEMP) para todas as embarcações. Essas medidas visam reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 30% por tonelada de carga transportada por milha (t/NM) até 2025, conseqüentemente levarão a uma redução do consumo de combustíveis no setor.

Palavras-chave: Eficiência energética, economia de combustível, emissão de gases, sustentabilidade e poluição.

## **ABSTRACT**

Increasing energy efficiency means doing the same work, using a smaller amount of energy. This applied to combustion engines, can be interpreted as less fuel burn and reducing all resulting exhaust gases. An wide range of options are available to enhance the efficiency of a vessel. The present study has the intends to analyze the new regulations aimed at improving the energy efficiency of international shipping entered into force on 1 January 2013. The amendments to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) add a new chapter 4 to annex VI, to make mandatory the Energy Efficiency Design Index (EEDI), for new ships, and Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) for all ships. These measures aim to reduce CO<sub>2</sub> emissions by 30% per tone of cargo carried per mile (T / NM) until 2025, consequently lead to a reduction in fuel consumption in the industry.

Keywords: Energy efficiency, fuel economy, gas emissions, sustainability and pollution.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b>	Navios porta-contêineres: eficiência do transporte em função da capacidade em TEU	18
<b>Figura 2</b>	Componentes da resistência do casco em águas calmas no calado de projeto	19
<b>Figura 3</b>	Os três tipos de bulbos: delta, “O” e nabla	20
<b>Figura 4</b>	Aletas Grothues	24
<b>Figura 5</b>	Duto equalizador de esteira: Schnnekluth	25
<b>Figura 6</b>	Duto Becker’s Mewis	27
<b>Figura 7</b>	Propulsor de passo controlável em posições diversas	30
<b>Figura 8</b>	Propulsor com pás <i>end-plates</i>	32
<b>Figura 9</b>	Diagrama da unidade propulsora <i>Azipod</i>	33
<b>Figura 10</b>	Gráfico das curvas de resistências típicas de um grande navio comercial	35
<b>Figura 11</b>	Pipa de reboque instalada no navio graneleiro “Aghia Marina”	40
<b>Figura 12</b>	Rotores Flettner	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABS</b>	<i>American Bureau of Shipping</i>
<b>ACS</b>	Sistema de Cavidades do Ar
<b>AHR</b>	Aspereza Média do Casco
<b>Cb</b>	Coefficiente de Bloco
<b>CDP</b>	Polímero de Liberação Controlada
<b>CFD</b>	Dinâmica Computacional do Fluido
<b>CLT</b>	Pás de Ponta Carregada
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>EEDI</b>	Índice de Eficiência Energética de Projeto
<b>GHG</b>	Gases Geradores do Efeito Estufa
<b>IMO</b>	Organização Marítima Internacional
<b>LCB</b>	Centro de Carena do Navio
<b>LOA</b>	Comprimento Total do Navio
<b>LNG Carrier</b>	Navio tanque para gás natural liquefeito
<b>MARIN</b>	Instituto de Pesquisas Marítimas da Holanda
<b>MARPOL</b>	Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios
<b>MEPC</b>	Comitê de Proteção ao Meio Ambiente Marinho
<b>PC</b>	Passo Controlável
<b>PF</b>	Passo Fixo
<b>PID</b>	Dispositivos de Incremento da Propulsão
<b>PV</b>	Fotovoltaico
<b>RIPEAM</b>	Regulamento Internacional para evitar Abalroamento no Mar
<b>RPM</b>	Rotações por Minuto
<b>SEEMP</b>	Plano de Gestão de Eficiência Energética
<b>SES</b>	Navio de Efeito Superfície
<b>SFOC</b>	Consumo de Óleo Combustível Específico
<b>SMS</b>	Sistema de Gestão de Segurança
<b>SPC</b>	Copolímero de Auto-polimento
<b>SSPA</b>	Centro de Teste Sueco
<b>TEU</b>	Unidade Equivalente a Vinte Pés
<b>TVF</b>	Pás sem Vórtices nas Pontas

## GLOSSÁRIO

<b>Amura</b>	Partes curvas do costado de um e de outro bordo, junto à roda de proa.
<b>Alheta</b>	Partes curvas do costado, de um e de outro bordo junto à popa.
<b>Boca</b>	É a maior largura da seção transversal do casco.
<b>Bojo</b>	Parte da carena, formada pelo contorno de transição entre a sua parte quase horizontal, ou fundo do navio, e sua parte quase vertical.
<b>Bolina</b>	Chapas ou estruturas colocadas perpendicularmente em relação ao forro exterior, na altura da curva do bojo, no sentido longitudinal, uma em cada bordo, servindo para amortecer a amplitude dos balanços.
<b>Bulbo</b>	Consiste de uma protuberância na proa do navio, cuja função é principalmente diminuir a resistência de ondas.
<b>Calado</b>	É a distância vertical entre a superfície da água e a parte mais baixa do navio naquele ponto.
<b>Carena</b>	Invólucro do casco abaixo do plano de flutuação.
<b>Coefficiente de bloco</b>	É a relação entre o volume deslocado e o volume do paralelepípedo obtido através da multiplicação das dimensões máximas das obras vivas de um navio (comprimento, boca e calado).
<b>Delgados</b>	Partes da carena mais afiladas a vante e a ré, de um e de outro bordo, respectivamente, da roda de proa e do cadaste.
<b>Lastro</b>	Consiste em qualquer material (principalmente água do mar) usado para aumentar o peso e/ou manter a estabilidade de um navio.
<b>Leme</b>	Aparelho destinado ao governo de uma embarcação.
<b>Nó</b>	Unidade de velocidade equivalente a uma milha náutica por hora ou 1,852 quilômetros por hora.
<b>Pés-de-galinha</b>	Conjunto de braços que suportam a seção do eixo do hélice que se estende para fora da carena, nos navios de mais de um hélice.
<b>Proa</b>	Parte de vante de uma embarcação.

**Popa**

É a extremidade posterior de uma embarcação.

**Trim**

É a inclinação para uma das extremidades do navio, normalmente determinada pela diferença entre as leituras dos calados na proa e na popa.

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>MEDIDAS DE DESEMPENHO TÉCNICO</b>	<b>15</b>
1.1	Economia de combustível	16
1.2	Otimização da forma do casco	16
1.3	Principais dimensões	17
1.4	Capacidade de carga	18
1.5	Resistência viscosa	18
1.6	Otimização da proa	20
1.7	Otimização da popa	21
1.8	Propulsão de eixos duplos	21
1.9	Resistência dos apêndices	23
1.10	Dispositivos de incremento da propulsão	23
1.10.1	Aletas Grothues	23
1.10.2	Dutos equalizadores de esteira – Schnnekluth	24
1.10.3	Túnel de popa	25
1.11	Dispositivos pré-hélice	26
1.11.1	Aletas e estatores pré-hélice	26
1.11.2	Estatóres pré-hélice com dutos aceleradores	27
1.12	Dispositivos pós-hélice	28
1.12.1	Aleta de impulso no leme, estatores pós-hélice e lemes assimétricos	28
1.13	Otimização do propulsor	29
1.13.1	Propulsores de passo controlável	30
1.13.2	Propulsores em dutos	31
1.13.3	Propulsores <i>end-plates</i> e Kappel	31
1.13.4	Propulsores contra-rotativos e sobrepostos	32
1.13.5	Propulsores azimutais e <i>azipod</i>	33
1.14	Redução na resistência de superfície	34
1.14.1	Lubrificação por ar	36
1.14.2	Pintura antiincrustante do casco	37
1.15	Energias renováveis	39
1.15.1	Energia Eólica	39

1.15.1.1	Reboque por pipa	39
1.15.1.2	Velas rotores e rotores Flettner	41
1.15.1.3	<i>Turbosails</i>	42
1.15.2	Energia Solar	42
2	<b>MEDIDAS DE DESEMPENHO OPERACIONAIS</b>	43
2.1	Otimização da velocidade de cruzeiro	44
2.2	Estadia nos portos	44
2.3	Otimização da carga transportada	45
2.4	Monitoramento da previsão do tempo na derrota	46
2.4.1	Como funciona	47
2.5	Otimização do trim e calado	49
2.6	Aperfeiçoamento do piloto automático	50
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	52
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	53

## INTRODUÇÃO

O consumo de combustível representa um significativo elemento no custo operacional dos navios. Sendo assim, o transporte marítimo está constantemente engajado no esforço de otimizar o uso de combustíveis. Por outro lado, as embarcações são reconhecidas como o modal de transporte de cargas mais eficientes, segundo o estudo da Organização Marítima Internacional (IMO) sobre Gases Geradores do Efeito Estufa (GHG), publicado em 2009, identificou-se também um relevante potencial para aprimorar a eficiência energética, principalmente através do uso de tecnologias já existentes, como por exemplo motores e propulsores mais eficientes, projeto de cascos aperfeiçoados, e o emprego de embarcações de grande porte, em outras palavras, através de medidas técnicas e de projeto que poderão atingir notáveis reduções no consumo de combustível e nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) resultantes por tonelada de carga transportada. O estudo também concluiu que reduções adicionais poderão ser obtidas através de medidas operacionais, tais como a redução da velocidade empregada, otimização do plano de viagem, monitoramento da previsão meteorológica, etc. Como apontado pela IMO “As melhores alternativas para aumentar a eficiência varia numa grande extensão em razão do tipo de navio, carga, rota, dentre outros fatores...” (MEPC 1/683).

No capítulo 1 deste estudo será abordado as medidas técnicas e de projeto em discussão no Comitê de Proteção ao Meio Ambiente Marinho (MEPC), assim como será levantado as aplicações do Índice de Eficiência Energética de Projeto (EEDI), que continuamente estimulará desenvolvimentos na hidrodinâmica dos cascos, no desempenho dos motores e hélices, bem como a utilização de combustíveis menos poluentes e com melhor rendimento. Enquanto no capítulo 2 será demonstrado as medidas operacionais que deverão ser consideradas ao elaborar o Plano de Gestão de Eficiência Energética (SEEMP), que fará parte do Sistema de Gestão de Segurança (SMS) dos navios, tais como o gerenciamento da velocidade, a otimização das rotações por minuto (RPM) dos motores, a manutenção regular do casco, monitoramento dos parâmetros ambientais de previsão do tempo e do estado do mar, além do controle do lastro e trim da embarcação.

## 1 MEDIDAS DE DESEMPENHO TÉCNICO

Medidas regulatórias foram adotadas pelas partes contratantes da IMO no ano passado e irão requerer, uma vez que entrarem em vigor, um progressivo desenvolvimento na eficiência dos navios e uma conseqüente redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Ficará a cargo da indústria, a decisão como exatamente serão atingidos os objetivos. Existem várias inovações tecnológicas que a indústria poderá adotar para melhorar a eficiência e reduzir as emissões. Será interessante observar quais serão favorecidas.<sup>1</sup>

Koji Sekimizu, Secretário Geral da IMO.

O índice EEDI será obrigatório para novos navios construídos. O termo “novo navio”, conforme resolução MEPC. 203/62, é definido como navio cujo contrato de construção foi assinado em 1 de janeiro de 2013 ou depois, ou na ausência de um contrato, cuja a quilha tenha sido batida ou que esteja num estágio semelhante de construção no período supracitado; ou ainda que tenha a data de entrega em 1 de julho de 2015 ou depois. O EEDI será aplicado para os seguintes tipos de navios com 400 ou mais de arqueação bruta:

- a) navio graneleiro;
- b) navio tanque;
- c) navio tanque transportador de gás;
- d) navio porta-contêiner;
- e) navio transportador de carga refrigerada;
- f) navio de carga geral;
- g) navio mineropetroleiro.

