

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

FELIPE DIAS CARDOSO

**INFLUÊNCIA DOS DISPOSITIVOS EQUALIZADORES DE ESTEIRA NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS EMBARCAÇÕES**

**RIO DE JANEIRO
2016**

FELIPE DIAS CARDOSO

**INFLUÊNCIA DOS DISPOSITIVOS EQUALIZADORES DE ESTEIRA NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS EMBARCAÇÕES**

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: Prof. Hermann Regazzi Gerke

**RIO DE JANEIRO
2016**

FELIPE DIAS CARDOSO

**INFLUÊNCIA DOS DISPOSITIVOS EQUALIZADORES DE ESTEIRA NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS EMBARCAÇÕES**

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: Mestre Hermann Regazzi Gerck

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Aos meus pais, familiares e amigos

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meu pais, Célia e Edmar, que sempre acreditaram em mim e quiseram sempre o meu melhor. Obrigado por todo o carinho de sempre. Amo vocês.

Ao meu tio e padrinho, CLC Miranda, grande incentivador e entusiasta da profissão que escolhi seguir. Espelhar-me em ti será a garantia de meu sucesso.

Às minha tias e madrinha, Cristina e Beth, respectivamente, que me fizeram crescer uma pessoa feliz e sempre me apoiaram em minhas decisões.

Aos meus primos, Marcelo, André e Fernando, presentes nos momentos de vitória ou de dor. Comemoraremos mais uma vitória.

Aos meus amigos que levarei para sempre, desde os tempos de CAp. UFRJ, Iury, Diogo, Arthur, quanto os de EFOMM, Paulo, Lisboa, Perrotta e Frossard. Contem comigo para o que precisarem.

Ao meu orientador, Professor Hermann, que desde os primeiros encontros, ainda como seu aluno, me motivou neste trabalho. Admiro demais a sua competência e o seu profissionalismo.

O mar é um símbolo da liberdade, e o povo
que não defende os seus mares não é digno
de viver.

(GETÚLIO VARGAS)

RESUMO

Motivados pela redução de custos aliados ao contexto de ecossistema sustentável, com menores emissões de poluentes na atmosfera, nos quais o ser humano está inserido atualmente, a fabricação de novos navios vem buscando atender a esses parâmetros. A partir da instalação de dispositivos que aumentem a eficiência energética da embarcação; seja por meio do incremento na propulsão; seja pela economia de energia; ou mesmo pelo aumento do seu poder de manobra, esse objetivo consegue ser alcançado. O foco da presente pesquisa é apresentar esses dispositivos, suas vantagens e desvantagens, bem como os problemas aos quais eles são desenvolvidos para solucionar.

Palavras-chave: Eficiência energética. Otimização. *Energy Saving Devices*.

ABSTRACT

Motivated by the reduction of cost allied the context of a sustainable environment with smaller emissions of pollutants in the atmosphere in which human being is inserted nowadays, the manufacturing of new ships comes seeking to attend these parameters. To give birth installing devices to increase energy efficiency of the vessel, by the increase in propulsion, by the energy saving or even by increasing hers maneuvering power this goal can be achieved. The focus of this research is to present these devices, its advantages and disadvantages as well as the problems to which they are developed to solve.

Keywords: Energy efficiency. Optimization. Energy Saving Devices.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição de velocidades na camada limite	15
Figura 2 - Formação de vórtices e esteira	16
Figura 3 - Fatores de esteira para diferentes pás	17
Figura 4 - Zonas de <i>Energy Saving Devices</i> (ESD)	20
Figura 5 - Pés-de-galinha sustentando os propulsores	21
Figura 6 - O <i>skeg</i>	21
Figura 7 - Defletores transversais à linha de fluxo	22
Figura 8 - SHI Safer Fin	23
Figura 9 - Namura Control Fin	24
Figura 10 - Low Viscuous Fin	24
Figura 11 - Aletas Grotheus	24
Figura 12 - Estabilizadores laterais do navio Queen Mary 2	25
Figura 13 - Estator de pré-giro da Daewoo	26
Figura 14 - BMW Mewis <i>Duct</i>	27
Figura 15 - Semi <i>Duct</i>	28
Figura 16 - <i>Wake Equalizing Duct</i>	28
Figura 17 - Duto Mitsui	29
Figura 18 - <i>Rake</i> da pá do hélice	30
Figura 19 - <i>Cup</i> da pá do hélice	30
Figura 20 - <i>Skew</i> da pá do hélice	31
Figura 21 - Kappel <i>Propeller</i>	31
Figura 22 - <i>End plates</i>	32
Figura 23 - <i>Thrust</i> resultante do VSP	33
Figura 24 - VSP com proteção e estabilizador de popa	34
Figura 25 - O passo do hélice	34
Figura 26 - Curvatura das pás do hélice	35
Figura 27 - Hélice de passo controlável	36
Figura 28 - Schottel <i>Twin Propeller</i>	36
Figura 29 - Hélices contra rotativas	37
Figura 30 - Sistema contra rotativo com azimuthal	38
Figura 31 - Conjunto Azipod	39
Figura 32 - Azimutais do navio Timofey Guzhenko	39

Figura 33 - Tubo Kort fixo	40
Figura 34 - Tubo Kort móvel	41
Figura 35 - <i>Swing-up thruster</i> (rebatível)	41
Figura 36 - <i>Stern thruster</i>	42
Figura 37 - <i>Bow thrusters</i>	43
Figura 38 - Aleta de impulso no cadaste	44
Figura 39 - Hélice sem e com PBCF	45
Figura 40 - <i>Propeller Boss Cap Fins</i> instalado	45
Figura 41 – Promas	46
Figura 42 - Volante <i>Grim Vane</i>	47
Figura 43 - Leme assimétrico	47
Figura 44 - Voith Turbo Fin	48
Figura 45 - Processo de energização da camada limite	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMW	Becker Mewis Duct
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLT	Contracted and Loaded Tip Propeller
CO ₂	Gás Carbônico
DP	Posicionamento Dinâmico
ESD	Energy Saving Devices
HSVA	The Hamburg Ship Model Basin
IMO	International Maritime Organization
ITTC	International Towing Tank Conference
PBCF	Propeller Boss Cap Fins
Promas	Propulsion and Manoeuvring System
SHI	Samsung Heavy Industries
STP	Schottel Twin Propellers
V _a	Velocidade de Avanço
V _s	Velocidade do Navio
VSP	Voith Schneider Propeller
W	Fator de Esteira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	CONCEITUAÇÃO	15
2.1	Definição de Esteira	15
2.2	Fator de Esteira	16
3	SOLUÇÕES	19
3.1	Dispositivos antes de um propulsor em um navio	20
3.1.1	<i>Skeg</i>	20
3.1.2	Defletores	22
3.1.2.1	<i>transversais à linha de fluxo</i>	22
3.1.2.2	<i>paralelos à linha de fluxo</i>	23
3.1.3	Estatores	25
3.1.4	Dutos	26
3.2	Dispositivos na região do propulsor em um navio	29
3.2.1	Propulsores Especiais	32
3.2.1.1	<i>cicloidal</i>	33
3.2.1.2	<i>hélice de passo controlável</i>	34
3.2.1.3	<i>hélices gêmeas (twin propellers)</i>	36
3.2.1.4	<i>hélices contra-rotativas</i>	37
3.2.1.5	<i>azimutal</i>	38
3.2.1.6	<i>propulsor em duto</i>	40
3.2.1.7	<i>tunnel thrusters</i>	42
3.3	Dispositivos depois do propulsor em um navio	43
3.3.1	Aleta de Impulso no Cadaste	44
3.3.2	PBCF (<i>Propeller Boss Cap Fins</i>)	44
3.3.3	Bulbo de Leme (<i>Surf Bulb</i>)	45
3.3.4	Volante <i>Grim Vane</i>	46
3.3.5	Leme Assimétrico	47
3.3.6	Cilindro Rotativo	48
3.4	Resumo	49
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO	53

1 INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial é possível entender o processo de redução de custos, quando se pensa que a substituição da mão de obra humana pela máquina a vapor tinha esse propósito. Desta maneira, segue-se até os dias de hoje, nos quais vê-se as indústrias cada vez mais mecanizadas e com um elevado nível de automação. O modelo econômico experimentado atualmente implica nessa minimização de gastos e maximização dos lucros.

No setor naval o processo não foi diferente. Ao analisar-se o nível de automação, quando se compara a quantidade de tripulantes a bordo: no início do século XX, uma embarcação operava com pelo menos 30 tripulantes e hoje, é possível ver alguns barcos *offshore* operando com 13 tripulantes. É possível também, analisar, de uma maneira mais técnica a redução de gastos por parte das empresas de navegação com combustível marítimo, manutenções e reparos.

Entra-se então, na questão energética, fundamental na vida de qualquer organismo. Inseridos num contexto de ecossistema sustentável, procura-se por energias limpas e renováveis, após séculos de descaso com a natureza e a exploração inconsequente dos recursos naturais, como os combustíveis fósseis. De fato, energia limpa ainda custa caro, entretanto convenções, tratados e regulamentações internacionais passaram a estabelecer reduções nas emissões de dióxido de carbono, óxido de enxofre e de nitrogênio e outros gases que influenciam no efeito estufa.

As grandes empresas do setor marítimo, por sua vez, para cumprir essa filosofia, vêm investindo cada vez mais no desenvolvimento de tecnologias a serem implementadas em seus navios, capazes de reduzir seu gasto energético e conseqüentemente maximizar seus lucros.

Com o crescimento do porte dos navios visando atender às novas demandas comerciais, surgiu a necessidade de se estudar o propulsor e de quais modos seriam obtidas maiores eficiências. Contudo, não se analisava a interação entre o casco e o propulso, o que recentemente, passou-se a dar maior atenção.

Somente a partir do estudo mais detalhado, com base em conceitos da mecânica dos fluidos, mais especificamente a fluidodinâmica, foi possível aplicar

a teoria ao universo submarino, com a criação de dispositivos que utilizam as diferenças de pressão e de velocidade a favor da embarcação, aumentando sua eficiência energética.

