

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

ANDERSON MATIAS ARRUDA DA SILVA

MODERNOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

Rio de Janeiro

2015

ANDERSON MATIAS ARRUDA DA SILVA

MODERNOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.
Orientador (a): Msc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

Rio de Janeiro

2015

ANDERSON MATIAS ARRUDA DA SILVA

MODERNOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador(a): Msc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto
Titulação (Mercante/Especialista/Mestre/Doutor, etc)

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Dedico este trabalho aos meus pais Maria e Paulo, ao meu irmão Tiago, pessoas que sempre me apoiaram e aos meus amigos e amigas que me ajudaram durante todo este tempo de formação .

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me conceder força, sabedoria e saúde para chegar ao final deste curso.

Ao meu Orientador, Mestre Paulo Pinto. Obrigado pelas palavras e pela paciência.

Ao meu pai, Paulo, exemplo de humildade, perseverança e criatividade. Agradeço por ser o pai que eu preciso!

À minha mãe, Maria, exemplo de determinação, de caráter que incansavelmente esteve comigo em todos os momentos de minha vida. Obrigado pelo exemplo que me arrastou até aqui.

Ao meu Irmão, Tiago, que foi meu protetor quando precisei. Obrigado por estar sempre ao meu lado.

Aos meus amigos de quarto, Samuel, Vaz e Mateus por dividirem comigo o dia a dia, momentos bons e ruins e, assim, chegamos ao fim dessa etapa.

À minha querida turma de adaptandos, turma Charlie, bem como aos meus pares e amigos de turma e para toda a vida, Rafaela e Nicacio, que dividiram comigo uma experiência única de estar a frente e ser responsável pela condução de sonhos que aqui se iniciaram.

À amiga, Andressa Viana, pessoa de bom caráter com quem compartilhei de inúmeros momentos engraçados.

Finalmente, agradeço à minha amiga, companheira e cúmplice, Camila, umas das melhores pessoas que conheci. Mulher de uma pureza inquestionável, com quem aprendi, dei risadas, compartilhamos de momentos bons e ruins sempre juntos. Levarei para sempre em meu coração. Obrigado por ter sido minhas inspirações diárias de seguir em frente e fazer o melhor que eu pudesse.

Sinceramente, meu muito obrigado a todos.

“Coincidências são pequenos milagres, onde Deus prefere não aparecer”

(Autor desconhecido)

RESUMO

Este trabalho é dedicado a pesquisa descritiva de sistemas propulsores para embarcações. Os sistemas são desenvolvidos para suprir as necessidades do tipo de serviço e a localidade que a embarcação irá operar. Os rebocadores portuários, devido geralmente a limitação de espaço para operação, necessitam de grande manobrabilidade aliada à força de tração, os hélices são de grande diâmetro, portanto com pás de grande área, proporcionando maior superfície de contato e maiores deslocamentos de massa de água. Tratando-se de rebocadores portuários modernos, têm-se os propulsores azimutais, também conhecidos como *rudder propellers*, ou propulsores leme. As embarcações de apoio *offshore* do tipo PSV (*platform supply vessel*) também estão aderindo a este modelo de instalação propulsora, porém o foco neste são as propulsões convencionais com hélice de passo variável. Com menor diâmetro e de menor área, os propulsores neste caso não visam tração estática e sim maior desempenho em velocidade, pela natureza da operação da embarcação, salvo em navios AHTS (*Anchor handling tug supply*), de manipulação dos sistemas de ancoragem das plataformas e também rebocadores, que necessitam de maior tração. Cada tipo de embarcação possui um propulsor para seu melhor desenvolvimento. Descreve-se desta forma cada propulsor com suas características, vantagens e desvantagens desde o mais simples até os atuais com suas complexidades.

Palavras chave: Propulsores. Embarcação. Sistemas.

ABSTRACT

Work devoted to descriptive system thrusters for boats. The systems are designed to meet the needs of the type of service and location that the vessel will operate. The harbor tugs, usually due to limited space for operation, requiring great maneuverability coupled with the traction force, the propellers are large diameter, so with blades large area, providing greater contact surface and higher mass displacements of water. In the case of modern harbor tugs have up azimuth thrusters, also known as rudder propellers. The offshore support vessels type PSV (Platform Supply vessel) are also adhering to this model of propulsion, but the focus in this are the conventional propulsion with variable pitch propeller. With smaller diameter and smaller area, thrusters in this case are not intended to higher static traction performance but speed, the nature of the operation of the vessel. Except in ships AHTS (Anchor handling tug supply), handling of anchoring systems platforms and also tugboats needing more traction. Each type of vessel has a propeller for its best development. Describes it this way each thruster with its features, advantages and disadvantages from the simplest to the present with its complexities.