O valor do EEDI está moldado numa fórmula que estima emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada-milha. O numerador é o produto do consumo de combustível dos motores a serem instalados, combinado com a potência instalada no navio após contabilizar as inovações tecnológicas que foram incorporadas ao projeto. O denominador é uma função entre a velocidade de projeto, a capacidade e o fator específico da embarcação. Para determinar o cumprimento da regra, o EEDI calculado deve ser menor que a linha de referência pré-definida para o tipo de navio.

As linhas de referências foram obtidas através de valores históricos, prioritariamente utilizaram se dados dos navios com menos de 10 anos.

---

<sup>1</sup> Tradução do autor

## 1.1 Economia de combustível

As estimativas sobre a economia de combustível nesse estudo são baseadas em valores derivados de alegações de fabricantes e vendedores, relatórios da indústria marítima, experiência operacional e de artigos das sociedades classificadoras. Esses dados foram combinados numa maneira objetiva para refletir, da melhor maneira possível, valores realistas de redução do consumo de combustível esperados na prática. Ainda assim, o valor de economia em algumas medidas são amplos e podem ser incertos em sua performance esperada.

O combustível ou economia de energia são apresentados em uma das seguintes formas, dependendo da medida de eficiência:

- a) redução no consumo de óleo combustível específico (SFOC). Englobam medidas diretamente relacionadas ao consumo do motor, fazendo o motor e/ou seus sistemas auxiliares operarem mais eficientemente;
- b) redução no consumo de energia na propulsão. Está relacionado ao uso de energia do motor principal, e a potência empregada no propulsor e na resistência do casco;
- c) redução geral no consumo de combustível da embarcação. Isso inclui a energia usada nas máquinas auxiliares e está relacionado ao custo total de combustível do navio.

Quando avaliando o possível total de economia para um navio, é importante salientar quais os fundamentos das medidas a serem adotadas. A aplicação de uma medida poderá excluir ou reduzir os benefícios de outras medidas implementadas; a economia estimada de energia de diferentes medidas não são acumulativas.

## 1.2 Otimização da forma do casco

A otimização da forma do casco passa ser reconhecida como uma medida em crescimento na comunidade marítima para aprimorar a eficiência energética dos navios. Quando avaliar a otimização do casco, o armador possui 3 opções disponíveis para consideração:

- a) aceitar o padrão disponível de forma do casco e o propulsor oferecido pelo estaleiro;
- b) modificar um modelo já existente e de preferência bem estabelecido no mercado, direcionando o perfil operacional esperado;
- c) desenvolver um novo projeto.

A primeira opção requer o menor investimento, ao adotar o projeto padrão do estaleiro, uma economia significativa nos custos de construção é alcançada. Muitos desses modelos já foram otimizados para casco e propulsor, entretanto geralmente são analisados somente as condições de plena carga e lastro. Variações nas condições de calado, trim e velocidade não são consideradas para a performance hidrodinâmica do casco.

A segunda opção possibilita a otimização do projeto para condições específicas de serviço. Esse processo geralmente envolve modificações no perfil de proa (bulbo e o corpo de proa), e podem envolver também o perfil da popa, quando são esperadas condições severas de operação.

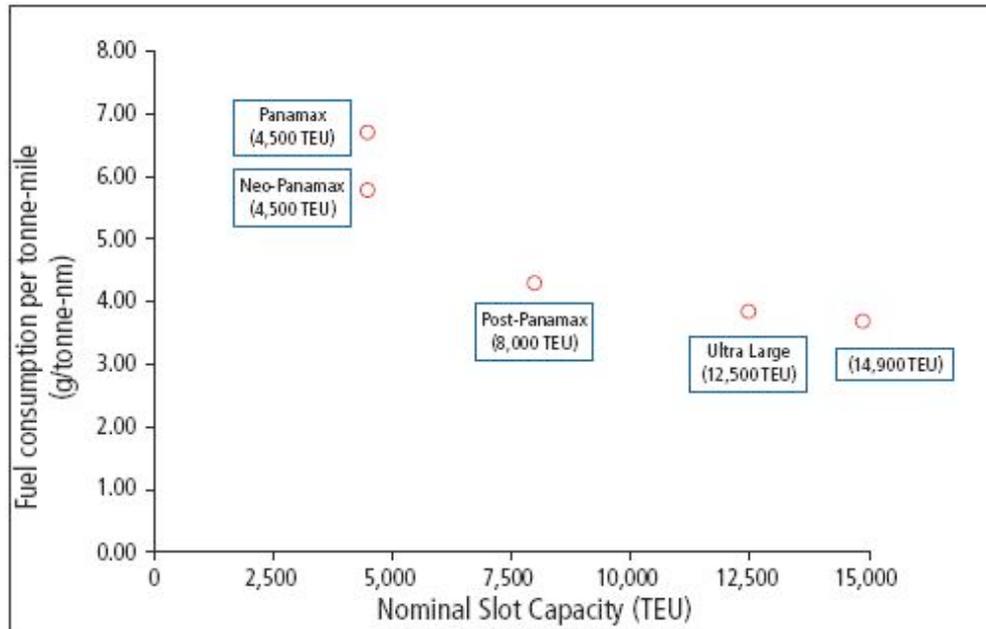
A terceira opção permite otimizar os detalhes do casco para adequar-se ao sistema de propulsão, mas isso irá impactar no custo total do navio. Normalmente, essa opção é justificada quando uma série de navios de grande porte foi encomendada, o estaleiro escolhido não oferece um projeto adequado, quando a economia em operação já é prevista, ou ainda para atender um nicho específico de serviço.

### **1.3 Principais dimensões**

Para efeito de análise, ao simular um aumento no comprimento total de um navio (LOA) enquanto reduz-se sua boca, e se forem mantidos os valores de calado, deslocamento e coeficiente de bloco ( $C_b$ ) constantes, tipicamente resultará numa melhora na eficiência do casco, desde que não haja necessidade de aumentar a quantidade de lastro a bordo para manter adequada estabilidade. Uma maior razão comprimento/boca tende a diminuir a resistência de ondas, enquanto ao reduzir a razão boca/calado tende a diminuir a carena e desta forma a resistência de superfície. Pode-se alcançar reduções no consumo de combustível na ordem de 3 a 5 % ao alterar essas razões na fase de projeto, entretanto haverá em contrapartida um aumento de 0,25 a 1% no custo de construção.

## 1.4 Capacidade de carga

Figura 1. Navios Porta-contêiner – Eficiência do transporte em função da capacidade em TEU.



Fonte: ABS Advisory

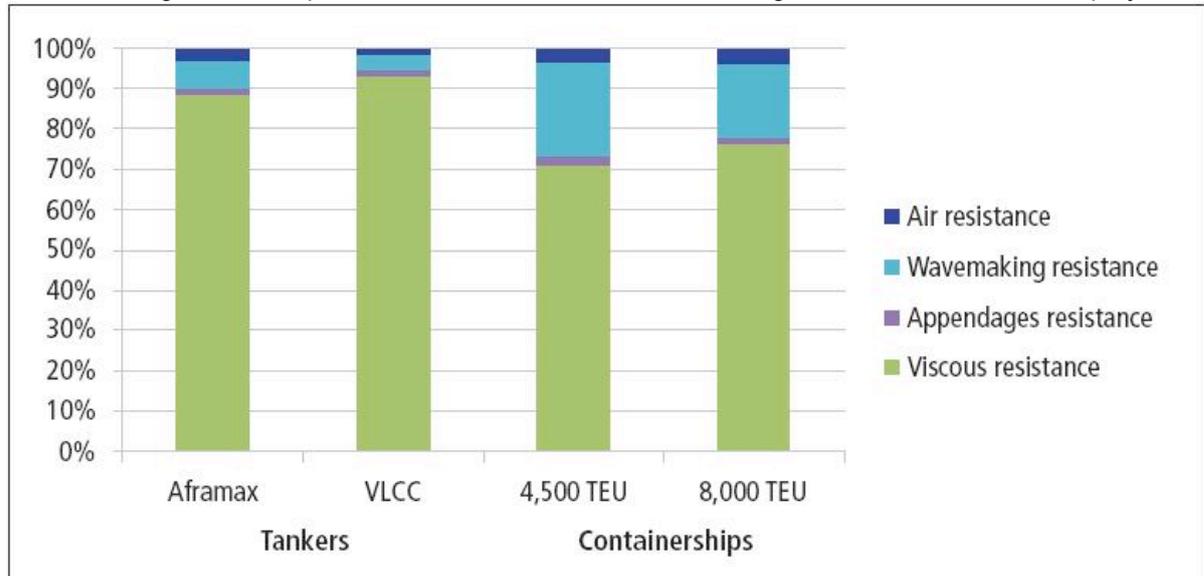
A figura 1 apresenta a eficiência de transporte em termos de consumo de combustível por tonelada-milha de carga transportada (g/t-NM) para navios porta-contêineres em função da capacidade em TEUs. Uma velocidade de 22,5 nós foi atribuída para todos os projetos.

Como podemos observar, uma significativa economia em consumo de combustível é obtida ao realizar a economia de escala no uso de navios maiores no transporte de contêineres. Entretanto, essa economia obtida diminui à medida em que se eleva a capacidade de carga, ao aumentar a capacidade de 4.500 TEU (Neo-Panamax) para 8.000 TEU (Post-Panamax) reduz-se o consumo de combustível em aproximadamente 25%, já na mudança de 8.000 TEU para 12.500 TEU (*Ultra Large*) a redução no consumo cai para 10% e só será plenamente realizada, caso a capacidade da embarcação seja efetivamente utilizada.

## 1.5 Resistência viscosa

A otimização da performance hidrodinâmica do casco de um navio e seu propulsor para atingir uma melhor eficiência na propulsão e utilizar uma menor potência envolve diversos esforços relacionados.

Figura 2. Componentes da resistência do casco em águas calmas no calado de projeto



Fonte: ABS Advisory

Ao observar a figura 2, a resistência viscosa (superfície) é a maior componente entre as resistências ao avanço, correspondendo 70 a 93% do total em navios tanques e porta-contêineres. O percentual atribuído a resistência viscosa é maior ainda em navios maiores e lentos. A variação da resistência de ondas é diretamente proporcional ao aumento da velocidade de serviço, e é uma parcela mais significativa em navios rápidos e estreitos que em navios maiores e lentos.

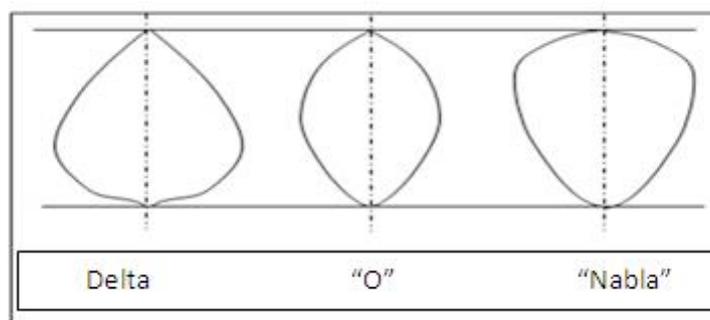
Quando um casco de forma mais volumosa (navios tanques) está sendo desenvolvido, a ênfase é colocada na redução da carena, já que a resistência viscosa é o maior componente nessa situação. Outra importante consideração é prover uma suave e gradual transição para o propulsor, evitando a separação da camada limite e uma esteira mais uniforme na popa. Isso motiva a alteração do centro de carena (LCB) para vante, entretanto cuidados devem ser tomados para evitar uma transição abrupta na proa. Mitigar a propagação de ondas geradas na proa é tão importante quanto reduzir a resistência de ondas. Empregar uma proa volumosa (em U) é recomendado sobre uma proa fina (em V). A Proa em “U” tende a acomodar uma suave transição e esse perfil permite ainda mudar o centro de carena da região de meia nau para avante da embarcação, resultando num melhor desempenho dos navios de grande porte e uma menor resistência geral ao avanço.