Neste trabalho serão apresentados os dispositivos mais importantes, alguns até inovadores, que buscam tornar mais eficaz o escoamento do fluido pelo casco do navio, especialmente na região da esteira, melhoram a descarga proveniente do propulsor e aumentam a governabilidade da embarcação, a partir de seu leme. Para isso, eles serão divididos em três regiões, nas quais serão denominadas: antes do propulsor, no propulsor e depois do propulsor. Também serão mostradas as barreiras que delimitam o avanço das tecnologias. Pode-se afirmar que ainda não se chegou a soluções definitivas, cabendo, portanto, novas pesquisas que acarretarão inovações.

2 CONCEITUAÇÃO

2.1 Definição de Esteira

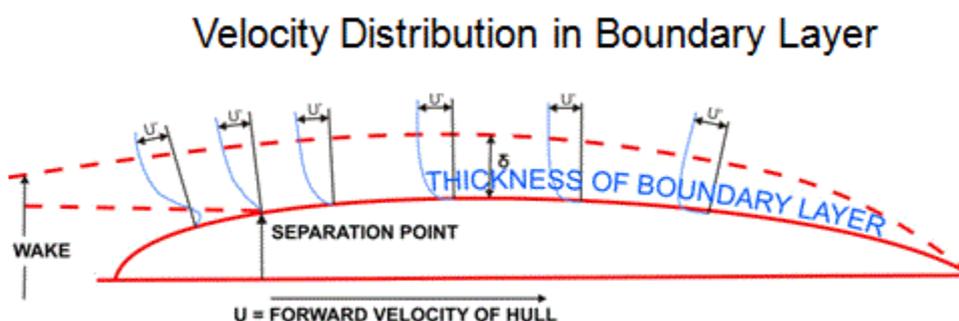
No deslocamento de um navio para vante, a rotação do propulsor atua de maneira a criar uma força, em sentido contrário ao deslocamento do corpo, conhecida como arrasto. Pelas Leis de Newtons, a massa d'água que foi acelerada origina uma força proporcional, porém oposta ao arrasto, denominada *thrust*, responsável pelo movimento de impulso da embarcação.

Somando-se esse conceito aos estudos do físico Ludwig Prandtl, referentes à dinâmica dos fluidos, mais especificamente à camada limite, é possível entender a formação de esteira. Ludwig definiu: “Camada limite de um escoamento é a região do escoamento em que a velocidade do fluido é perturbada por esforços cisalhantes devido a presença de uma superfície sólida”.

Deslocando-se ao longo do casco, nota-se um aumento da camada limite e, dentro desta, um gradiente de velocidades, isto é, uma variação da magnitude da velocidade ao se afastar do casco. Esta variação gera tensões cisalhantes. No momento em que há uma mudança brusca na seção do objeto ou quando este termina, a camada limite se desprende, originando vórtices que dissipam sua energia cinética na esteira.

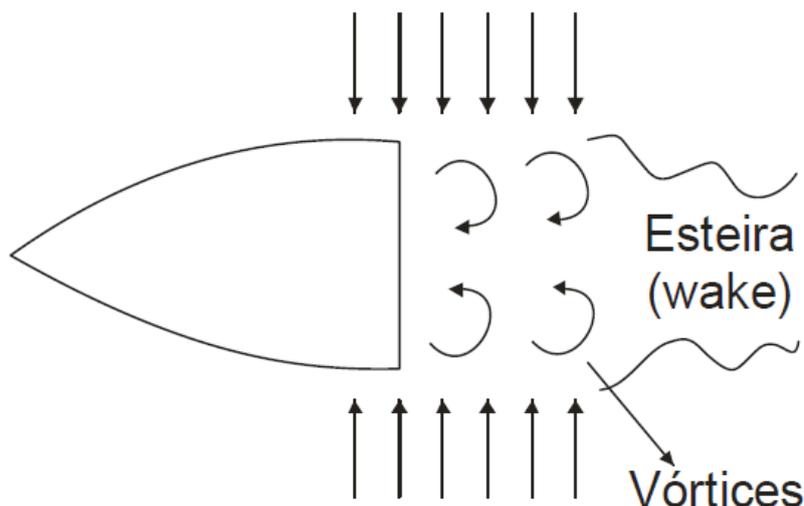
A figura 1 ilustra essa variação para um sólido em repouso. Já a figura 2 mostra as diferentes velocidades e a formação de vórtices e esteira.

Figura 1 - Distribuição de velocidades na camada limite



Fonte: GERK, 2014

Figura 2 - Formação de vórtices e esteira



Fonte: GERK, 2014

2.2 Fator de Esteira

Como consequência da formação da esteira, tem-se que a velocidade de avanço (V_a) do propulsor é menor que a velocidade do navio (V_s), ambas em relação à água. A velocidade da esteira, por sua vez, é definida como a diferença entre a velocidade do navio e a de avanço. Froude propôs a Fração de Esteira, relacionando a velocidade de esteira ($V_s - V_a$) com a velocidade de avanço (V_a), conforme a expressão abaixo:

$$W_f = (V - V_a) / V_a, \quad V_a = V_s / (A + W_f)$$

Tempos depois, Taylor aprimorou o conceito e definiu então o Fator de Esteira, como:

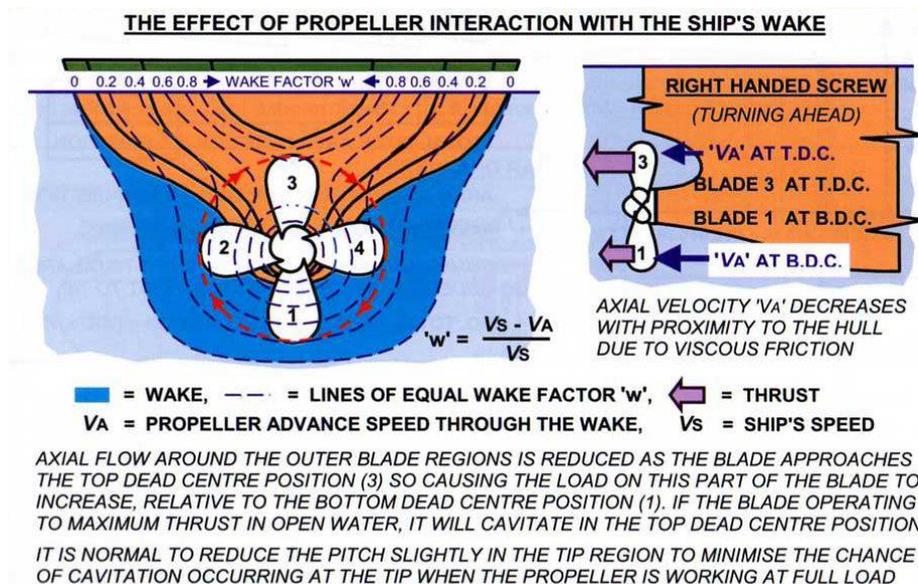
$$W = (V_s - V_a) / V_s, \quad V_a = V(1 - W)$$

O estudo foi então aplicado e verificou-se que em um propulsor, suas pás estavam submetidas à diferentes fatores de esteira, em virtude de diferentes regiões atravessadas por cada pá. Percebeu-se com isso que a pá superior – também chamada de pá das 12 horas (em analogia a um relógio) – fica

excessivamente carregada, em função do escoamento da água pela carena do navio. Nas posições intermediárias das 3 e 9 horas, o carregamento mecânico é mediano, enquanto que a inferior – 6 horas - sofre menores interações, condição na qual inferiu-se que o Fator de Esteira tem relação direta com a eficiência de um propulsor, pois em função do giro do propulsor, cada pá sofre carregamentos mecânicos diferenciados, o que gera pulsos de pressão que, para uma faixa de rotação do propulsor, pode entrar em fase com a frequência natural do casco, ocasionando o fenômeno de ressonância estrutural, que pode trazer danos e avarias. Ocorre influência também no fenômeno da cavitação.

A imagem a seguir esclarece os diferentes fatores de esteira em cada pá do hélice e a possibilidade da ocorrência de cavitação, prejudicial à boa eficiência do propulsor.

Figura 3 - Fatores de esteira para diferentes pás



Fonte: GERK, 2014

A corrente de descarga se dá em forma de espiral. Pelo princípio da independência dos movimentos de Newton, é permitido decompô-la em dois movimentos independentes: o de translação ou axial, que é a força ativa, e solicita a água para trás, ocasionando a força reativa da água sobre o propulsor, denominada *thrust*. Diante disso, conclui-se que, a energia destinada a gerar a componente rotacional é perdida, o que durante muito tempo foi desconsiderada. Pelas tecnologias mais recentes, vem se procurando recuperar parte dessa

energia, através de dispositivos antes do hélice, que induzem um pré giro, no hélice e após o hélice, que recuperam a energia rotacional para energia de translação.

3 SOLUÇÕES

Uma vez que os estudos foram evoluindo, essa decomposição das forças da corrente de descarga passou a ser considerada, procurando-se criar tecnologias para converter a componente direcional ou axial em rotacional, induzindo-a a um pré giro, visando a diminuição do trabalho do propulsor. Após a passagem por este, buscou-se reconverter a componente rotacional em axial, novamente.