Key words: Thrusters. Vessel. Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	S Buckau, 1924, primeiro navio Rotor de Flettner	14
Figura 2	Efeito Magnus em navio com rotor de Flettner.	15
Figura 3	Navio de carga MS Beluga	16
Figura 4	Projeto Skysails e como ele trabalha	17
Figura 5	Navio com sistema de propulsão elétrica	20
Figura 6	Navio com sistema de propulsão elétrica	21
Figura 7	Motor de corrente contínua	22
Figura 8	Motor de corrente alternada	24
Figura 9	Sistema de propulsão Azipod	27
Figura 10	Propulsores <i>Azipod</i> duplo	29
Figura 11	Propulsor <i>Azipod</i> simples ou singelo	29
Figura 12	Propulsor CRP <i>Azipod</i>	30
Figura 13	Propulsor <i>Siemens Schottel</i>	31
Figura 14	Equipamentos Sistema Diesel Elétrico (híbrido)	33
Figura 15	Arquitetura de sistema propulsivo híbrido para AHTS	33
Figura 16	Tipos de Operação para Sistemas Híbridos	35
Figura 17	<i>Wartsila midsize waterjets</i>	36
Figura 18	Estrutura <i>wartsila midsize waterjet</i>	37
Figura 19	Estrutura <i>Wartsila modular waterjet</i>	38
Figura 20	<i>Wartsila modular waterjet</i>	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	SISTEMA DE PROPULSÃO POR ENERGIA EÓLICA	13
2.1	Rotor Flettner	13
2.1.1	Funcionamento	14
2.1.2	Aplicação	15
2.2	<i>SkySails</i>	16
2.2.1	Funcionamento	17
2.2.2	Aplicação	18
3	SISTEMA DE PROPULSÃO POR ENERGIA ELÉTRICA	19
3.1	Arranjo e Funcionamento	20
3.2	Propulsão com Corrente Contínua	21
3.3	Propulsão com Corrente Alternada	23
3.4	Vantagens da propulsão elétrica	24
3.5	Desvantagens da propulsão elétrica	25
3.6	Aplicações	25
4	PROPULSORES ELÉTRICOS	26
4.1	<i>Azipod</i>	26
4.1.1	Funcionamento	26
4.1.2	Aplicação	27
4.1.3	Vantagens	28
4.1.4	Desvantagens	28
4.2	<i>CRP Azipod</i>	30
4.3	<i>Siemens Schottel</i>	31
5	SISTEMAS HÍBRIDOS	32
5.1	Estrutura	32
5.2	Funcionamento	34
5.3	Aplicações	34
5.4	Vantagens	35
6	SISTEMA DE PROPULSÃO COM JATO DE ÁGUA	36
6.1	<i>Watsila Midsize Waterjets</i>	36
6.1.1	<i>Benefícios</i>	37
6.2	<i>Wartsila Modular Waterjet</i>	38

6.2.1	Benefícios	39
6.3	Aplicações	40
6.4	Vantagens numa visão geral	40
6.5	Desvantagens numa visão geral	41
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

Segundo alguns estudiosos, o primeiro meio de transporte inventado foi aquático, ainda na pré-história, no período Mesolítico. Devido a grande necessidade de exploração e busca de alimentos, a importância da embarcação naquela época era notória. O seu grau de importância continua o mesmo nos dias atuais, porém, com objetivos de utilização diferentes, como transporte de pessoas e comércio.

Estudos arqueológicos mostram que a primeira forma que o homem primitivo encontrou de se locomover dentro da água foi usando troncos de madeira sobre o qual se deitava, utilizando as mãos como força propulsora, encontrando grandes dificuldades devido às correntezas dos rios, o que levou a criação do remo. O remo servia tanto para impulsionar o barco quanto para dar-lhe rumo, tornando-o mais independente e viabilizando a sua movimentação.