## 1.6 Otimização da proa

A otimização da proa inclui considerações no projeto do bulbo, na entrada da linha d'água, na amura e na transição para a curvatura do bojo. Cálculos do fluxo potencial são normalmente aplicados nesse processo.

O projeto apropriado do bulbo reduz a resistência de ondas através da produção do seu próprio sistema, que deve ser defasado do sistema de ondas gerados na proa, criando um efeito de cancelamento destrutivo e uma redução da resistência total. O fluxo será mais horizontal com o adoção do bulbo, reduzindo o efeito de turbilhonamento no bojo `a vante. Os fatores físicos considerados na construção do bulbo incluem: volume, comprimento e forma. O bulbo tipo nabla é mais eficiente na condição de projeto, já o tipo delta funciona melhor para calados abaixo do calado de projeto (por exemplo, condição em lastro ou carregamento parcial) e do tipo "O" oferece uma solução balanceada entre as acima expostas.

Figura 3. Os três tipos de bulbos: delta, nabla e "O"



Fonte: Oceânica – UFRJ (2010)

A forma em "V" (da proa) pode ser introduzida na base do bulbo para mitigar os impactos de cargas violentas das ondas. Navios rápidos, mais finos favorecem o uso de um volume maior e uma maior extensão do bulbo. O tipo pescoço de ganso ou alongado são particularmente efetivos quando o calado e a velocidade variam numa pequena faixa apenas. Navios volumosos como os navios tanques e graneleiros são comumente dotados com bulbos possuindo uma grande área de seção média e entrada em forma de "U", para comportar-se como um bulbo tradicional na condição de carregamento e atuar como extensão da área de linha d'água na condição em lastro. Em combinação com técnicas de otimização, o projeto do bulbo deve ser desenvolvido com muita atenção usando cálculos de fluxo

potencial e viscoso. Larsson e Raven detalham esses aspectos de desenvolvimento no livro “Princípios de Arquitetura Naval”.

As características do bulbo devem ser cuidadosamente balanceadas com a forma de entrada e a transição para amura e bojo. Bulbos são mais efetivos para alguns números de Froude (razão entre velocidade/comprimento) e calado. Mudanças na velocidade e no calado podem alterar significativamente a geração de ondas, de tal forma que reduções na velocidade e no calado podem atuar até no aumento da resistência de ondas. A companhia Maersk relatou economia de até 5% do combustível consumido, ao utilizar seus navios numa faixa mais favorável de calado e velocidade para o bulbo projetado.

### **1.7 Otimização da popa**

A otimização da popa inclui esforços para mitigar a geração de ondas na popa, melhorar o fluxo para propulsor e evitar o efeito de turbilhonamento. Um projeto apropriado da popa pode reduzir a produção de ondas na alheta, e ao aprimorar o fluxo na popa resultará também numa propulsão mais eficiente. Cálculos de fluxo potencial são usados para avaliar os efeitos da geração de ondas pela alheta. Entretanto, cálculos de fluxo viscoso são necessários para avaliar o fluxo na popa para o propulsor, relevantes progressos foram realizados no desenvolvimento e aplicações de dinâmica computacional do fluido (CFD) no fluxo viscoso nos últimos anos, até o ponto que a interação propulsor-leme possa ser melhor avaliada.

No projeto dos delgados da popa de apenas um eixo, podem ser utilizados os formatos em “V”, em “U” e bulbo. A tendência atualmente é o uso do formato em bulbo, já que a esteira resultante reduz a cavitação e a vibração.

### **1.8 Propulsão de eixos duplos**

A propulsão com dois eixos oferece maior manobrabilidade e redundância, e ainda podem ser adotadas quando a potência exigida ultrapassa os limites da configuração com eixo simples (por exemplo, restrição de calado e diâmetro do propulsor). Para o projeto de eixos duplos há opção do uso de pés-de-galinha (para os abertos) ou *skegs* duplos.

Para eixos duplo abertos a eficiência é geralmente comprometida quando comparada a configuração com apenas um eixo, devido ao aumento da resistência de apêndices (pés-de-galinha e sapatas). A introdução do projeto dos *skegs* duplos elimina a necessidade desses apêndices acima mencionados, e podem oferecer uma melhor performance hidrodinâmica, especialmente para navios volumosos ( $C_b > 0,70$ ) e aqueles com boca amplas e/ou calados menores.

Para navios volumosos, o Centro de Teste Sueco (SSPA) descobriu que a configuração com *skegs* duplos, proporciona de 2 a 3% de aumento de eficiência sobre projetos de eixo simples bem otimizados com características correspondentes. Se o diâmetro do propulsor na configuração com eixo singelo for subdimensionado devido a restrições de calado, a utilização do arranjo com eixos duplos permitirá uma melhora de 6% ou mais na eficiência de propulsão.

Enquanto há melhoras na eficiência geral do navio, em relação ao consumo de combustível, a opção por eixos duplos possui algumas desvantagens que deverão ser avaliadas. As mais notáveis dessas desvantagens são:

- a) a carena será tipicamente de 4 a 5% maior com eixos duplos sobre eixo simples. Quanto menor o  $C_b$ , maior será o efeito na superfície molhada;
- b) o peso em aço no casco aumentará (aproximadamente de 4 a 5% em navios tanques);
- c) a configuração com eixos duplos são mais dispendiosas para construir.

A otimização do projeto e o posicionamento dos *skegs* duplos devem considerar diversos fatores. A distribuição do fluxo entre as partes internas e externas dos *skegs* são importantes, e será influenciado pela distância entre os *skegs*, a inclinação e sua forma. *Skegs* estreitos, com ângulos assimétricos para permitir a pré-rotação do fluxo, podem aumentar a eficiência do propulsor, mas cuidados devem ser tomados para manter linhas de fluxo diretas e prevenir a fuga prejudicial sobre os *skegs*.

Existem numerosos projetos e arranjos de instalações disponíveis para eixos duplo, cada um específico para o projeto da embarcação selecionado, por isso é essencial que os esforços na otimização consistam em avaliações de CFD e testes em modelo para se atingir o resultado desejado. É recomendado uma avaliação incorporando ambos os propulsores e estimativas do ângulo de leme ideal.

## 1.9 Resistência de apêndices

Para navios de carga em condição de águas calmas, a resistência de apêndices é em torno de 2 a 3%. Aproximadamente, metade da resistência é atribuída ao leme e a outra parte para as bolinas no bojo. A influência do leme pode aumentar substancialmente em condições severas de mar ou para navios direccionalmente instáveis.

A resistência adicional gerada pela adoção de impelidores laterais na proa podem atingir na faixa de 1 a 2% em águas calmas. Barras são frequentemente colocadas nas aberturas perpendicularmente a direção do fluxo. Elas servem para interromper o fluxo laminar e reduzir os vórtices gerados. Túneis anti-sucção podem ser utilizados para reduzir variações na pressão de um lado ao outro do túnel de proa.

## 1.10 Dispositivos de incremento da propulsão

Em geral, dispositivos de equalização da esteira e alívio da separação do fluxo são recursos para aperfeiçoar o fluxo ao redor do casco, os quais foram desenvolvidos para obviar problemas no propulsor e/ou resistências adicionadas ao navio causado pelas imprecisões na forma do casco na popa. Assim sendo, eles são menos efetivos quando a geometria da embarcação fora corretamente projetada, com os olhos na otimização do fluxo no propulsor e evitando a geração de efeitos hidrodinâmicos indesejáveis, como os vórtices no bojo. Os mais comuns dispositivos de incremento da propulsão (PID) são aletas Grothues, dutos Schneekluth e túneis de popa.

### 1.10.1 Aletas Grothues

As aletas Grothues são pequenas placas curvas triangulares soldadas na lateral do casco em frente ao propulsor e acima do seu eixo. Sua função é desviar o fluxo de água para baixo, desta forma ele é redirecionado horizontalmente na direção do propulsor. Grothues originalmente propôs esses dispositivos para minimizar/prevenir a formação de vórtices na quilha de popas em forma “U” de navios com altos coeficientes de bloco (navios tanques e graneleiros). Entretanto,

testes em tanques proveram algumas indicações que eles poderiam melhorar também a eficiência do propulsor, em vista da maior porção de água disponível para parte superior do propulsor e um componente menor da esteira no plano do eixo (ambos efeitos de equalização da esteira). Na melhor das hipóteses, aletas podem prover uma limitada quantia de impulso adicional para o navio, com o resultado do redirecionamento do componente vertical do fluxo na direção horizontal.

Figura 4. Aletas grothues



Fonte: MARIN (2009)

A efetividade desses dispositivos dependem em grande parte no correto alinhamento da borda de ataque ao fluxo, uma curvatura gradual da placa que previna a separação do fluxo na aleta, e o correto dimensionamento e posição do dispositivo para maximizar os benefícios, sem desnecessariamente aumentar a resistência de superfície e o arrasto. Tudo isso deve ser realizado através de técnicas de visualização do fluxo (testes em tanques e/ou CFD) mas, na realidade, é difícil imaginar como essas condições ideais podem ser mantidas quando o fluxo é perturbado pelo movimento da embarcação e as ondas. Grotheus-Spork relatou valores de redução inferiores a 10% para cascos não otimizados de alto  $C_b$ . Menores benefícios podem ser esperados para outros tipos de navios.

#### 1.10.2 Dutos equalizadores de esteira: Schneekluth

O propósito do duto equalizador de esteira é similar ao das aletas Grothues, no sentido que ambos os tipos de dispositivos tentam redirecionar o fluxo para a parte superior do disco propulsor, assim homogeneizando a esteira e melhorando a eficiência do casco. Entretanto, diferente das aletas Grotheus, os dutos Schneekluth

aceleram o fluxo através da força de sustentação criada pela forma da seção do duto. O último pode ser projetado para permitir maiores variações do ângulo de ataque, do que as aletas Grothues, desta forma melhorando a efetividade do dispositivo em condições reais de operação. Também, o formato e dimensões do duto podem ser otimizados para adequar-se a navios de maiores velocidades que os normalmente apropriados as aletas Grotheus, provendo uma porção redirecionada do fluxo adicional, requerida para obter uma esteira quase uniforme.

Figura 5. Duto equalizador de esteira: Schnnekluth



Fonte: MARIN (2009)

Finalmente, a área de baixa pressão criada na frente do duto pode ter efeitos benéficos em termos de unir as camadas separadas do fluxo do casco nas proximidades do duto. Entretanto, é possível também que o fluxo na popa já esteja uniforme e unido, essa mesma baixa pressão poderá ao invés de aumentar o impulso, deduzir esse fator nesse caso.

### 1.10.3 Túnel de popa

O túnel de popa é um apêndice do casco instalado horizontalmente acima e a frente do disco propulsor, o qual desvia a água para baixo. Na maioria dos casos, esse dispositivo é uma atualização para reduzir os efeitos da esteira em popas de forma em “V” muito pronunciadas, com isso reduzindo a vibração. Um grande

número desses dutos foram projetados e instalados em navios precisamente para esse fim.

Entretanto, em alguns casos, eles foram usados para garantir que o propulsor de maior diâmetro estará apropriadamente submerso, mesmo no calado de lastro. Nesses casos, um aperfeiçoamento geral na eficiência de propulsão podem ser obtidos, mas deve ser observado que o projeto incorreto pode influenciar ambas as resistências de superfície e ondas, e produzir perdas significativas na eficiência do casco, particularmente com o trim pronunciado pela popa.