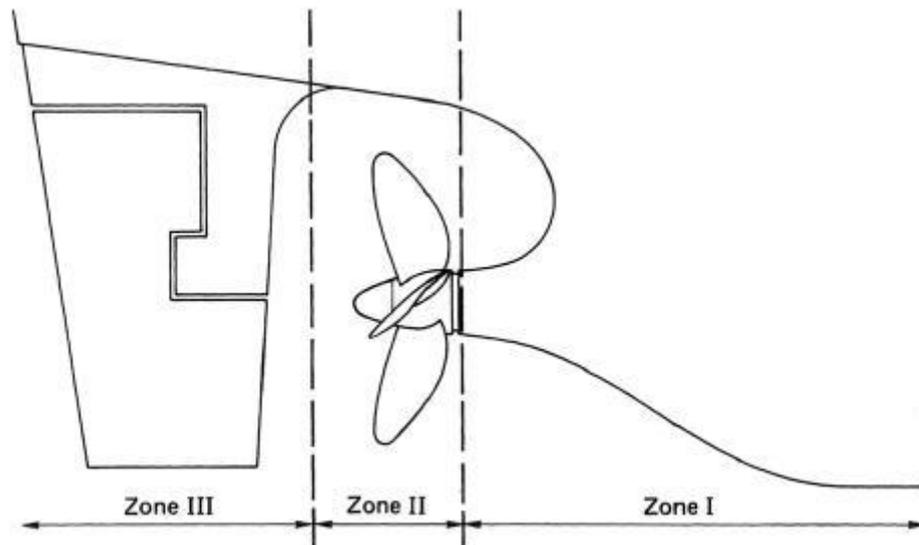
Entendendo-se a necessidade do reaproveitamento desta energia perdida, nesse caso, a componente rotacional, surgiram dispositivos que instalados no casco, no hélice ou no leme poderiam aumentar a eficiência energética e propulsiva da embarcação.

É importante mencionar que hoje, estão disponíveis no mercado diversas dessas tecnologias, bem como muitos diferentes tipos de embarcações, com suas próprias características e propósitos. Portanto, a aplicação de cada dispositivo, ou ainda a combinação de alguns deles irá variar conforme a necessidade de emprego da embarcação e também a critério do armador. Basta pensar, por exemplo, que um navio contêiner de 200 metros de comprimento tem mais espaço em seu casco para abrigar uma maior quantidade de dispositivos do que uma embarcação *offshore* de 80 metros.

Nesse sentido, serão apresentados alguns desses dispositivos, divididos em suas áreas de atuação, conforme anteriormente mencionado, e aplicados a cada um desses grupos de embarcações.

A figura abaixo mostra a divisão em três zonas - avante do propulsor, na região do propulsor e a ré do propulsor – onde serão estudados os dispositivos que podem ser instalados, no casco de um navio.

Figura 4 - Zonas de *Energy Saving Devices* (ESD)



Fonte: BERBERT, 2015

3.1 Dispositivos antes do propulsor em um navio

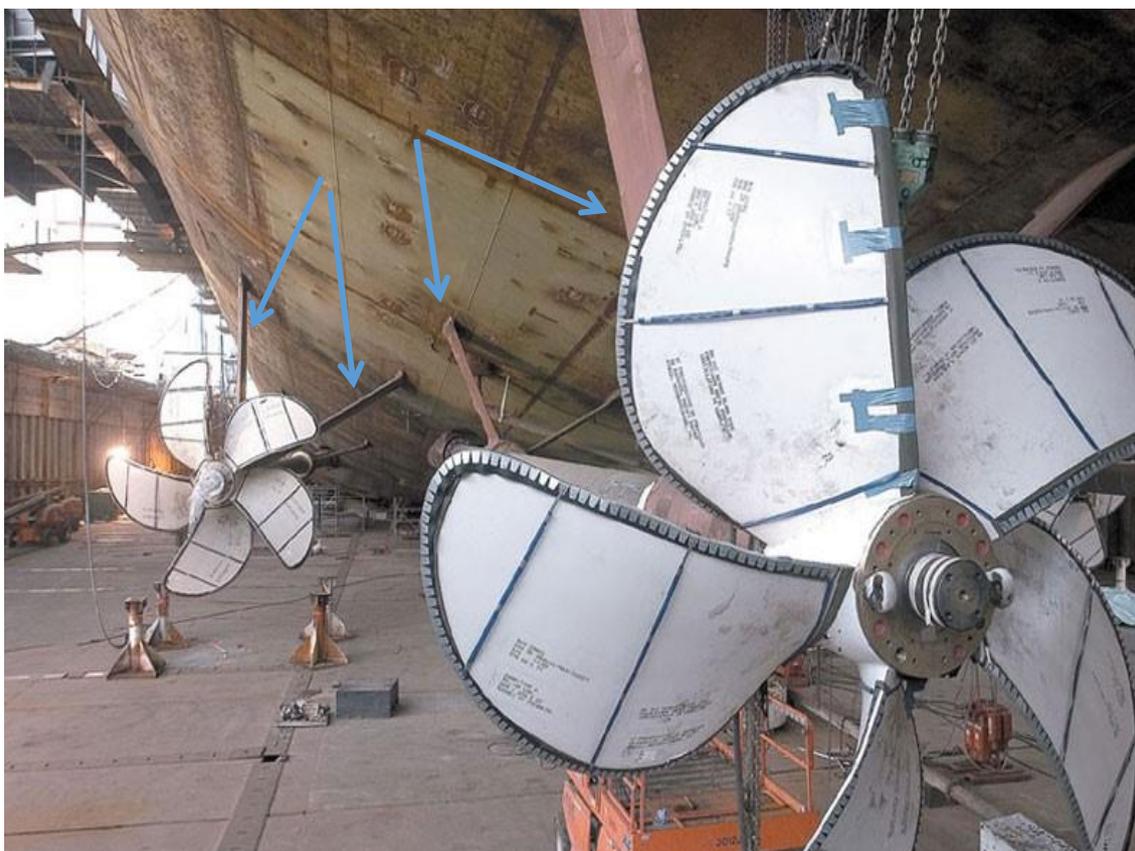
Aproveitando o grande espaço ofertado num casco de navio, as possibilidades de aplicações de tais dispositivos são maiores. Nesse sentido, a primeira zona a ser estudada é a avante do propulsor (zona 1), na imagem acima. Conforme dito anteriormente, o propósito dos dispositivos instalados nessa zona deve ser a indução de um pré giro do fluido, no caso, a água.

3.1.1 *Skeg*

O formato do casco é uma variável muito importante para o melhor escoamento do fluxo d'água. Desta maneira, tem-se na popa a devida importância deste fluxo ser direcionado para o propulsor. Este, por sua vez, tem em sua estrutura, um pesado eixo, que na parte interior do navio é suportado por mancais até sua chegada ao motor principal, e na parte exterior era suportado por apêndices, como pés-de-galinha e sapatas. Em substituições a esses apêndices que comprometem a eficiência, passou-se a adotar os *skegs*, estrutura em formato de "V", na qual o eixo propulsor passa em seu interior, direcionando o fluxo para o propulsor, aumentando sua resistência lateral de popa e provendo-o maior performance hidrodinâmica.

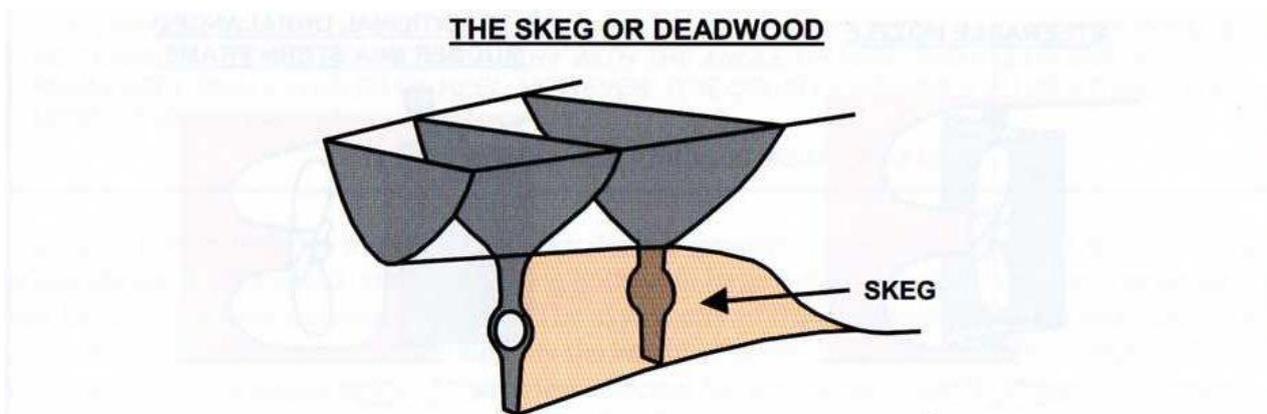
As figuras a seguir mostrar, primeiramente o sistema de pés-de-galinha e em seguida a substituição pelo *skeg*, evidenciando bastante o formato em “V” da estrutura.

Figura 5 - Pés-de-galinha sustentando os propulsores



Fonte: GERK, 2014

Figura 6 - O *skeg*



Fonte: GERK, 2014

3.1.2 Defletores

Seguindo-se a carena do navio em direção à popa, é possível que sejam instalados defletores no casco. Também conhecidos como aletas (*spoilers*), estes dispositivos têm como objetivo do fluxo de entrada do fluido no propulsor, com a redução dos pulsos de pressão e da vibração no navio como um todo. Basicamente, eles são divididos conforme sua instalação em relação ao fluxo d'água.