A inserção da vela veio pela vontade de se movimentar por maiores distancias e até para conhecer novos continentes, que para muitos era impossível de se conhecer. A vela foi durante muito tempo o principal sistema de propulsão dos navios tanto de guerra quanto de comercio e transporte de pessoas, mas caiu em desuso com a invenção da maquina a vapor e a manipulação do ferro, símbolos da Revolução Industrial ocorrida na Inglaterra no século XVIII.

O motor a vapor foi substituído pela turbina a vapor que possuía uma maior produção, mas exigia uma maior quantidade de combustível. Em 1876, o motor de combustão interna foi inventado por Nikolaus Otto, usava gasolina como combustível e ignição por centelha. Já o motor inventado por Rudolf Diesel em 1897, possuía ignição por compressão e combustível derivado de petróleo. O Motor de Combustão Interna está presente na maioria dos navios mercantes no cenário atual, que são responsáveis por nada menos que 95 % do comercio internacional, mas a sua utilização vem sendo cada dia mais criticada devido a sua alta emissão de gases poluentes no meio ambiente. Em 2008 cerca de 4 % da emissão de CO₂ que era lançado na atmosfera provinha de navios.

Assim, legislações ambientais e normas, como a ISO 9000 e ISO 14001, estão cada vez mais rígidas contra a emissão de poluentes através desses meios de transporte, incluindo aí as medidas da MARPOL – Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios e por conta disso, o interesse pelo aperfeiçoamento da operacionalidade, tecnologia e custo dos sistemas de propulsão vem crescendo a cada dia. É o caso da tecnologia de propulsão eólica, da propulsão elétrica, os *waterjets* e os sistemas híbridos que podem parecer passos pequenos, mas que estão na direção considerada correta e que devem ser explorados.

2 SISTEMA DE PROPULSÃO POR ENERGIA EÓLICA

A velocidade dos ventos é utilizada há muito tempo para mover navios. Tradicionalmente essa locomoção é feita através das velas de pano que, desfraldadas nos mastros, enfunam com o vento que assim empurra a embarcação na direção do seu sopro ou até em direção quase oposta, graças às chamadas velas latinas. Com o passar dos anos a navegação à vela foi dando lugar (mas não totalmente) à navegação mecânica, como aconteceu, de resto, com outros meios de propulsão eólica, como os moinhos de moagem de cereais, de elevação de águas e outros.

No entanto, nas últimas décadas tem-se assistido a um aparecimento constante de novas formas de utilizar o vento, como para a produção de energia elétrica através de turbinas instaladas em grandes torres que têm sido colocadas, estrategicamente, em sítios com boa predominância de ventos. Em Portugal têm sido implantadas em locais de elevada altitude, normalmente em serras, mas há países que construíram parques eólicos no mar. Essa utilização do vento através de novos métodos, não se restringe apenas à produção de energia elétrica, voltando a mover navios, o que faz todo sentido já que se trata de uma fonte de energia inesgotável, gratuita e não poluente.

Agora novas tecnologias foram criadas para o seu aproveitamento, demonstrando que se pode combinar economia e ecologia para a propulsão. Um exemplo disso é o navio com rotor de Flettner e os navios com sistema *SkySails*.

2.1 Rotor de Flettner

Um navio de rotor, ou navio Flettner, é um navio projetado para usar o efeito Magnus para propulsão. Para tirar vantagem deste efeito, ela usa *rotorsails* que são alimentados por um motor.

O efeito de Magnus é um fenômeno onde um corpo sólido se encontra em rotação num fluido (gás ou líquido) envolvente, o que origina um turbilhão no fluido com um sentido perpendicular á linha de movimento. Quando um corpo se encontra em rotação num fluido cria-se uma camada limitante que faz

com que a velocidade do fluido aumente á medida que se encontra mais perto do corpo, e essa alteração da velocidade vai provocar uma variação na pressão, de acordo com o principio de Bernoulli, quanto maior a velocidade, maior a pressão existente. Claro que este efeito tem mais variáveis, contudo estas são as mais importantes.

$$F = \frac{1}{2}\rho V^2 AC_L$$

F = força de sustentação

ρ = densidade do fluido

r = raio do corpo

V = velocidade de rotação do corpo

A = área do corte do copo

C_L =coeficiente de sustentação

O Engenheiro alemão Anton Flettner foi o primeiro a construir um navio que tentou usar essa força para a propulsão.