### **1.11 Dispositivo pré-hélice**

Os dispositivos pré-hélice são apêndices hidrodinâmico do casco com objetivo de condicionar o fluxo da esteira ao impor uma rotação inversa ao do propulsor, desta forma melhorando o ângulo de ataque das pás do propulsor. Além disso, o fluxo gerado opõe-se ao fluxo rotacional induzido pelo propulsor. Como resultado, o fluxo saindo do disco propulsor poderá conter um mínimo de momento na direção circunferencial, assim solicitando menos energia cinética para produzir o impulso.

Os dispositivos foram projetados e instalados como atualização em navios existentes e como um atributo das novas construções. Normalmente, eles podem ser utilizados em fluxos não otimizados (o tipo em duto particularmente), mas eles atuam melhor em esteiras já otimizadas. Nesse sentido, eles podem ser considerados como inteiramente complementares para outras abordagens de otimização, com exceção das linhas de popa assimétricas.

#### **1.11.1 Aletas e estatores pré-hélice**

As aletas e estatores pré-hélice são conjuntos diretamente em frente ao propulsor em torno do seu eixo. O número e orientação dessas aletas não é sempre simétrico em bombordo e boreste, por causa da distribuição vertical desigual da esteira em frente do dispositivo, que combine com a necessidade de criar um fluxo rotacional igual depois do dispositivo e a frente do propulsor. Estatores podem ter

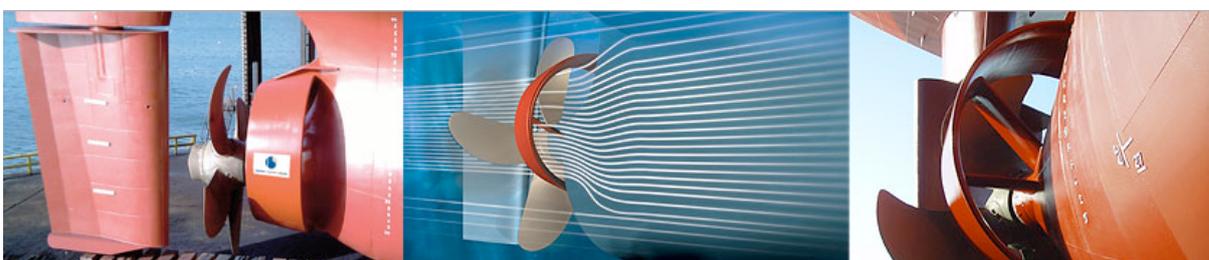
um pequeno anel bocal, principalmente para prover maior força ao arranjo e melhorar marginalmente a eficiência.

Esse tipo de projeto pré-hélice é melhor ajustado e instalado em navios rápidos com propulsores carregados, como aqueles em navios porta-contêineres. Nesses casos, não há necessidade de acelerar mais o fluxo para o propulsor e a rotação solicitada pode ser gerada com um número mínimo de aletas (normalmente três de um lado e uma no outro), então limitando o aumento do arrasto imposto pelo sistema. Deve-se notar que esses dispositivos normalmente requerem que o projeto do propulsor seja otimizado para trabalhar após o estator, então a carga adicional criada pelo fluxo do dispositivo seja adequadamente acomodado.

### 1.11.2 Estatores pré-hélice com dutos aceleradores

Vários dispositivos incluindo o propulsor de duto integrado Mitsui, o bocal Hitachi's Zosen, o duto integrado Sumitomo's Lammeren e o duto Becker's Mewis combinam o estator pré-hélice com o duto acelerador. O duto pode não ser simétrico ao eixo e um dos seus papéis é homogeneizar o componente axial da esteira. Entretanto, o duto aumenta a eficiência da aleta pré-hélice também, por prover um maior fluxo de água para o estator. Além disso, o duto contribui para o impulso total em virtude da força de sustentação criada pela aceleração do fluxo sobre suas paredes.

Figura 6. O duto Becker's Mewis e sua atuação no fluxo.



Fonte: Becker Marine

Dispositivos integrados estator-duto são normalmente instalados em embarcações volumosas e seu projeto é consideravelmente complexo, pois cada componente do arranjo casco-duto-estator-propulsor interagem entre si. Entretanto, deve ser notado que em geral, o tamanho do duto deve ser reduzido com aumento

da velocidade e com a redução do  $C_b$ , caso contrário as penalidades em termos de resistências adicionais podem ultrapassar os ganhos na eficiência da propulsão.

### 1.12 Dispositivos pós-hélice

O papel dos dispositivos pós-hélice é condicionar o fluxo após o propulsor. Em vários casos, isso significa tentar converter o componente rotacional do fluxo criado pelo propulsor para um fluxo axial útil. Em outros, é somente uma questão de suprimir o fluxo de características prejudiciais (como os vórtices no centro do propulsor) ou desviá-lo para melhorar a eficiência do leme. Em contrapartida, isso pode permitir o uso de um leme menor, por isso reduzindo a resistência geral de apêndice.

Por tentarem condicionar o fluxo após o propulsor, esses dispositivos invariavelmente estão associados com o projeto do leme. De fato, alguma sobreposição deve ser esperada entre possíveis aperfeiçoamentos no impulso de propulsão e benefícios na eficiência do leme, então o projeto do arranjo deve levar ambos os aspectos em consideração.

Já que a performance dos dispositivos e o leme estão intimamente conectados, é importante verificar a efetividade de ambas as partes e a ausência de efeitos prejudiciais para todas as condições de operação do leme e propulsor, particularmente em termos de esforços e fadiga.

Dispositivos pós-hélice podem ser equipados em linha com um arranjo pré-hélice (um caso notável é o navio porta-contêiner Christophe Colomb). Entretanto, devido ao dispositivo pré-hélice já diminuir o fluxo rotacional passando no propulsor, uma redução na efetividade do dispositivo pós-hélice deve ser aguardada. Assim como, todos os PIDs esse efeito deve ser estudado extensivamente com o uso de análises da CFD e testes em modelo na fase de projeto para evitar tornar um dispositivo de incremento numa fonte adicional de arrasto prejudicial, em problemas estruturais e vibração, ou ambos.

#### 1.12.1 Aleta de impulso no leme, estatores pós-hélice e lemes assimétricos

Todos os dispositivos acima tentam desviar o fluxo do propulsor para transformar seu componente rotacional num fluxo axial útil. Essa idéia vem dos

estatores após os rotores das turbinas. O conceito funciona melhor quando estator não é montado diretamente no leme, como isso impõe uma orientação horizontal para as aletas do estator na esteira após o propulsor, desta forma torna-se impossível otimizar os ângulos de ataque nas aletas do estator quando o leme é utilizado. Esse efeito também aumenta a possibilidade de danos estruturais por causa das cargas desbalanceadas a bombordo e a boreste do leme.

Além disso, aletas de impulso e estatores são algumas vezes montados no cadaste do leme e podem estar associados com o difusor do propulsor, um bulbo Costa ou ambos. Nesse caso, a compressão no fluxo criada pelo bulbo aumenta (mas também retifica) o fluxo que atinge as aletas do estator, assim reduzindo o tamanho necessário das aletas.

Lemes assimétricos são aqueles que o perfil da parte superior do leme acima do eixo do propulsor e aqueles abaixo são otimizadas para trabalhar na esteira do propulsor. Por causa disso, lemes assimétricos geralmente possuem uma curvatura no bordo de ataque, algumas vezes combinados com o bulbo Costa logo após o centro do propulsor. Esses tipos de lemes também tiram vantagens do fluxo rotacional após o propulsor mas esse efeito é normalmente usado para melhorar a eficiência do leme do que criar impulso adicional.

### **1.13 Otimização do propulsor**

Em geral, propulsores com maior diâmetro e com menos pás, operando em baixa rotação (RPM) são mais eficientes do que seus correspondentes mais rápidos e menores. Entretanto, este princípio geral é balanceado pela necessidade de uma área razoável para a atuação do propulsor, pela distribuição nominal da esteira após uma dada forma de casco, e pela necessidade de ajustar o propulsor e o motor para uma melhor performance.

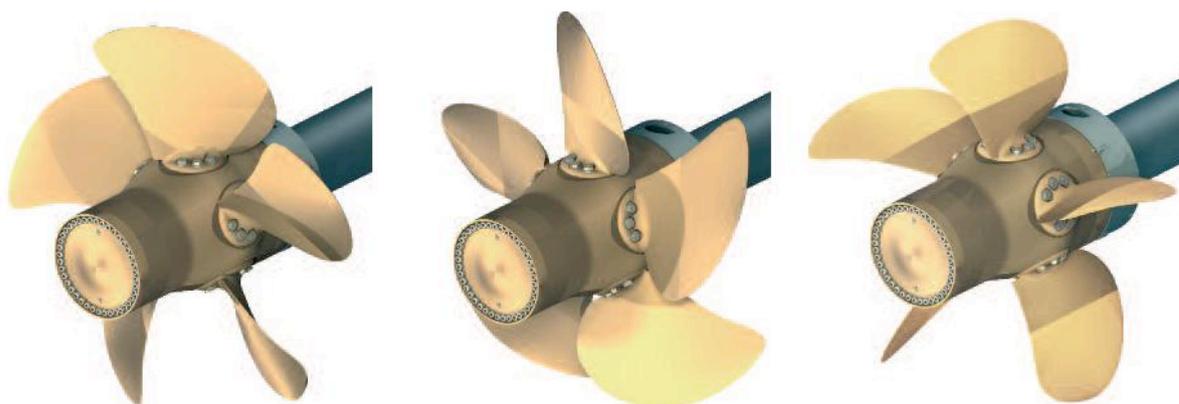
Esse tipo de otimização é feita rotineiramente na etapa de projeto, quando as características principais do propulsor, e sua detalhada geometria é otimizada para atingir a melhor performance para a velocidade e calado de projeto. Entretanto, pode haver interesse em revisar as opções do propulsor quando optar-se pela navegação em baixa velocidade com uma determinada embarcação num longo período de tempo. Nesse caso, o custo adicional da operação do navio fora das especificações

de projeto por um longo período poderão justificar reexaminar o projeto original do propulsor.

Similarmente, quando examinando o projeto de uma nova construção, pode ser recompensador otimizar o propulsor e a performance hidrodinâmica do casco não apenas para a velocidade e calado de projeto, mas também para aquelas situações fora das condições de projeto, que a embarcação poderá encontrar durante seu período de vida útil. Foi demonstrado que a otimização em torno da velocidade e calado de projeto não garantem uma performance aceitável nas condições fora de projeto.

### 1.13.1 Propulsores de passo controlável

Figura 7. Propulsor de passo controlável em posições diversas



Fonte: Becker Marine

Propulsores de passo controlável (PC) não são comumente vistos como propulsores de alta eficiência. De fato, eles apresentam uma menor performance quando comparados aos de passo fixo (PF) quando usados em RPM fixo em condições fora de projeto. A razão para isso é que o RPM elevado e pequenos ângulos de inclinações invariavelmente criam um severo fluxo sobre as pás com a criação de cavitação e resultando em vibração e ruídos altos.

Entretanto, propulsores PC podem alcançar melhores resultados do que os PF em condições fora do projeto, quando o RPM é alterado para combinar os ajustes de *pitch*. Isso é possível através da reprogramação dos controladores do passo para maximizar a eficiência do propulsor nessas condições diferentes do projeto. Isso pode ser particularmente importante, se é provável que o navio opere

em velocidade reduzida por períodos de sua existência. Mesmo quando o gerador é operado através do saque de energia do eixo principal, é possível variar a frequência da corrente gerada para permitir a redução da RPM.