3.1.2.1 transversais à linha de fluxo

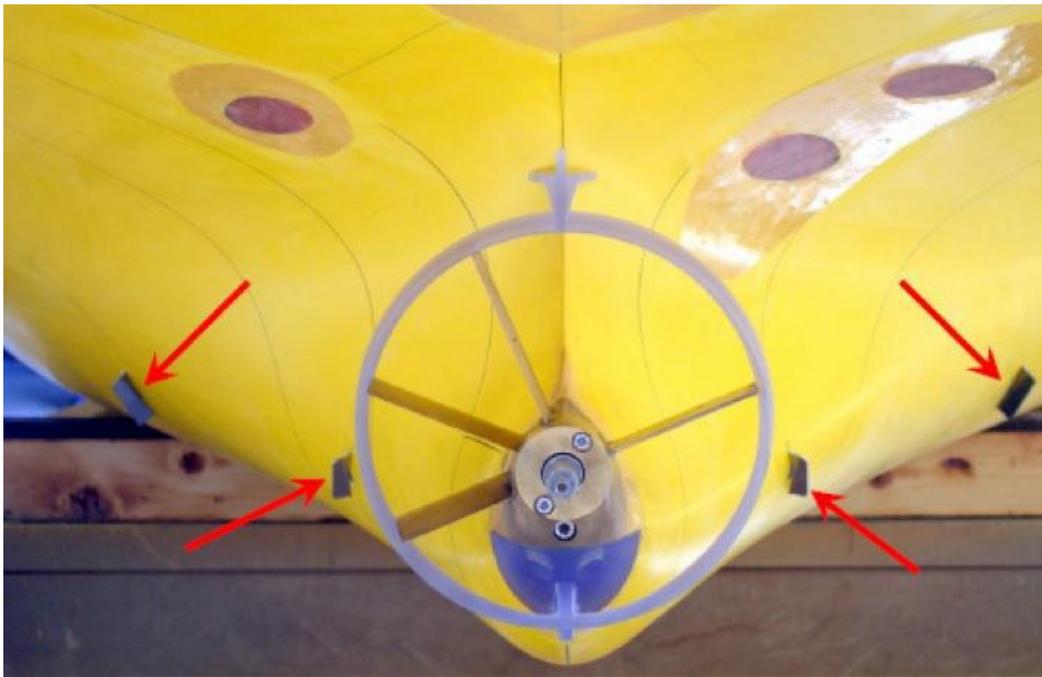
Alocados nesta posição, os defletores transversais têm a capacidade de gerar vórtices, modificando a esteira e reduzindo os pulsos de pressão e vibração em até 50%. Entretanto, a não uniformidade do casco, em função destes pequenos cortes, penaliza um aumento na resistência de cerca de 2%.

Figura 7 - Defletores transversais à linha de fluxo



Fonte: BERBERT, 2015

A *Samsung Heavy Industries* por exemplo, fabrica o *SHI Safer Fin*, e admite que é verificado um aumento de até 3,2% na eficiência propulsiva, mantendo-se os efeitos de redução pressão e vibração.

Figura 8 - SHI Safer Fin

Fonte: BERBERT, 2015

3.1.2.2 paralelos à linha de fluxo

Esses defletores alinhados com o fluxo d'água funcionam como hidrofólios, isto é, são otimizados para que a água passe em velocidade e gere sustentação, empurrando, de modo sutil, a embarcação para cima, consequentemente reduzindo suas obras vivas e diminuindo a resistência com a água. Seu maior objetivo é criar um fluxo uniforme e axial maior dentro do disco propulsor acelerando o fluxo lento, funcionando de modo análogo a uma asa de avião.

Esses dispositivos oferecem menos resistência se comparados com os defletores transversais (cerca de 1%), entretanto, mantem bons resultados na eficiência propulsiva, ao melhorar a esteira, por entregar um fluxo mais organizado no propulsor, evitando o descolamento da camada limite, diminuindo o coeficiente de esteira, e como consequência, evitando vibrações e cavitação.

Figura 9 - Namura Control Fin



Fonte: BERBERT, 2015

Figura 10 - Low Viscuous Fin



Fonte: BERBERT, 2015

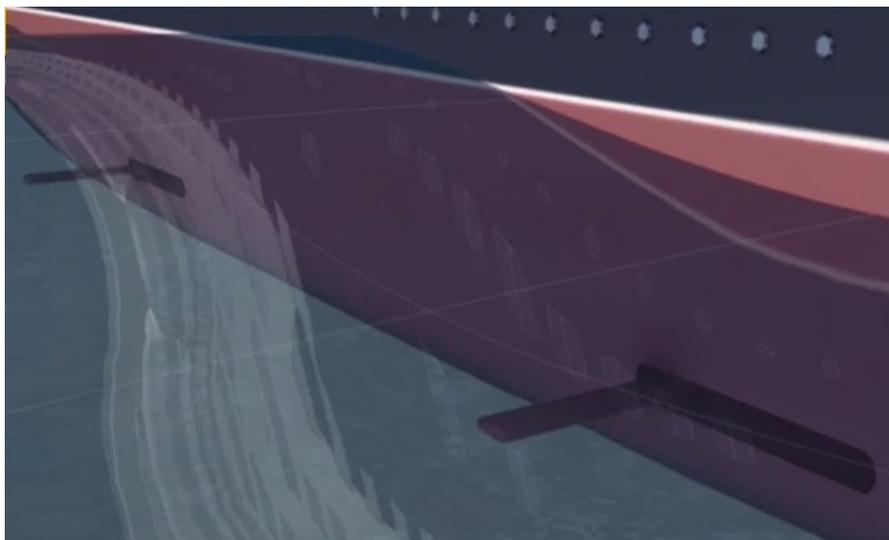
Figura 11 - Aletas Grotheus



Fonte: GERK, 2014

Há ainda, os estabilizadores laterais, que funcionam da mesma maneira, provendo não somente a diminuição da resistência com a água, mas também maior estabilidade do navio, com a ressalva de que não atuam na propulsão.

Figura 12 - Estabilizadores laterais do navio Queen Mary 2



Fonte: NAT GEO, Filme Gigantes da Engenharia, 2013

3.1.3 Estatores

Os estatores de pré giro (*pre-swirl stator*), com seu formato de aerofólio, induzem uma assimetria do fluxo ao propulsor, provocando uma esteira mais uniforme, e conseqüentemente, aumentando a eficiência do casco, mas podendo diminuir a eficiência propulsiva e a rotação e sem gerar *thrust*. O dispositivo consiste em um conjunto de lâminas fixadas na popa e de frente para o propulsor que redirecionam o fluxo antes de entrar no disco do propulsor. O seu projeto é complexo pois cada aerofólio tem uma angulação baseado no campo da esteira nominal, podendo ter um tamanho menor ou maior que o diâmetro do hélice e acompanhados opcionalmente de um túnel, sendo sua instalação bem-sucedida ou não conforme integração do dispositivo com o casco do navio.

O estaleiro de Daewoo desenvolveu um *pre-swirl* que pode oferecer um aumento da eficiência propulsiva entre 1 e 6,3%.

Figura 13 - Estator de pré-giro da Daewoo



Fonte: GERK, 2014

3.1.4 Dutos

O duto é constituído por dois dispositivos fixados na embarcação: um duto posicionado a vante do propulsor, juntamente com um sistema de lâminas internas. O duto corrige e acelera o fluxo de água para dentro do propulsor, bem como produz uma malha de empuxo avante. O sistema de lâminas produz um pré giro no fluxo de água, fato que reduz possíveis perdas na esteira do propulsor, resultando em um aumento na propulsão avante. Ambos dispositivos atuam sinergicamente.

Este tipo de dispositivo costuma ser empregado em navios com grandes coeficientes de bloco, tais como graneleiros, navios tanque e porta-contêineres e em velocidades inferiores a 20 nós. Seu projeto busca reduzir os problemas com vibração, uniformizando o fluxo e reduzindo os efeitos do pico da esteira.

Dentre os dutos existentes no mercado, serão citados o BMS Mewis Duct, Semi-duct System, o Wake Equalizing Duct e o Duto Mitsui. O primeiro reduz as perdas rotacionais, prometendo aumentar de 1,5 a 7,7%, combinado com o *pre-swirl*, não centralizado com o eixo do propulsor e também com diâmetro menor.

Propicia ainda, economia de combustível e menores índices de emissão de poluentes atmosféricos. Este mesmo dispositivo, quando combinado ao estator de pré-giro, consegue até 7% nessa mesma redução. O último duto apresentado é posicionado avante do propulsor, de modo assimétrico, para capturar a aceleração dos fluidos nas áreas do disco do propulsor próximos ao casco, ao qual é integrado. As bordas do duto são alinhadas com a ponta das pás, protegendo-os das bolhas de cavitação.

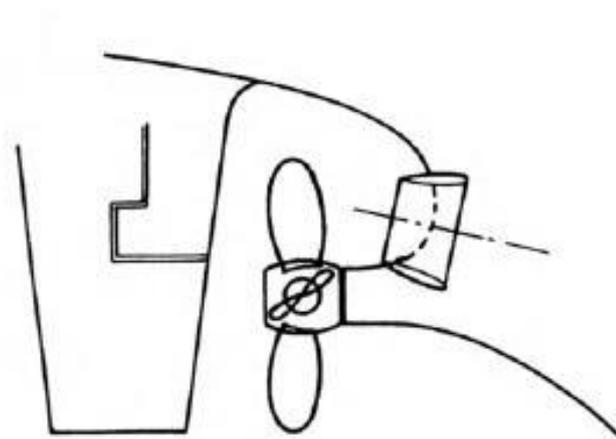
Figura 14 - BMW Mewis Duct



Fonte: BERBERT, 2015

Figura 15 - Semi Duct

Fonte: BERBERT, 2015

Figura 16 - Wake Equalizing Duct

Fonte: BERBERT, 2015

Figura 17 - Duto Mitsui



Fonte: GERK, 2014

3.2 Dispositivos na região do propulsor em um navio

A área da propulsão é considerada a mais importante afinal, ela é responsável pelo deslocamento do navio em si. O hélice, seu principal componente, é o conjunto formado pelo bossô e por pás espaçadas em ângulos iguais em torno do eixo propulsor da embarcação. Às pás, são atribuídas algumas características, com relação a sua inclinação, concavidade e ao seu aspecto definidos como: *rake*, *cup* e *skew*.

O *rake* é a inclinação que algumas pás possuem, medido em ângulos; de modo que, quanto maior o ângulo de *rake*, melhor o hélice trabalha próximo à superfície, evitando os efeitos de cavitação e ventilação.

Figura 18 - Rake da pá do hélice



Fonte: GERK, 2014

O *cup* é a concavidade vista no bordo de fuga da pá de um propulsor, que evita a fuga do fluxo de água de uma zona de maior pressão para uma de menor pressão, evitando cavitação e proporcionando melhoria na atuação do leme em altas velocidades.