### 1.13.2 Propulsores em dutos

Propulsores em dutos são aqueles operando em uma seção de tubo cilíndrico. O perfil da seção do duto é similar a um aerofólio e tem a função de acelerar ou desacelerar o fluxo na frente, durante e após a passagem no propulsor. Dutos desaceleradores são raros em navios mercantes e a maioria é usada para controlar a cavitação. Dutos aceleradores são normalmente usados para melhorar as características de propulsão dos navios de baixa velocidade (notavelmente a maioria rebocadores). Nesses casos, uma significativa porção do impulso é gerada pela força de sustentação criada no duto pela aceleração do fluxo, mas esse efeito é prejudicado pelo arrasto adicional criado pelo próprio duto, esse último torna-se mais evidente a medida em que a velocidade da embarcação aumenta.

Enquanto é importante combinar a geometria do duto a velocidade do navio (dutos menores são utilizados em navios velozes), é imperativo que o propulsor seja otimizado para operar no fluxo criado pelo duto. Particularmente, foi demonstrado que o espaço livre entre a ponta das pás e o duto, e a sua carga tem um vasto efeito na eficiência do duto.

Um outro uso para essa tecnologia são os dutos direcionáveis, quando o leme é substituído por um duto que rotacional em torno do eixo vertical da linha do disco propulsor. Esse tipo de duto é limitado pelo angulo máximo de giro, que o duto pode ser operado eficientemente e foi geralmente substituído pelo padrão de propulsores azimutais com dutos.

### 1.13.3 Propulsores *end-plates* e Kappel

Ambos os tipos de propulsores possuem a geometria da ponta das pás modificadas, visando reduzir ou suprimir os vórtices criados nas pontas e melhorar a eficiência geral de propulsão. A maior diferença entre eles é que o propulsor Kappel

alcança isso ao curvar as pontas das pás, enquanto o propulsor com placas nas pontas – também conhecidos como pontas carregadas (CLT) ou ponta sem vórtices (TVF) – são caracterizados pela maior espessura na ponta com uma placa fina estendendo-se na direção do lado de maior pressão da pá.

Figura 8. Propulsor com pás *end-plates*



Fonte: MARIN (2009)

A idéia por trás desse tipo de propulsor é similar dos *winglet* no final das asas das aeronaves, com a supressão dos vórtices das pontas, permitindo maiores cargas nessa região da pá. Apesar da considerável área adicional de superfície molhada somadas as pás do propulsor nas partes externas, causando fortes efeitos na resistência viscosa, ainda assim são alegados amplos ganhos em eficiência.

Uma das características atrativas dos propulsores Kappel é que eles são compatíveis em principio com um numero de outros dispositivos econômicos/eficientes e estão disponíveis tanto em passo controlável quanto passo fixo.

#### 1.13.4 Propulsores contra-rotativos e sobrepostos

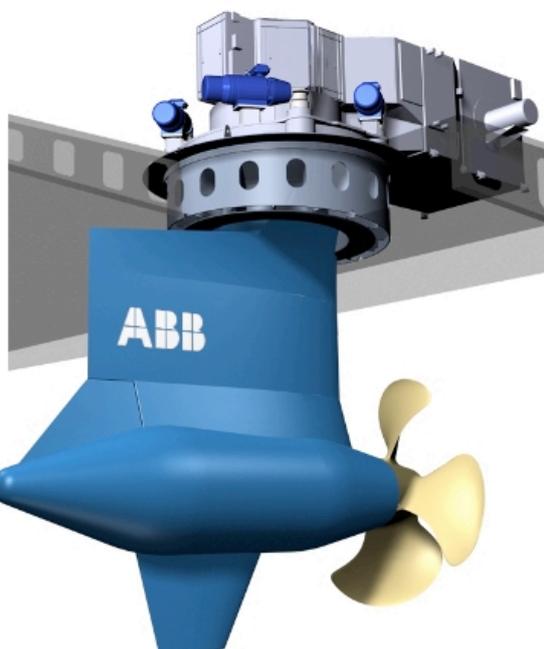
Os propulsores contra-rotativos e os sobrepostos tem o potencial para aumentar a eficiência de propulsão através da utilização do fluxo rotacional do propulsor a montante, de forma a condicionar a esteira na frente do propulsor a jusante, similarmente aos rotores pré-hélice. A diferença entre os contra-rotativos e os sobrepostos é que na última configuração, os dois propulsores não compartilham o mesmo eixo. Embora, essa característica simplifique consideravelmente os

mecanismos do eixo, isso impõe uma esteira desbalanceada para o propulsor a jusante. Por esta razão, os propulsores sobrepostos são raramente usados na prática.

Propulsores contra-rotativos tem sido usados historicamente quando as forças rotacionais de um único propulsor precisa ser balanceada, como é o caso dos torpedos. Entretanto, devido ao complexo arranjo mecânico do eixo, propulsores contra-rotativos não tem sido usados extensivamente em navios mercantes, mas recentemente eles foram aplicados em alguns tipos de propulsores azimutais. Devido as variações do fluxo nos propulsores a montante e a jusante, operando num arranjo contra-rotativo, a geometria deles são significativamente diferentes, incluindo o número de pás, que são projetadas para evitar vibrações harmônicas indesejáveis.

### 1.13.5 Propulsores azimutais e *Azipod*

Figura 9. Diagrama da unidade propulsora *Azipod*



Fonte: ABB

A idéia por trás dos propulsores azimutais e *azipod* é combinar as funções de propulsão e governo para obter melhores características para ambas. Indiscutivelmente, grandes ganhos foram alcançados pela utilização desta tecnologia em termos de manobrabilidade, mas sua adoção ainda está restrita para um setor do mercado, em parte porque os ganhos de eficiência atingidos pela

eliminação da necessidade de um leme, foram compensados pelo maior custo de instalação desses dispositivos, a limitada potência disponível para cada unidade, e um certo número de problemas relacionados com sua complexidade.

A diferença principal entre *Pods* e os propulsores azimutais é que no primeiro, o propulsor é energizado por um motor elétrico localizado no interior do receptáculo (*pod*) imediatamente após ou antes do hélice, enquanto nos propulsores azimutais, o propulsor é alimentado por uma linha de eixo em “L” ou em “Z”, com o motor localizado no interior do casco.

Enquanto os *Pods* foram adotados extensivamente durante a última década em navios passageiros e *ferries*, propulsores azimutais foram usadas principalmente em instalações *offshore* e rebocadores. Como os propulsores azimutais normalmente trabalham em condições próximas as de força de tração (*bollard pull*), eles geralmente são instalados em dutos.

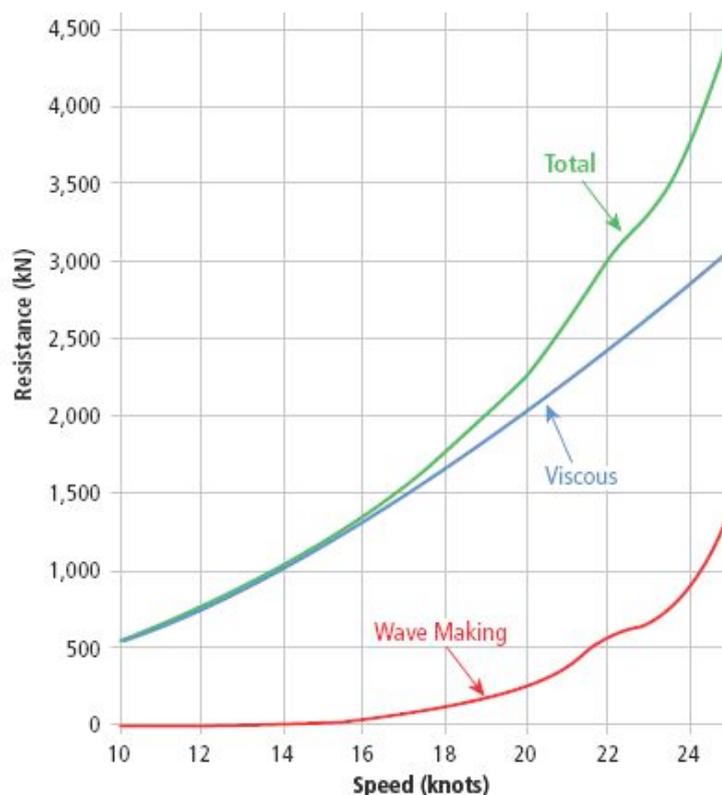
#### 1.14 Redução na resistência de superfície

A resistência viscosa representa o maior componente da resistência de um casco movendo-se pela água. Isto é particularmente verdadeiro para navios lentos, quando a resistência de ondas é pequena tanto em porcentagem total, quanto em termos absolutos. Entretanto, até mesmo em navios velozes (onde a resistência de ondas pode representar 30% ou mais do total) reduzir a resistência viscosa é ainda extremamente atrativo, já que essa força aumenta em função da velocidade do navio elevada ao quadrado, portanto tornando-se a fonte de uma importante parcela do total de energia consumida pelo navio em seu deslocamento.

O maior componente da resistência viscosa é a resistência de superfície, a qual dependerá da superfície molhada do casco da embarcação e a maneira com que ele arrastará a água em contato e ao seu redor, a medida em que o navio move-se através da água. Até certo ponto, a resistência de superfície pode ser reduzida por três métodos: redução da superfície molhada (linear), redução da velocidade (quadrática) ou aperfeiçoando a maneira com que a superfície molhada interage com o fluido em contato. Reduzir a velocidade e/ou a superfície molhada são as formas mais fáceis e eficientes para diminuir a resistência de superfície. Entretanto, ambas afetam significativamente a operacionalidade da embarcação. Por essa razão, um grande quantidade de desenvolvimento tem sido dedicada ao longo dos

anos para melhorar a interação fluido-casco, ou alterando o comportamento do fluido (através da densidade, viscosidade e o crescimento da camada limite) ou por aperfeiçoar a textura da área de superfície molhada, para que ela ofereça uma melhor interação com o fluido.

Figura 10. Gráfico das curvas de resistências típicas de um grande navio comercial



Fonte: ABS Advisory

A maior parte dos tratamentos da superfície molhada em navios mercantes é feito através da utilização de tintas. Estes são projetados para minimizar o crescimento da vida marinha no casco e, normalmente, para tornar sua superfície lisa. Analisaremos a seguir algumas tendências mais recentes de pesquisas, que mostram que uma superfície lisa não é necessariamente o melhor em termos de redução da resistência de superfície. Além disso, há várias propostas (algumas ainda em fase de investigação), que pretendem reduzir significativamente o atrito da superfície através do uso da lubrificação por ar. A última técnica pode ser vista, quer como uma tentativa para reduzir a superfície molhada ou como uma tentativa para melhorar as características dos fluidos viscosos.

### 1.14.1 Lubrificação por ar

A lubrificação por ar não deve ser confundida com outros métodos semelhantes para separar a superfície molhada da água, tal como os colchões de ar (como usado nos *hovercrafts* e nos navios de efeito solo ou SESs). A ideia geral é semelhante, mas na lubrificação por ar, a tentativa é de minimizar a energia necessária para forçar o ar permanecer sob a influência das partes do casco, que normalmente ficariam em contato com a água. Isto faria a tecnologia atraente não apenas para embarcações de alta velocidade, mas para todas as embarcações.

Existem dois tipos principais de lubrificação por ar. Nos sistemas de cavidade de ar (ACS), uma camada fina de ar é mantida ao longo das partes planas do fundo do navio, com o auxílio de bombas e apêndices do casco. Em condições ideais, isto equivale a uma efetiva redução da superfície molhada, à custa da energia necessária para as bombas e a resistência adicional devido às modificações do casco. Um método alternativo é o de reduzir efetivamente a densidade e melhorar o comportamento viscoso da água em contato com o casco, misturando-o com o ar sob a forma de microbolhas.

Nos sistemas de cavidade de ar, quando uma camada estável pode ser mantida (tipicamente para pequenos números de Froude) reduções significativas na resistência de superfície podem ser alcançadas, aproximadamente proporcional à diminuição da área da superfície molhada obtida. No entanto, com a velocidade crescente, a estabilidade da cavidade de ar torna-se mais e mais difícil de manter. Quando a estabilidade da cavidade de ar rompe-se, um aumento efetivo na resistência de avanço global do navio é observada. Este efeito, é claro, é agravado pelos movimentos de um navio no mar.

A atratividade dos sistemas de microbolhas é que não é preciso assegurar estabilidade do fluxo de ar ao longo do casco, como no caso do ACS. Além disso, a quantidade de energia necessária para criar microbolhas seria menor do que a necessária para uma cavidade de ar, e a quantidade de superfície molhada tratada maior, uma vez que as microbolhas podem ser criadas em qualquer lugar ao longo do casco, em vez de apenas ao longo da parte plana do fundo. No entanto, a experiência da Maersk-MARIN parece indicar dois problemas principais com esta metodologia. Em primeiro lugar, não é possível produzir uma quantidade suficiente de microbolhas no tamanho correto em larga escala e mantê-la por uma longa

extensão do seu percurso ao longo do casco, já que as bolhas se expandem e se fundem. Isto reduz severamente a capacidade da mistura de ar/água de diminuir a resistência de superfície. Posteriormente, é muito difícil conseguir que a mistura ar/água permaneça em contato com casco ou suficientemente próximas, uma vez que as microbolhas deixarem seus orifícios.

#### 1.14.2 Pintura antiincrustante do casco

Atualmente, existem três tipos de revestimentos diferentes em ampla utilização e que oferecem resistência diferente para incrustações, tem um impacto diferente sobre aspereza do casco, e têm diferentes requisitos para a frequência de limpeza. Independentemente do tipo de pintura, também é importante notar que a quantidade de incrustações pode variar muito com os padrões comerciais adotados e o perfil operacional da embarcação.

- a) polímero de liberação controlada (CDP): um tipo de antiincrustante tradicional baseado em uma resina hidrossolúvel de pinheiro natural ou sintética misturada com um biocida. Uma resina de polímero insolúvel de reforço é adicionado para criar um esqueleto para dar a resina de pinheiro melhores propriedades mecânicas. A dissolução controlada da matriz de resina, libera os biocidas. Ao longo do tempo uma acumulação de materiais insolúveis na superfície da camada lixiviada retarda a libertação do biocida e torna difícil o recobrimento. A água em movimento (ou limpeza) é necessária para desgastar este esqueleto de co-resina e liberar a próxima camada de revestimento e do biocida. A vida típica antes do recobrimento é de 3 anos, mas devido a acumulação na camada lixiviada e a redução da libertação do biocida, micro incrustações (limo verde ou algas) podem tornar-se um problema em menos de dois anos. Na aspereza média do casco (AHR) é estimado um aumento em cerca de 40  $\mu\text{m}$  por ano no perfil da superfície, mas esta pode variar muito;
- b) copolímero de auto-polimento (SPC): um polímero orgânico sintético ou metálico insolúvel (por exemplo, acrilato de cobre ou acrilato de sililico), que contém um biocida. Através de uma reação química - hidrólise - o polímero torna-se solúvel em água. A sua dissolução

subsequente libera o biocida. A reação química proporciona um bom controle da velocidade de dissolução e os resultados numa camada lixiviada muito mais fina e um perfil de superfície mais suave do que é possível com CDP. Nenhum deslocamento do navio é necessário porque não há nenhum "esqueleto" residual e a superfície é, na verdade, de auto-polimento. Cinco anos de serviço para sistemas de alta qualidade pode ser alcançado. AHR é estimado um aumento em cerca de 20  $\mu\text{m}$  por ano;

- c) revestimento antiaderente: um revestimento livre de biocida que usa as propriedades antiaderentes para controlar incrustações. Geralmente é de silicone ou flúor-silicone baseado e projetado para desprender qualquer micro ou macro incrustações, quando o navio está em deslocamento. Para as embarcações mais lentas (inferiores a 15 nós), este é um desafio mesmo para os melhores revestimentos, será necessária alguma limpeza leve para remover as micro incrustações. Se o navio está parado por algum tempo, as cracas e outras biotas maiores podem aderir ao casco. Só com uma velocidade suficiente da embarcação, eles irão se desprender da superfície. Conseguir uma libertação completa de todas as incrustações tem sido um desafio, em alguns casos. O revestimento ganha alguma da sua eficácia a partir de sua superfície extremamente lisa e esta deve ser mantida para melhor desempenho. A aspereza nesse tipo de revestimento vai reduzir a sua capacidade para desencorajar a adesão e o limo (micro incrustações) podem tomar conta. Danos mecânicos de defesas e rebocadores é especialmente crítico para este tipo de revestimento, que requer cuidados especiais em operações como as partes danificadas não terão mais as propriedades de desencorajar incrustações. AHR é estimado um aumento de 5  $\mu\text{m}$  por ano, mas baseia-se numa experiência de serviço muito limitado.

### 1.15 Energia renováveis

A utilização de fontes de energia renováveis está se beneficiando da vasta atenção internacional em diversas áreas industriais, incluindo o transporte marítimo.

Na nossa indústria, as tentativas nesse sentido estão se concentrando, naturalmente, na energia eólica, uma vez que é facilmente disponível no mar e tem uma história de uso bem sucedido. No entanto, painéis solares fotovoltaicos (PV) também estão sendo consideradas em áreas específicas, tais como a geração de energia auxiliar.

### 1.15.1 Energia eólica

Vento tem sido usado para impulsionar navios a milênios, mas os grandes benefícios práticos dos sistemas de propulsão modernos fizeram um progressivo declínio e desaparecimento das velas de todos os navios mercantes. A possibilidade de retornar as velas, tem de ser integrada com a complexidade das operações impostas por este tipo de propulsão. No entanto, os grandes benefícios de economia de combustível que a energia eólica pode fornecer não devem ser subestimadas.

A energia eólica parece ser razoavelmente fácil de conseguir de forma efetiva. Infelizmente, a tecnologia disponível comercialmente hoje, não é suficientemente avançada para atingir este objetivo. No entanto, um progresso significativo tem sido feito ao longo dos últimos anos, e é razoável esperar mais melhorias a curto prazo. A seguir, as tecnologias mais promissoras em desenvolvimento são discutidas.

#### 1.15.1.1 Reboque por pipa

Reboque por pipas são atualmente a única tecnologia de energia eólica disponível comercialmente para navios. O princípio por trás disso é relativamente simples, embora a tecnologia necessária para lançar, controlar e recuperar a pipa seja bastante complexa. Na prática, a potência extra é fornecida para impulsionar o navio pela pipa empinada presa à proa do navio. A velocidade da pipa através do ar aumenta a sua eficiência em comparação com as velas normais, mas a instalação necessita de um computador para controlar a pipa.

TU Delft e MARIN estimam que grandes economias de combustível são possíveis utilizando este sistema para navios mais lentos (tipicamente navios graneleiros e navios-tanque), no entanto, o envelope de operacionalidade das pipas são limitados a uma faixa relativamente estreita de condições de vento

(essencialmente ventos quadrantais), o que limita ainda mais a utilidade destes sistemas. A fim de avaliar o real custo-benefício das pipas, portanto é necessário estimar o seu potencial quando implementado em rotas específicas, onde os padrões de vento podem ser previstos.

Figura 11. Pipa de reboque instalada no navio graneleiro “Aghia Marina”



Fonte: Skysails

A verdadeira preocupação com as pipas de reboque está na complexidade de sua operação e os riscos associados com o comportamento do sistema durante as tempestades. Como os maiores ganhos fornecidos pelas pipas de reboque são quando fortes ventos de popa estão presentes, é fundamental que o sistema possa ser operado de forma segura, confiável e sem esforço adicional dos recursos já limitados da tripulação disponíveis a bordo.

#### 1.15.1.2 Velas rotores, rotores Flettner e moinhos de ventos

Rotores Flettner são velas cilíndricas verticais, girando em torno de seu eixo. A força de propulsão é gerada na direção perpendicular à do vento atingindo o rotor, em resultado do efeito Magnus. Por esta razão, velas rotores oferecem o máximo de eficiência perto das condições de vento aparente pelo través da embarcação, característica que poderia torná-las interessantes como um complemento para as pipas de reboque.

No entanto, os rotores são normalmente alimentados por um motor diesel impulsionando-os para atingir o RPM necessário. Além disso, a menos que eles sejam feitos para rebater telescopicamente no convés para minimizar o arrasto aerodinâmico quando não estão em uso, podem aumentar o consumo de combustível para uma grande gama de direções de vento. Por essas razões, não está claro se a eficiência global desses sistemas podem oferecer-lhes uma chance real de sucesso comercial.

Figura 12. Rotores Flettner



Fonte: ENERCON

### 1.15.1.3 *Turbosails*

*Turbosails* foram propostas por Jacques-Yves Cousteau, Bertrand Charrier e Lucien Malavard como uma forma de melhorar significativamente a eficiência das velas convencionais, limitando assim o tamanho necessário para movimentar uma embarcação e o seu efeito de inclinação. O princípio consiste em utilizar um ventilador no topo de um cilindro vertical oco para extrair o ar da mesma. As entradas no lado de sotavento da vela, serão abertas então para criar uma grande depressão e aumentar significativamente sustentação.

*Turbosails* foram montadas no “Alcyone” e operadas em paralelo com dois motores diesel padrão. Um sistema automático regula o funcionamento do ventilador das velas e a propulsão padrão para otimizar o desempenho. Embora este sistema é uma forma interessante de reintroduzir propulsão eólica na indústria naval moderna, muito poucos dados públicos estão atualmente disponíveis sobre o seu desempenho real.

### 1.15.2 Energia solar

Tem havido tentativas de usar painéis fotovoltaicos para energizar pequenas embarcações, como o catamarã “Planet Solar” de 30 m de comprimento, destinado a circunavegar o mundo num conjunto de 500 m<sup>2</sup>. No entanto, por causa da baixa produção elétrica por unidade de superfície, painéis solares fotovoltaicos são mais adequadas como uma fonte adicional de energia auxiliar. Nesta função, eles já foram utilizados em embarcações comerciais, como a navio *ro-ro* “NYK Auriga Leader”, equipados com 328 painéis solares a um custo de US\$ 1,68 milhões. A energia gerada pelo painel solar de 40 kW neste navio é usado para iluminação e outras aplicações nos camarotes dos tripulantes.

A desvantagem óbvia da energia solar PV é o alto custo de capital destas plantas, que ainda não se beneficiaram de grandes economias de escala. É de se esperar que, com aumento da demanda por este tipo de tecnologia em outras aplicações terrestres, uma aplicação mais ampla no setor de transporte marítimo será viabilizada.

## 2 MEDIDAS DE DESEMPENHO OPERACIONAIS

As ferramentas mais úteis e diretas para o Armador melhorar a performance do navio são as decisões operacionais realizadas diariamente na condução da viagem, a realização de manutenções regulares e o monitoramento do consumo de combustíveis. Toda viagem oferece oportunidades para otimizar a velocidade, encontrar a rota mais segura por boas condições de tempo, e assegurar que a embarcação está navegando no melhor calado e trim, e regulada para manter o rumo eficientemente. O ciclo de manutenções deve considerar a resistência adicional agregada ao casco e propulsor pelo acúmulo de incrustações.

Monitorar o uso da energia regularmente e precisamente pela frota pode indicar ineficiências e prover mecanismos para o melhoramento contínuo. Divulgar os dados coletados de consumo de energia pela frota pode despertar entre as tripulações uma centelha de competição para um melhor desempenho.