Figura 19 - Cup da pá do hélice

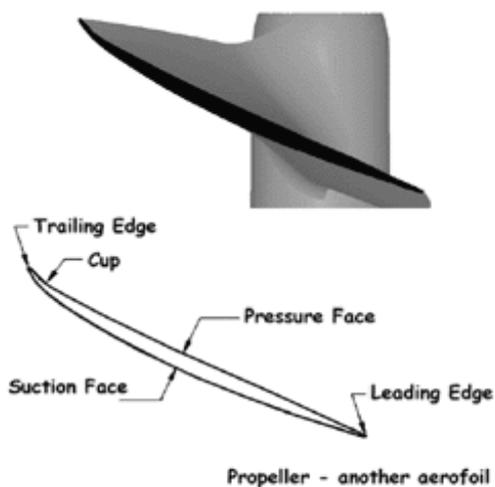


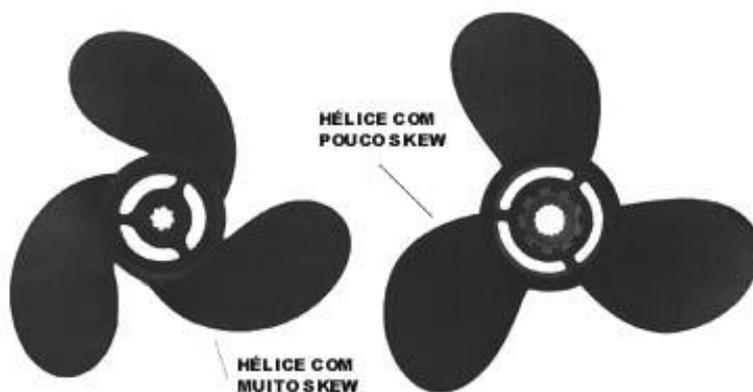
Figure 5. Propeller aerofoil: Thrust & momentum

Fonte: GERK, 2014

O *skew* é o que defini-se como assimetria de forma das pás. Maior *skew* ou maior inclinação radial significa maior redução na vibração da pá ao entrar na

água. A quantidade de pás também influencia na vibração do navio de modo que quanto maior o número de pás, menos eficiência, porém menos vibração.

Figura 20 - Skew da pá do hélice



Fonte: GERK, 2014

A exemplo disto temos alguns tipos de propulsores, como o *Kappel*, o CLT (com placas nas pontas – *end plates*), que evitam vórtices nas pontas das pás e melhoram a eficiência da propulsão, segundo suas propagandas, em até 6% e 12%, respectivamente.

Figura 21 - Kappel Propeller



Fonte: BERBERT, 2015

Figura 22 - End plates

Fonte: GERK, 2014

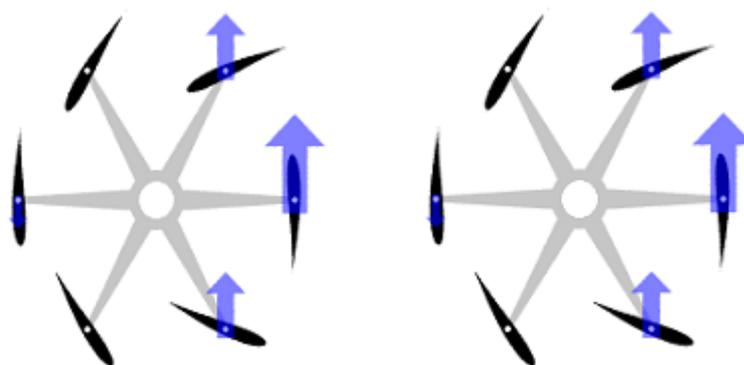
3.2.1 Propulsores Especiais

Diversas tecnologias são estudadas e aplicadas aos propulsores, tendo em vista seu melhor aperfeiçoamento, conseqüentemente provendo uma maior eficiência energética. Como anteriormente dito, alguns tipos de embarcações não possuem espaço para instalação de dispositivos nas três zonas analisadas nesta pesquisa, como por exemplo, as embarcações empregadas na atividade de apoio marítimo, ou seja, no *off-shore*. A solução encontrada, por muitas vezes, é condensar ou mesmo aglutinar essas zonas. Para isso, é possível ter propulsores dotados de dispositivos da zona um, como aletas e dutos, e da zona três, realizando a função também de leme, permitindo o governo e a manobrabilidade da embarcação.

3.2.1.1 *cicloidai*

O propulsor cicloidal é um exemplo destes que dispensam o uso de leme. Seu princípio de funcionamento baseia-se em lâminas verticais móveis fixadas em discos, paralelos ao fundo do rebocador. O *thrust* é gerado a partir do movimento circular das lâminas nas quais as forças laterais se anulam, enquanto as forças propulsivas se somam.

Figura 23 - *Thrust* resultante do VSP



Fonte: VOITH, 2007

O mais conhecido desse tipo de propulsor é o Voith Schneider Propeller, que reúne duas tecnologias necessárias para sua máxima eficiência: um estabilizador localizado a ré (para caso de embarcações menores), na altura do ponto de tração, com o objetivo de aumentar a estabilidade de governo e um atenuador dos efeitos laterais das ondas, obtido graças à rapidez de resposta do Voith Schneider Propeller, que cria forças que agem contra o movimento de ondulação. Como resultado, o balanço é eficientemente reduzido durante a navegação e também nas operações que exijam Posicionamento Dinâmico (DP).

Figura 24 - VSP com proteção e estabilizador de popa

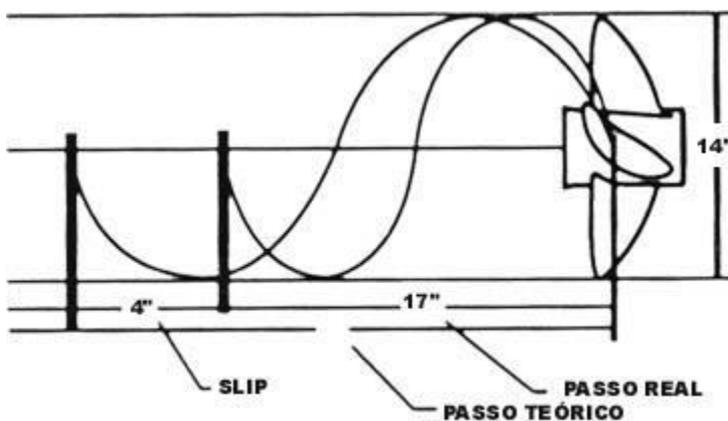


Fonte: VOITH, 2007

3.2.1.2 hélice de passo controlável

Passo é a distância teórica que o hélice percorre para vante quando completa uma volta, de maneira análoga a um parafuso entrando na madeira. Diz-se teórica porque todo hélice escorrega, fenômeno conhecido como *slip*, e não necessariamente relacionado à ineficiência.

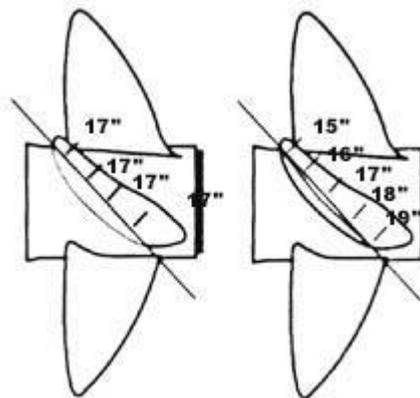
Figura 25 - O passo do hélice



Fonte: GERK, 2004

Os hélices podem ser divididos em dois tipos de passo: o fixo, no qual o ângulo das pás não pode ser controlado – dele, subdividem-se os hélices de passo constante, cujas pás fixadas no *hub* não apresentam curvatura e os de passo progressivo, cujas pás fixadas no *hub* apresentam curvatura progressiva, modificando com a rotação do propulsor as suas áreas de contato com a água – e o controlável, no qual o ângulo das pás pode ser controlado por mecanismos acionados por meios hidráulicos, que passam pelo interior do eixo oco, dispensando, por sua vez, o uso de caixas inversoras.

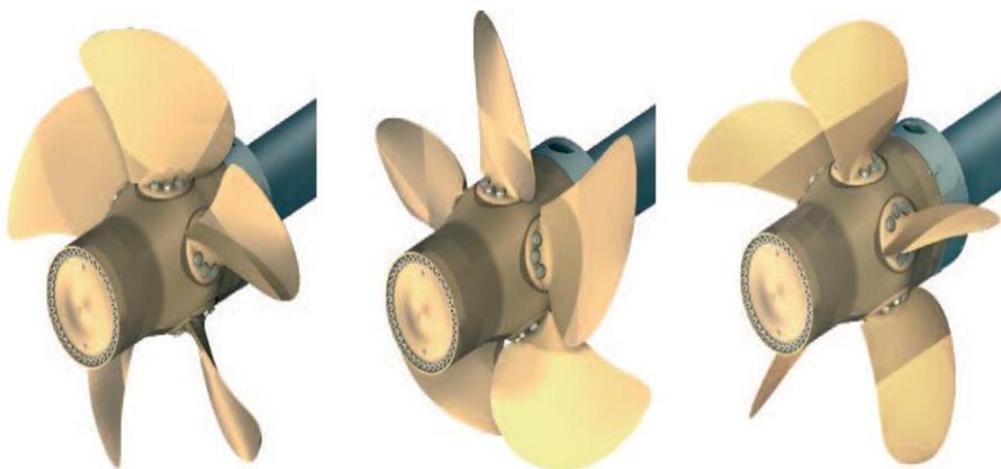
Figura 26 - Curvatura das pás do hélice



Fonte: GERK, 2004

O hélice de passo controlável foi projetado para dar a maior eficiência de propulsão para variadas velocidades e condições de carga. Quando o navio está completamente carregado, a propulsão requerida é muito maior do que se estivesse vazio. Com isso, o controle do passo das pás pode ser ajustado para obter a máxima eficiência, podendo haver economia de combustível.

Este sistema incorpora uma tecnologia de resposta rápida com níveis de ruído e vibrações perto do limite de zero. Apesar de serem extremamente robustos, são preparados para operarem em condições de mar adversas, com baixo custo de manutenção.