Esses esforços estão diretamente relacionados com as diretrizes estabelecidas pela IMO no Guia para Elaboração do Plano de Gestão de Eficiência Energética (MEPC.213/63), que captura o comprometimento corporativo para conservação de energia em navios em serviço e para um gerenciamento da eficiência energética.

Há vários fatores operacionais que podem ser gerenciados no decorrer da viagem para aumentar a eficiência. Eles serão abordados em mais detalhes nesse capítulo, por outro lado também é importante considerar todos esses fatores combinados para máximo ganho. Isto está se tornando uma regra, a medida em que mais e mais sistemas de gerenciamento da performance de viagem são oferecidos no mercado.

Estes sistemas de gerenciamento e/ou software integram e otimizam algumas ou todas as decisões operacionais para economia de combustível. Isso inclui a velocidade para chegada na hora certa, redução da resistência adicional causada pelo estado do mar severo (vento, ondas e correntes) com o monitoramento dos parâmetros ambientais na derrota, minimizar o uso do leme com sistemas adaptativos de piloto automático, otimizar a quantidade de lastro a bordo na viagem e o trim para uma menor resistência ao avanço, e realizar mudanças para reduzir a estadia no porto.

Os sistemas mais capazes utilizam modelos preditivos combinando todos esses fatores para planejar a mais eficiente viagem – qual rota escolher, qual velocidade usar em cada pernada, qual o melhor trim e o quanto de lastro carregar, e finalmente qual a estratégia de piloto automático adotar, de acordo com as condições do mar.

## **2.1 Otimização da velocidade de cruzeiro**

A velocidade do navio tem um impacto drástico no consumo de combustível a bordo, pois a velocidade empregada em função da potência de propulsão requerida está elevada a terceira ou quarta potência aproximadamente. Por exemplo, isso significa que ao dobrar a velocidade, irá aumentar a potência requerida por um fator ao menos oito vezes maior. Igualmente, navegar com 90% da velocidade de projeto requer somente 75% da carga. A dedução correspondente no consumo total de combustível é defasada um pouco pelo maior tempo gasto para completar a viagem. Então, ao diminuir a velocidade em 10%, o navio poderá atingir uma economia de 20% em combustíveis para uma determinada viagem. Com este importante resultado em mente, torna-se compreensível o substancial interesse em reduzir a velocidade, especialmente com a escalada do preço dos abastecimentos. Por isso, este fator foi incluído na fórmula do EEDI.

Entretanto, dependendo das condições de mercado de frete, navegar com a velocidade reduzida pode resultar em perdas comerciais. O mercado demanda um prazo para entrega da carga, os afretadores podem estipular uma velocidade contratual a ser cumprida, os motores e equipamentos auxiliares podem falhar com o emprego contínuo em condição de baixa carga, e mais navios podem ser solicitados para movimentar a carga. Encontrar o equilíbrio entre baixo consumo e esses outros custos é o que otimização de velocidade se trata. Como as exigências, do mercado estão em constante mudanças, a velocidade ideal não é fixa e deve ser reavaliada regularmente.

## **2.2 Estadia nos portos**

As melhores oportunidades para diminuir o consumo podem ser atingidas através da redução do tempo de estadia nos terminais de carga. Isso pode ser

alcançado através do aumento da velocidade de operação de carga, quando as restrições de programação permitirem. Investir em melhores equipamentos de movimentação de carga, mais rápidos ou um maior número de guindastes ou rampas, empregar estivadores adicionais, aperfeiçoar equipamentos de atracação/amarração no navio e cais, e melhorar o gerenciamento do terminal para uma melhor e mais eficiente operação de carga pode ser tudo parte do plano para menor estadia.

A dificuldade é que o armador ou afretador, para quem os benefícios podem ser revertidos, podem não ser aqueles controlando a operação do terminal ou os investimentos em tecnologias e pessoal. Contudo, qualquer opção para reduzir a estadia deve ser investigada pelo seu potencial retorno através da menor velocidade e consumo de combustíveis na viagem. Um benefício adicional para encurtar a estadia no porto é reduzir o desenvolvimento das incrustações e perdas originadas por seu acúmulo no casco. As incrustações geralmente ocorrem durante os períodos estagnados.

### **2.3 Otimização da carga transportada**

O combustível gasto por cada tonelada de carga transportada pode ser reduzida através da maximização do uso da capacidade total de carga da embarcação. Economizar combustível por navegar leve é uma falsa economia. Infelizmente, a utilização de carga é frequentemente uma simples questão de demanda de mercado e muito pouco o armador pode fazer, exceto otimizar o emprego de navios adequados ao volume de carga que ele pode atrair nesse determinado mercado.

Quando há carga suficiente para um carregamento completo da embarcação, é importante utilizar toda a sua capacidade. Para que isso seja alcançado, os *planners* e a tripulação precisam de ferramentas precisas e rápidas para calcular os calados, trim, esforços e a estabilidade da condição de carregamento, para que alterações na distribuição dos pesos possam ser feitas para uma melhor utilização. Relacionado a esse processo está o uso eficiente do lastro, especialmente para atingir a condição otimizada de calado/trim.

Opções na estivagem da carga podem diretamente impactar o consumo de energia. Por exemplo, colocar contêineres no convés conta para a forma

aerodinâmica total do navio, e irá afetar a resistência ao vento. Estivar os contêineres refrigerados para minimizar o ganho de calor pelo elemento refrigerante ou otimizar o controle da temperatura da carga líquida transportada pode reduzir o uso de geradores ou quantidade de vapor empregado.

## **2.4 Monitoramento da previsão do tempo na derrota**

Planejar as viagens de acordo com a condição de tempo esperada foi uma prática aceitável por um longo período de tempo. Por pelo menos 50 anos, os computadores foram usados para ajudar na previsão de tempo e avaliar viagens simuladas. O principal objetivo é selecionar o rumo do porto de partida para o porto de destino que proporcione uma passagem segura e confiável para chegar pontualmente no destino, enquanto considerando o vento atual, ondas e condições de corrente esperadas na derrota. A maior alteração nos últimos anos foi a mudança de foco para navegação segura e eficiente em energia. O monitoramento dos parâmetros ambientais e previsão de tempo na derrota está relacionado ao gerenciamento da performance da viagem onde o objetivo é atingir a velocidade ideal com o menor consumo de combustível possível enquanto protegendo a segurança da tripulação, passageiros, carga e o próprio navio. Assim sendo, ela é parte da solução de prover planejamento logístico eficaz e facilitar o efetivo uso da redução de velocidade.

O seu âmago é um serviço (não um produto). Ele é provido por um operador, cuja companhia desenvolveu experiência em arrecadar e interpretar dados meteorológicos, determinar o vento e estado do mar resultante, e avaliar a resposta da embarcação na condição de tempo previstas. O serviço será tão bom quanto as habilidades em prever o tempo e a experiência do provedor contratado forem confiáveis. Existem contínuos avanços na coleta de dados meteorológicos, na modelagem matemática da atmosfera e sistemas de tempo, e na sofisticação na previsão das ondas oceânicas baseadas em modelos de vento e corrente.

Cada provedor tenta muitas vezes distinguir-se no mercado com sua técnica e modelo matemático registrado. Modelos da performance do navio também são fatores distintivos. O fator mais crítico da performance do navio é o de redução da velocidade nas diversas condições de mar reinantes. Alguns provedores usam um modelo genérico de navio com similares características para realizar suas previsões.

Outros usam a exata característica geométrica da embarcação em estudo. O algoritmo de cálculo pode ser derivado dos dados de teste em modelo, uma simples fórmula empírica, medições em escala real ou ser baseadas em cálculos diretos dos movimentos da embarcação e resistências adicionadas.

O serviço de monitoramento está disponível em diversas formas e podem variar com funções complementares. Por exemplo, as informações de acompanhamento podem ser enviadas ao navio simplesmente por email. Ou pode haver aplicativos nos computadores a bordo e/ou na base, que permitam uma grande gama de funções de gerenciamento do navio e da frota. Funções adicionais que se tornaram bastante populares incluem aplicativos no computador a bordo para visualizar a derrota e informações de performance do navio, e permitem ao Comandante interagir com a ferramenta de previsão.

Algumas ferramentas tentam prever os movimentos e esforços reais no casco da embarcação e alertar a tripulação para limitar excessos (como nas condições onde o balanço, caturro e esforços atingirem níveis elevados). Essas ferramentas preveem mudanças no comportamento do navio ao alterar a proa/rumo, permitindo ao Comandante realizar correções imediatas no rumo para situações severas. Sistemas mais avançados podem incorporar seleções dos usuários para restrições de segurança e reduções voluntárias da velocidade. Sistemas de gerenciamento de frota que permitem acompanhar em tempo real cada navio são também comuns agora, monitorar o desempenho do navio em relação a derrota planejada, e indicadores chaves de performance. A integração com produtos de outras empresas como o *Google Earth* fazem o acompanhamento da frota mais fácil e abrangente.

#### **2.4.1 Como funciona**

O processo de seleção da derrota envolve a simulação de numerosas possibilidades de rotas levando em consideração as condições de vento, das ondas e de corrente ao longo do percurso. Os dados do clima são atualizados em intervalos regulares para a posição estimada do navio e todos os limites de segurança são verificados. Para o propósito da seleção da derrota as limitações de segurança incluem limites de movimentos do navio para conforto dos passageiros/tripulação, assim como a segurança da carga. Podem existir também limites relacionadas ao risco de danos a estrutura pelo impacto das ondas na proa e

convés. Dificuldades em manter o rumo em determinadas proas e outras recomendações operacionais podem ser levadas em consideração pelas mais sofisticadas ferramentas de monitoramento de viagem.

A capacidade da embarcação manter a velocidade em determinada proa e estado do mar é calculada usando os dados de performance do navio. A velocidade e proa sobre o fundo é então determinada e o progresso estimado pelo percurso é registrado. Se os limites de segurança não são satisfeitos em algum ponto na derrota, esta será rejeitada e outra derrota (proa e velocidade) selecionada.

O monitoramento é baseado em diferentes tipos de previsão do tempo e meteorológicas. Previsões de curto período de 3 a 5 dias estão geralmente disponíveis e são confiáveis. Elas são baseadas em observações atuais, incluindo medições da pressão de superfície e da coluna de ar, bóias ondógrafo e coletas de dados de satélite, e modelos meteorológicos. Estender as previsões até 14 dias é usualmente realizado através da consulta de padrões históricos de climatologia e modelos globais de ondas para os parâmetros ambientais atuais e usando estes para realizar as previsões do estado do mar. As previsões estendidas permitem um estudo ampliado de possíveis mudanças de rumo, como as necessárias em sistemas de tempestade desenvolvidas.

Independente das previsões de tempo, o monitoramento da derrota deve ser atualizado regularmente (duas vezes ao dia) com informações das observações dos parâmetros ambientais do navio, posição atual e as previsões do tempo de curto período na posição. Comunicação direta e frequente entre o provedor do serviço e o navio não apenas permite a atualização regular da derrota, mas também permitem o navio receber alertas de severidade e duração de tempestades, assim como a resposta esperada da embarcação (movimentos, redução de velocidade). Também é muito útil o *feedback* para o provedor das previsões do tempo ao final da viagem em relação a performance do navio e estado do mar para ajudá-los atualizar seus modelos.

O monitoramento das parâmetros ambientais de previsão do tempo é mais benéfico em viagens longas (superiores 1.500 NM) quando a rota navegável não é restrita, de forma que haja efetivamente opções de rumo, e onde o estado do mar é um fator na performance do navio. Ele é mais comumente usado em navios rápidos, de formas estreitas em serviço de linha regular. Estas embarcações são mais suscetíveis ao danos e reduções de velocidade nas viagens. Entretanto,

embarcações mais lentas e de forma volumosas podem alcançar alguns benefícios, especialmente quando combinados com acordos do afretador que permitam a chegada no momento certo para operação no terminal. Nesses casos, o simples acompanhamento da previsão do tempo, que ajude evitar tormentas e minimizar a velocidade média da viagem serão suficientes.

Ao selecionar o provedor, o operador deve levar em consideração a experiência do provedor, a sofisticação do modelo computacional para obter planos de viagens confiáveis. O número de serviços oferecidos é enorme. Ao operador é recomendado contratar este serviço com cuidado, e pode até considerar contratar um perito para encontrar o serviço que melhor atenda suas necessidades específicas.

## 2.5 Otimização do trim e calado

As formas do casco são tradicionalmente projetadas e otimizadas para um ou dois calados principais, assumindo trim zero. O complexo regime de fluxo na proa e na popa são cuidadosamente ajustados para estes calados para atingir a menor resistência. Se o nível da água na proa ou popa é apenas levemente diferente (por exemplo 0,5 m) que o ponto de projeto, a resistência pode aumentar o suficiente para causar um notável aumento no consumo de combustível. Algumas vezes o calado leve no trim errado pode ter maior resistência que o calado em plena carga no trim apropriado.

Uma embarcação em serviço pode navegar uma relevante parte da viagem em calados diferentes do calado de projeto. Igualmente, a distribuição de carga, lastro e consumíveis geralmente guiará para um trim diferente daquele presumido durante o projeto do casco. Até mesmo, projetos de novos navios, os quais foram otimizados numa maior escala de calados operacionais, irá navegar algumas vezes além da escala otimizada de calados e trim. O que é crítico para a melhor eficiência de consumo é prover o Comandante e o *planner* com informações que permitam eles escolherem a melhor combinação de calado e trim para carga e consumíveis que devam transportar. Distribuir carga e consumíveis na medida do possível e selecionar a quantidade apropriada e a localização do lastro, torna-se então o mecanismo para alcançar o calado e trim otimizados para uma determinada pernada da viagem.

Nos últimos anos um grande número de ferramentas de otimização do trim apareceram no mercado. Elas simplesmente suprem o navio com um programa de computador que mostra o trim mais eficiente para um determinado calado e permite o Comandante ajustar o lastro e consumíveis para ganhar algum benefício. As melhores ferramentas facilitam a otimização da quantidade de lastro, assim como sua distribuição. Elas podem estar integradas com o programa de carga da embarcação e/ou com os sensores de calado para leituras diretas. Ele também é vantajoso se o *planner*, tendo significativo controle sobre a distribuição e trim do navio, possua acesso a ferramenta de otimização de trim.

A grande diferença entre as ferramentas disponíveis a venda, é como elas determinam o trim otimizado em determinado calado. O método varia significativamente e existe uma divergência de opiniões sobre qual abordagem é a mais precisa. Os métodos podem ser classificados em cálculos teóricos ou testes, e medições a bordo do navio em serviço. Dentre essas categorias há ainda variações.

## 2.6 Aperfeiçoamento do piloto automático

Movimentos do leme adicionam arrasto para o casco e aumentam a resistência. Minimizar o número de vezes que o leme é utilizado e o valor de ângulo de leme, que é aplicado para manter o rumo ou executar uma alteração de rumo, irá economizar combustível. Isto é verdadeiro sobre governo manual, assim como no *autopilot*. Ao avaliar quanto de leme aplicar, o limite de controle é normalmente o desvio de rumo permitido. Tolerar maiores desvios de rumo irá reduzir o uso do leme e movimentos angulares, mas pode aumentar a distância navegada também. Realizar escolhas corretas sobre os limites e possuir um piloto automático que consiga minimizar o uso do leme em qualquer condição de mar pode resultar em economias de combustível de até 1% sobre um piloto automático mal calibrado ou governo manual.

Piloto automáticos convencionais dependem simplesmente, usualmente linear, da relação entre ângulo do leme e razão de guinada. Estes são bons controles para formas de casco estáveis direccionalmente e quando os ângulos de leme são pequenos. De fato, alguns armadores descobriram que seus navios direccionalmente estáveis e/ou em rota com bom tempo, permitem que minimizem o uso de leme, com o tipo linear simples de piloto automático. A regra de ouro para

boa performance é não realizar mais de seis a dez pequenos movimentos de leme por minuto, e uma esteira observada que é reta.

Quando o navio é direccionalmente instável e/ou em condições severas (devido ao vento, ondas e corrente), ângulos maiores de leme serão necessários. Além disso, mudanças no calado, velocidade e lâmina d'água pode mudar a relação fundamental entre ângulo do leme e a resposta do navio (razão de guinada). Um sistema adaptativo recebe *feedback* da razão de resposta do navio em determinado ângulo de leme e automaticamente ajusta, ou adapta o modelo de controle de governo. Um modelo de governo adaptativo para condição atual ajuda prevenir o uso frequente ou ângulos em excesso do leme no governo do navio e nas alterações de rumo.

É o programa do piloto automático que toma as decisões chaves e os fabricantes frequentemente tem o seu próprio modelo matemático registrado para esse controle de rumo adaptativo. Muito já foi escrito pelos matemáticos e teóricos em sistema de controle sobre esse assunto, mas esses conhecimentos não são divulgados pelos fabricantes do equipamento. Ao escolher um sistema de governo, deve-se julgar sua performance baseado nas qualidades, como a precisão em manter o rumo base, a ação rápida do leme com ângulos menores, o menor *swing* da proa do navio até mesmo em condições de mar adversas e a maior velocidade de guinada. Através da medição da frequência de movimentos do leme e os ângulos de leme empregados no modo de controle do rumo, é possível determinar pelo menos numa base qualitativa quão bem o piloto automático está atuando.

Embora não tão importante quanto o sistema adaptativo de piloto automático e sua habilidade de auto ajustar para condições de mar e condições de carregamento diversas, a seleção da estratégia de governo pode ter um impacto na eficiência de consumo de combustível. Os *autopilots* normalmente permitem ao usuário selecionar limites no controle do leme ou proa, por exemplo, o máximo de desvio permitido. Essas seleções devem ser baseadas na eficiência total de combustíveis e incluir considerações na distância navegada. Um acompanhamento da viagem ou uma ferramenta de performance podem integrar essas opções na previsão geral de governo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho foram apresentadas diversas tecnologias modernas que propõem a redução do consumo de combustível bem como a melhor utilização dos recursos energéticos empregados na indústria marítima.

O conceito de sustentabilidade, segundo o relatório de Brundtland (1987), é a habilidade das gerações presentes suprirem as suas necessidades, sem afetar as possibilidades das gerações futuras suprirem as suas, surge, então, a necessidade de reduzir o consumo das energias não renováveis garantindo a disponibilidade das mesmas para as gerações futuras.

Uma questão que transcende qualquer medida específica, mas é fundamental para a seleção e adoção de melhorias de eficiência nos navios deve ser mencionado aqui também. Para muitas embarcações, o proprietário e/ou operador do navio não receberá diretamente o benefício na economia de combustível das medidas de eficiência. Os benefícios muitas vezes reverterem para o afretador, que é quem paga efetivamente o combustível. Infelizmente, o que reduz o incentivo do proprietário a investir em navios eficientes.

Se arranjos forem desenvolvidos para o proprietário e/ou operador, para acumularem os benefícios diretos dos investimentos em eficiência energética, podem levar a navios significativamente mais eficientes. Para os armadores incapazes de compartilhar os benefícios da redução dos custos de combustíveis, o maior incentivador para adoção dessas medidas pode ser o regime regulatório em evolução e suas próprias políticas ambientais.

A abordagem dada neste trabalho a estas novas tecnologias teve como primeiro objetivo identificar quais eram as novas tecnologias disponíveis dando uma breve descrição de cada uma delas e identificando algumas das aplicações do uso destas tecnologias nos aspectos de eficiência energética da navegação. Embora muitas destas tecnologias já tenham sido submetidas ao crivo da ciência, muitas delas são tão recentes que ainda não dispõem de dados confiáveis a não ser aqueles apresentados e divulgados pelos próprios fabricantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABS. **Ship energy efficiency measures advisory**, ABS, Houston, 2013. Disponível em: <<http://www.eagle.org/>>. Acesso em: 03 ago 2013.

ASARIOTIS, Regina; BENAMARA, Hassiba. **Marine transport and the climate change challenge**, United Nations – Earthscan, 2012.

BRAGA, Alfésio; PEREIRA, Luiz Alberto Amador; SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento. **Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana**, Faculdade de Medicina da USP, 2002.

ENDRESSEN, Oyvind; SORGARD, Eirik; BEHRENS, Hanna Lee; BRETT, Per Olaf; ISAKSEN, Ivar S. A. **A hystorical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions**, Journal of Geophysical Research, Volume 112, 2007.

KLEINER, Kurt. **The Shipping Forecast**. Nature, International weekly jornal of Science, 449 ed. 2007.

LEWIS, Edward V. **Principles of Naval Architechture**, Society of Naval Architechts and Marine Engineers, Vol. 2, 1989.

MARTINS, Marcelo Ramos; NATACCI, Faustina Beatriz. **Metodologia para Análise Preliminar de Riscos de um Navio de Transporte de Gás Natural Comprimido**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDUSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **Plano Setorial de Mitigação da Mudança Climática para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação**, Brasília, 2012.

ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL. **Convenção Internacional para prevenção da Poluição por Navios – MARPOL 73/78**, IMO, Londres, 2009.

\_\_\_\_\_. MEPC 62/24. **Relatório da 62ª Sessão do Comitê de Proteção do Meio Ambiente**. IMO, Londres, 2011. Disponível em: <<http://www.docs.imo.org/>>. Acesso em: 03 ago 2013.

\_\_\_\_\_. MEPC 63/23. **Relatório da 63ª Sessão do Comitê de Proteção do Meio Ambiente**. IMO, Londres, 2011. Disponível em: <<http://www.docs.imo.org/>>. Acesso em: 03 ago 2013.

ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL. **Second IMO GHG Study 2009**, IMO, Londres, 2009.

PRIEBE, Paul D. **Modern commercial sailing ship fundamentals**. Centreville, Cornell Maritime Press, 1986.

PRATT, Joseph A.; CASTANEDA, Christopher James. **Offshore Pioneers: Brown & Root and the History of Offshore Oil and Gas**, 1997.

SANTANA, Walter Araújo; TACHIBANA, Toshi-ichi. **Propostas de metodologias técnico-ambientais para o desenvolvimento do transporte comercial de cargas nas hidrovias**, Departamento de Engenharia Naval, São Paulo, 2002.

SHEPHERD, James; WALTON, Gary M. **Shipping, Maritime Trade, and the Economic Development of Colonial North America**. Cambridge University Press, Nova Iorque, 1972.

SHUENEMAN, Tom. **The MS Beluga Skysails Leaves Port on her Maiden Commercial Voyage**, Triple pundit journal, 2008.

TUUKKANEN, Kai; VILJAVA, Tapio. **Low Friction Hull Coatings for Ships**. Marine Fouling Seminar, 1984.

VAZ, Caroline Rodrigues; FAGUNDES, Alexandre Borges; MACIEL, Nicélia Aparecida. **As Mudanças Climáticas e a Questão Energética**, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

WASSILY, Leontief. **A Economia do insumo-produto**. São Paulo, Ed. Nova Cultural, 1986.

XU, Li Hua et al. **Discuss on Green Shipbuilding Technology: Design and Material**, Hu Yunchang Recyclibg Technology and Research Center of Vessel and Marine Structure, Tianjin, China, 2012.

ZEBRAL, Daniel Eduardo da Silva et al. **O uso das energias renováveis nas plataformas de petróleo**, Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense, 2012.