Figura 27 - Hélice de passo controlável

Fonte: GERK, 2004

3.2.1.3 hélices gêmeas (twin propellers)

A propulsão com base em hélices gêmeas funciona com duas hélices girando no mesmo sentido de rotação. O mais conhecido no mercado é o *Schottel Twin Propellers* que converte a potência do motor em impulso e ainda possibilita a utilização da força total de propulsão para a manobra da embarcação, por meio de uma rotação de 360° da parte subaquática. Além disso, há ainda aletas integradas proporcionando um aumento significativo da eficiência, se comparados a unidades de apenas um hélice, por distribuir a potência em dois hélices.

Figura 28 - Schottel Twin Propeller

Fonte: GERK, 2004

De acordo com fontes da própria fabricante, a redução no consumo de combustível, o baixo custo de manutenção e a redução de ruídos e vibrações garante 20% a mais de eficiência propulsiva se comparado aos propulsores comuns.

3.2.1.4 hélices contra-rotativas

Consiste em dois eixos propulsores, um dentro do outro, com direções rotacionais contrárias, para aproveitar a energia cinética perdida no movimento circular do escoamento. Pela dificuldade em se montar mecanicamente dois eixos com sentidos de rotação opostos, um por dentro do outro, é comum os ganhos mecânicos serem minimizados pelas perdas que ocorrem nas caixas de engrenagem. A solução inteligente foi tornar os eixos concêntricos, geometricamente, podendo assim, a eficiência propulsiva ser aumentada em até 10%. Não se deve confundir o sistema de propulsão de hélices contra-rotativas com o de hélices gêmeas, tendo em vista que na primeira as pás giram em sentidos contrários e na segunda, no mesmo sentido.

Figura 29 - Hélices contra rotativas



Fonte: BERBERT, 2015

O sistema contra rotativo também pode ser obtido combinando um propulsor azimutal, operando frente a um propulsor convencional, denominado sistema contra rotativo com eixos independentes ou também híbrido, podendo prover um aumento de eficiência de até 15% e garantindo maior poder de manobrabilidade por meio do azimutal.

Figura 30 - Sistema contra rotativo com azimutal



Fonte: BERBERT, 2015

3.2.1.5 azimutal

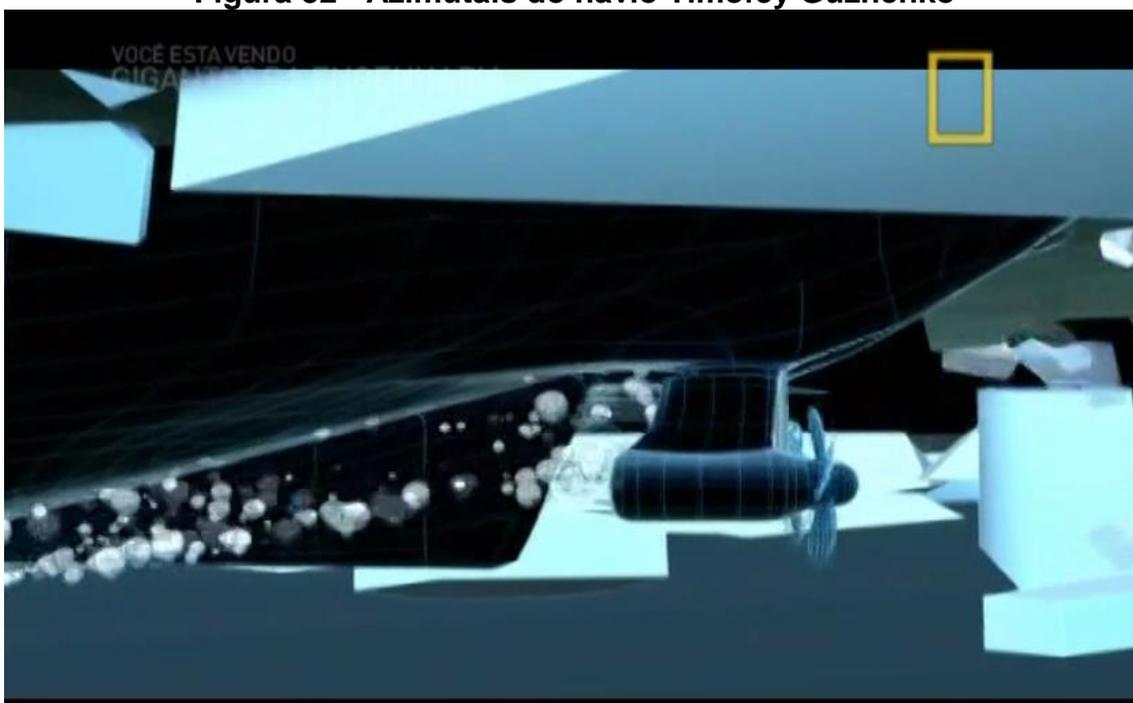
É uma unidade de propulsão elétrica que consiste em uma hélice que pode orientar sua propulsão girando ao redor de um eixo por 360°, melhorando a manobrabilidade e dispensando o uso do leme. Seu funcionamento é feito por meio de um motor elétrico (cuja energia elétrica é gerada a partir de turbinas à gás ou motores diesel) que aciona um hélice de passo fixo, contido em um *pod* submerso.

O propulsor do tipo azimutal mais conhecido é o *Azipod*, marca registrada do Grupo ABB. Suas principais características são a excelente manobrabilidade, a economia de espaço no interior do casco dos navios – o que permite maior liberdade no projeto do navio – e a redução no consumo de combustível, acarretando em baixas emissões de CO₂.

Figura 31 - Conjunto Azipod

Fonte: GERK, 2014

Além das qualidades da propulsão azimutal acima citadas, pode-se destacar também que ela se mostrou eficiente nas navegações de altas latitudes, mais especificamente na quebra do gelo. Analisando-se o navio petroleiro/quebra-gelo russo *Timofey Guzhenko*, sua popa otimizada para esta tarefa parte o gelo enquanto as pás dos azimutais tritura-o, conforme ilustra a figura abaixo.

Figura 32 - Azimutais do navio Timofey Guzhenko

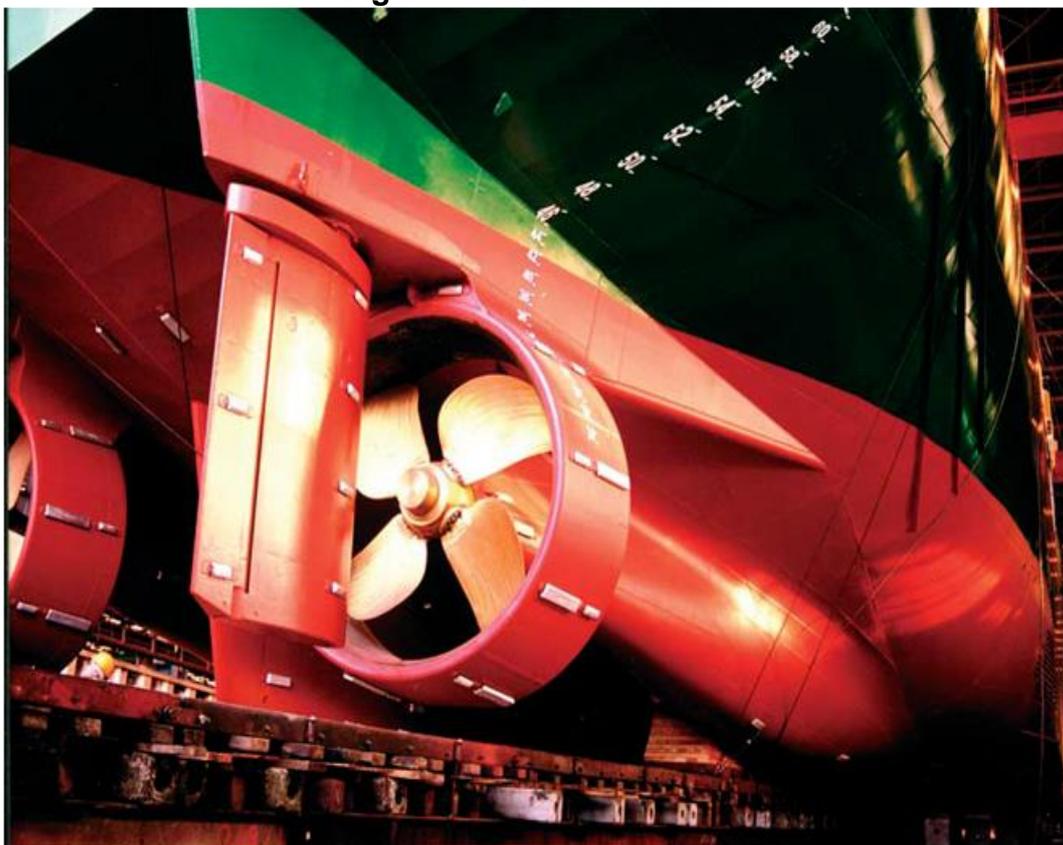
Fonte: NAT GEO, Filme Gigantes da Engenharia, 2013

3.2.1.6 propulsor em duto

Existem também propulsores aos quais dutos envolvem o hélice, organizando o fluxo de descarga, aumentando a aceleração da água e possibilitando um ganho na tração a vante de até 30%. Entretanto, com o navio navegando em altas velocidades, a resistência ao avanço contraria os benefícios do aumento de propulsão, o que o faz ser aplicado, em sua maioria, nos rebocadores e em barcos de apoio. Em testes, o ganho real pode chegar a até 5%.

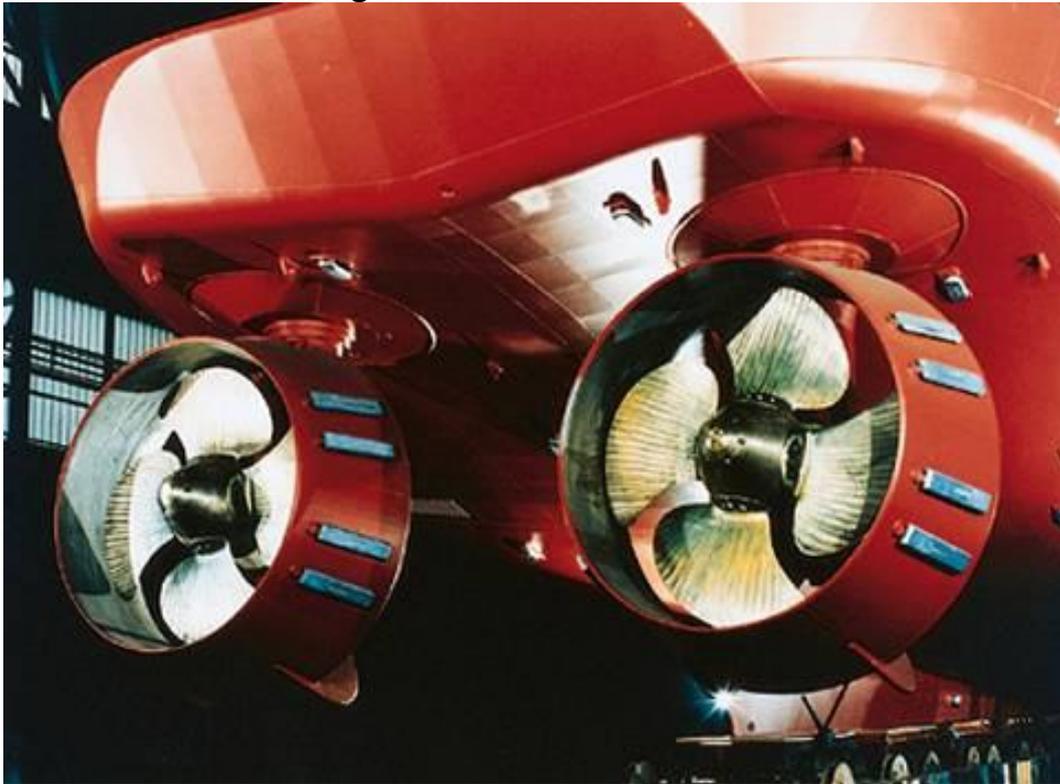
Como exemplo, tem-se o Tubo, da fabricante Kort, que pode ser fixo ou móvel, destacando-se a necessidade do uso de lemes para caso de opção pelo primeiro. Com o passar dos anos e o aperfeiçoamento dos projetos, atualmente, é possível obter redução no coeficiente de arrasto de até 17 vezes. Aplicado em rebocadores, por exemplo, a capacidade de tração – também chamada de *bollard pull* – aumenta em cerca de 40%, em relação a um hélice convencional, bem como proporcionando maior velocidade final.

Figura 33 - Tubo Kort fixo



Fonte: GERK, 2014

Figura 34 - Tubo Kort móvel



Fonte: GERK, 2014

Além disso, também são oferecidos no mercado propulsores rebatíveis, com as mesmas características acima citadas, adicionando o fato de que eles podem ser recolhidos e utilizados como *tunnel thrusters*.

Figura 35 - *Swing-up thruster* (rebatível)



Fonte: GERK, 2014

3.2.1.7 tunnel thrusters

Os *tunnel thrusters*, também denominados impelidores laterais são instalados transversalmente, tanto na proa quanto na popa, dependendo do projeto. Sua aplicação, inicialmente, era em *ferrie boats* e rebocadores, entretanto, atualmente, faz-se quase um item obrigatório nas embarcações envolvidas no apoio marítimo (*offshore*). Já para as embarcações maiores, é uma ótima ferramenta para manobrar um navio, sobretudo em casos de atracação e desatracação. É importante ressaltar que sua melhor atuação se dá para velocidades de até 3 nós; após isso o *thrust* transversal diminui de 30% a 40%, segundo estudos da Voith, por meio de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Figura 36 - Stern thruster



Fonte: GERK, 2014

Figura 37 - Bow thrusters

Fonte: GERK, 2014

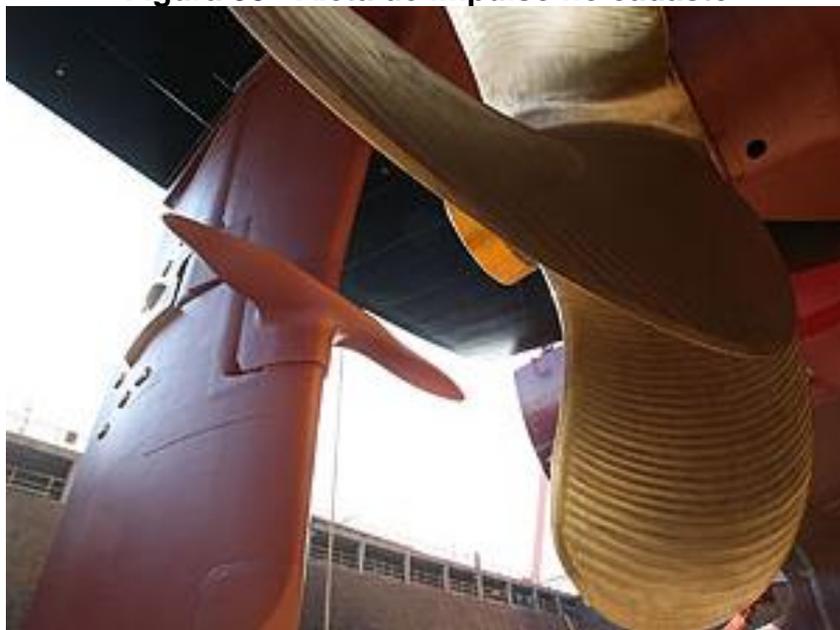
3.3 Dispositivos depois do propulsor em um navio

A última zona a ser analisada nesta pesquisa é a área a ré do propulsor, local para o qual flui diretamente a descarga provinda dele. Naturalmente, é de comum senso lembrar dos lemes como únicos dispositivos após o propulsor, entretanto, o foco será naqueles que de fato equalizam a esteira do navio, reduzindo suas perdas e portanto, aumentando seu rendimento e eficiência. Resumidamente, consiste em converter a componente rotacional do fluxo criado pelo propulsor, para um fluxo axial útil a propulsão. É de suma importância ressaltar que nenhum leme incrementa a propulsão, contudo seu aperfeiçoamento busca melhorar a eficiência da guinada.

3.3.1 Aleta de Impulso no Cadaste

Afim de prover um escoamento uniforme e laminar, como Reynolds definiu em seus estudos, a aleta de impulso no cadaste é um difusor do fluxo de água, desenhado em perfil de asa, considerando a teoria da geração de sustentação. Basicamente o sistema é composto por duas aletas dispostas horizontalmente na direção do través do navio, presas no cadaste em linha ou ligeiramente acima do eixo do hélice. De acordo com testes da HSVA, pode haver um ganho de até 5% de eficiência.

Figura 38 - Aleta de impulso no cadaste

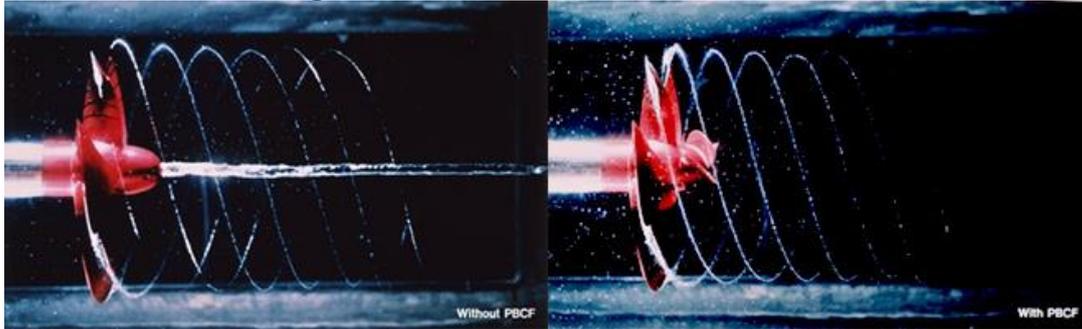


Fonte: GERK, 2014

3.3.2 PBCF (*Propeller Boss Cap Fins*)

Este dispositivo é instalado no boss do hélice, buscando cessar o vórtice gerado atrás do propulsor, reduzindo entre 3% e 5% do consumo de combustível, de acordo com dados da fabricante. Seus principais atrativos são também a redução do torque do propulsor, instalação rápida e prática, baixo custo de manutenção, bem como redução de vibrações, ruídos e cavitação.

Figura 39 - Hélice sem e com PBCF



Fonte: PROPELLER BOSS CAP FINS, 2016

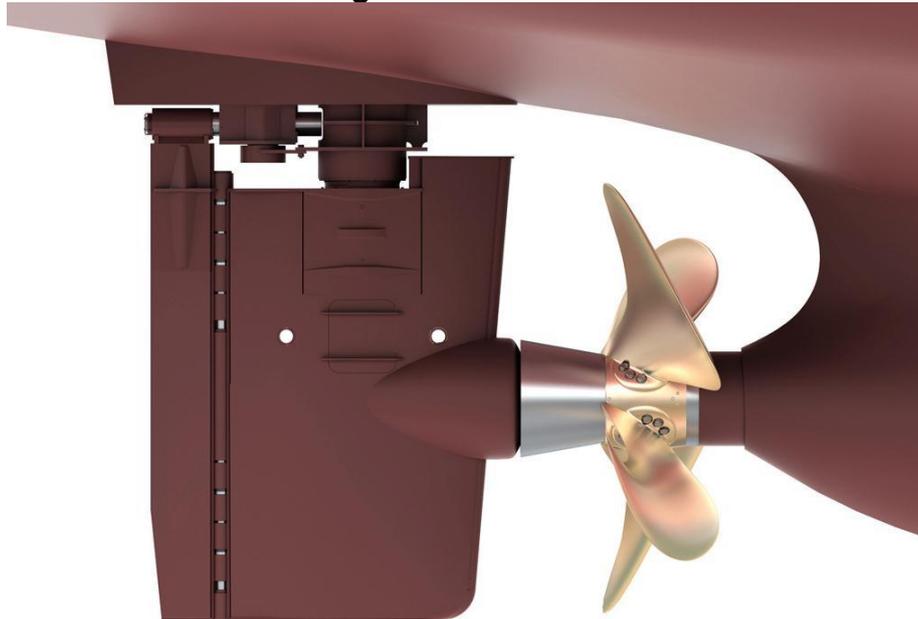
Figura 40 - Propeller Boss Cap Fins instalado



Fonte: PROPELLER BOSS CAP FINS, 2016

3.3.3 Bulbo de Leme (*Surf Bulb*)

Com a instalação deste dispositivo no leme do navio, é garantido não só uma melhoria na eficiência propulsiva como também na manobrabilidade ao conduzir o fluxo do leme, de maneira a diminuir o vórtice na região, convertendo-o em força propulsiva. A fabricante *Rolls-Royce*, por exemplo, oferece o seu sistema integrado de propulsão e manobras (Promas) prometendo um ganho da eficiência propulsiva de 3% a 8%, bem como redução do consumo de combustível, conseqüentemente de impactos ambientais, retorno rápido do investimento e fácil instalação.

Figura 41 - Promas

Fonte: ROLLS ROYCE, 2016

3.3.4 Volante *Grim Vane*

Desenvolvido no início dos anos 1970, com a necessidade da redução de gastos de combustível por conta da crise do petróleo, o volante *Grim Vane* combina os efeitos de turbina com os de propulsor, e tem como objetivo extrair energia fluxo rotacional da descarga do propulsor para girar o volante, e com isso convertendo-a em *thrust* adicional. Nos primeiros experimentos, o dispositivo demonstrava prover entre 5% e 10% de melhora na eficiência, excedendo, inclusive a economia dos demais dispositivos concorrentes no mercado. Tamaña sua relevância, esse volante chegou a ser instalado no grande e famoso transatlântico *Queen Elizabeth 2*.

Figura 42 - Volante Grim Vane

Fonte: GERK, 2014

3.3.5 Leme Assimétrico

Como dito anteriormente, nenhuma modificação no leme gera *thrust* adicional. Entretanto, alguns lemes são otimizados para poder operar com eficiência na esteira do propulsor, com modificações nas partes situadas acima e abaixo do eixo propulsor, aproveitando o fluxo rotacional após o propulsor. Possui como característica uma curvatura no bordo de ataque, que pode estar combinado com o *Surf Bulb* e garantir entre 2% a 4% de melhoria no escoamento do fluxo.

Figura 43 - Leme assimétrico

Fonte: GERK, 2014

3.3.6 Cilindro Rotativo

A instalação de um cilindro rotativo ao fim do leme ou de um *skeg*, pode proporcionar um aumento da força de sustentação de até 20%, por um processo de energização da camada limite – adiando seu descolamento, no bordo de maior velocidade. Este dado é baseado no produto *Voith Turbo Fin*, que atinge seus melhores resultados quando o cilindro rotacional 4 vezes a velocidade do navio.

Figura 44 - Voith Turbo Fin



Fonte: VOITH, 2007

Figura 45 - Processo de energização da camada limite



Fonte: VOITH, 2007

3.4 Resumo

Os experimentos físicos e numéricos realizados para análise do comportamento da embarcação e aferição dos ganhos com cada tipo de modificação são todos regulamentados por normas e procedimentos estabelecidos pela *International Towing Tank Conference* (ITTC), associação reconhecida como Organização Não-Governamental (ONG) com *status* de observadora para a *International Maritime Organization* (IMO), onde a ITTC participa ativamente em prol da segurança e performance. Com base no que foi apresentado, os valores dos ganhos de eficiência para cada dispositivo podem ser apresentados na tabela apresentada em anexo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa apresentou, num primeiro momento, os problemas que implicam nas perdas que uma embarcação sofre ao se deslocar pela água. Diante disso, a inserção no contexto atual de economia de gastos e redução de emissões de poluentes – de certa forma, por maiores exigências da legislação – está fazendo os armadores buscarem soluções visando aumentar a eficiência energética dos navios.

Após décadas de estudo, constatou-se que a esteira mensurava de quanto era essa perda, mais especificamente o coeficiente de esteira. Anulá-la não seria possível, entretanto conseguindo-se equalizá-la, essas perdas seriam amenizadas.

Para tal, todos os conceitos da hidrodinâmica foram estudados, sobretudo o de mecânica dos fluidos, envolvendo pressão e velocidade, afim obter a desejada melhoria no escoamento do fluido pelo casco do navio, passando pelo propulsor e sendo descarregado por este, criando-se assim os dispositivos conhecidos como hidrofólios.

Além dos hidrofólios, todos os demais dispositivos que contribuem para essa melhoria na eficiência da embarcação, isto é, reduzindo suas perdas e podendo também melhorar a propulsão, foram denominados *Energy Saving Devices*.

A ideia geral para melhorar a eficiência é induzir o escoamento do fluido pelo casco a um pré giro antes de alcançar o propulsor. Neste momento, a componente axial é transformada em rotacional, diminuindo o trabalho do propulsor e, após este, reconvertida em componente axial, sendo descarregada de maneira uniforme sobre o leme, podendo inclusive aumentar a governabilidade e manobrabilidade da embarcação.

É importante frisar que nenhuma melhoria no leme incrementará a propulsão do navio, até porque, sendo o leme um apêndice do casco, ele sempre contribui para o aumento da resistência ao avanço do navio. Ele somente aumentará os poderes de governo e manobra, como anteriormente citado.

A combinação, portanto, de alguns dispositivos podem significar melhores resultados. Isso significa que os dispositivos somados são sinérgicos, de

maneira que o resultado final é maior do que a soma dos resultados individuais, quando considerados individualmente.

Certamente, o que temos disponível no mercado hoje não são as soluções definitivas encontradas, tendo em vista que a tecnologia está sempre se modernizando e os estudos na área sendo mais aprofundados e detalhados. São, porém, as melhores em que se é possível ter com a tecnologia atual, podendo-se confirmar com isso que são necessárias novas pesquisas para o desenvolvimento e aperfeiçoamento desses dispositivos.

REFERÊNCIAS

BERBERT, Yuri Magnani. **Análise da Influência de *Energy Saving Devices* em casco *Twin-Skeg* otimizado de navio gaseiro**. 2015. 64p. (Graduação em Engenharia Naval) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CASTRO, Carlos José Rocha de Oliveira. **Simulação da interação casco-propulsor de uma embarcação usando mecânica dos fluidos computacional (CFD)**. 2006. 122p. (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CLARK, I. C., **Ship dynamics for mariners**. London: The Nautical Institute, 2005. 300p.

DURANTE, Guilherme Coppi e PANZA, Rodrigo Dias. **Escoamento ao redor de cilindro e a formação de “Vortex Shedding”**. 2013. p.2, 4-6. Disponível em < http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/EM974/PROJETOS/PROJETOS%201%20SEM-13/G1%20CYLINDER%20VORTEX%20SHEDDING/etapa%20IV_DURANTE_PANZA.pdf>, Acessado em 14 Mai. de 2016.

GERK, Hermann Regazzi. **Hidrodinâmica para navegantes**. 3 ed. Rio de Janeiro: CIAGA, 2014.

ITTC history. **ITTC**. 2014. p.1. Disponível em < <http://itc.info/downloads/General%20files/ITTC%20history%202.pdf>>, Acessado em 23 Jul. de 2016.

JUNIOR, Julio C. da S. **Entrevista datada de 10.05.2016**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NIECKELE, Angela. **Mecânica dos fluidos: Corpos Submersos**. 2015. p.3-18. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em < http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/Grad_Eng1707/7-MecanicaFluidosII-CorposSubmersos_2015.pdf>, Acessado em 14 Mai. de 2016.

PASSOS, Rafael de Barros. **Seleção de propulsores em situações genéticas da Engenharia Naval**. 2013. 101p. (Graduação em Engenharia Naval) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, Amauri Philipe Bonfadini de. **Formação de Esteira e Vibrações em Navios de Propulsão Moderna e os Efeitos na Navegação Moderna**. 2013. 40p. (Graduação em Ciências Náuticas) – CIAGA, Rio de Janeiro, 2013.

VARIS, Jukka. **Improvements in Azipod design**. 2013. 6p. Disponível em < https://library.e.abb.com/public/51235341c521f4dcc1257a8a003c8cd1/ABB%20Generations_26%20Improvements%20in%20Azipod%20design.pdf>, Acessado em 20 Jul. de 2016.

ANEXO

Tabela apresentando incrementos da eficiência para determinado dispositivo.

Dispositivo	Eficiência
Antes do proulsor	-
Assimetria de popa	5-8%
<i>SHI Safer Fin</i>	3,2%
<i>Namura Control Fin</i>	2-5%
<i>Low Viscous Fin</i>	2,0%
Aletas <i>Grothues</i>	3-7%
Estator de pré-giro	1-6,3%
<i>BMS Mewis Duct</i>	1,5-7,7%
<i>Wake Equalizing Duct</i>	7,0%
Duto <i>Mitsui</i>	2-5%
No propulsor	-
<i>CLT Propeller</i>	6-12%
<i>Kappel Propeller</i>	2-4%
<i>VSP Schneider Propeller</i>	3-5%
Passo controlável	até 10%
<i>STP Twin Propeller</i>	20,0%
Contra rotativa	10-15%
Azimutal	20,0%
Propulsor em duto	5-7%
Depois do propulsor	(na manobra)
Aleta de impulso no cadaste	3,0%
PBCF	até 3%
Bulbo de leme	3-8%
Volante <i>Grim Vane</i>	5-10%
Leme assimétrico	2-4%
Cilindro rotativo	18,0%