Figura 1 MS Buckau, 1924, primeiro navio Rotor de Flettner



Fonte:United States Library ofCongress'

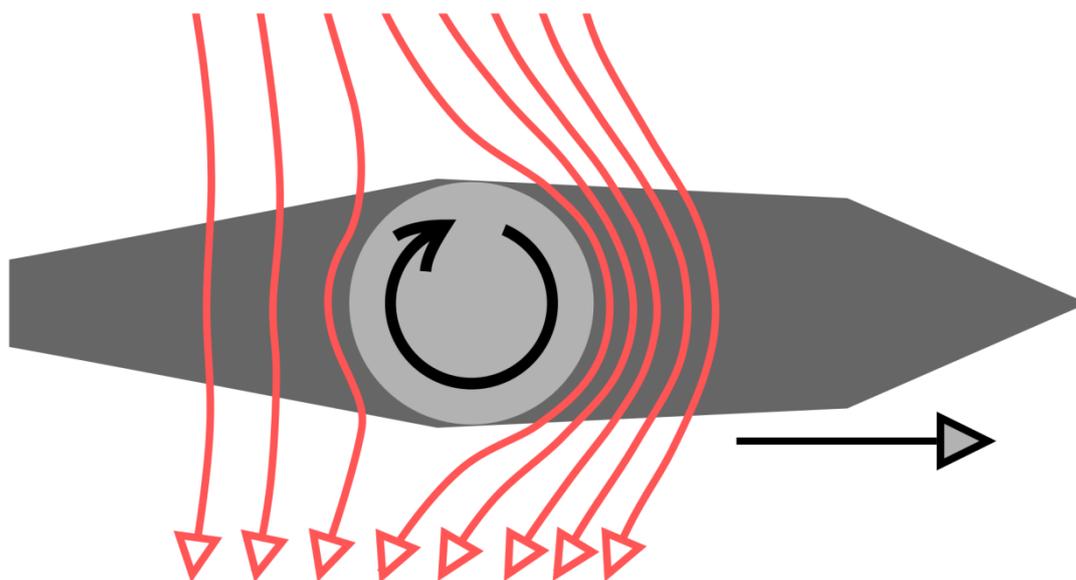
2.1.1 Funcionamento

Assemelha-se basicamente à um barco a velas, pois assim como este utiliza o vento e demais engenharias para sua locomoção e resistências laterais

ao arrasto. Contudo o funcionamento do rotor de Flettner não substitui o mastro e sim a área da vela, ao invés do vento ser desviado pela inclinação dessa (presa ao mastro) cabe aos cilindros verticais manter a face em constante rotação por pequenos motores (preferencialmente) elétricos, friccionando-se com a corrente de vento a fim de desviar o fluxo, de modo que o único trabalho que os motores têm que vencer é a fricção gerada em um dos lados do cilindro em rotação e responsável pela resultante.

Com base no Efeito Magnus o giro do cilindro juntamente com o vento proporcionam áreas de baixa e alta pressão. Nos locais aonde o vento incide na mesma direção da rotação do cilindro a velocidade com que este passa é maior, portanto cria-se uma zona de baixa pressão. No outro extremo, aonde o ar incide no sentido contrário de rotação do cilindro, então a velocidade é menor, portanto a pressão é maior, transformando-se então em vetores as forças geradas obtém-se que há uma terceira força resultante a qual é usada para impulsionar o barco.

Figura 2 Efeito Magnus em navio com rotor de Flettner



Fonte:commons.wikimedia.org

2.1.2 Aplicação

Embora este sistema proporcione grande economia de combustível, cerca de 40%, e possuir capacidade de alcançar velocidades consideráveis

podendo passar de 15 nós, os rotores de Flettner não são utilizados em navios cargueiros por ocuparem grande espaço nos conveses dos navios, inviabilizando seu uso. Com isso, este sistema, no geral, é utilizado apenas para o transporte de turbinas eólicas da empresa fabricante do navio, mas representa um pequeno passo de ideias inovadoras que são necessárias para a preservação do planeta.

2.2 SkySails

O sistema de propulsão *SkySails* consiste em uma grande folha de pipa(*kite*) possuindo grandes semelhanças com *kitesurf* e foi testado pela primeira vez no Mar Báltico antes da implementação comercial.

A tecnologia foi desenvolvida pelo engenheiro alemão Stefan Wrage e implementada pelo armador alemão *Beluga Shipping*, proprietário da *MS Beluga SkySails*, uma transportadora de carga pesada onde estão sendo fabricados navios com capacidade para até 100 toneladas de carga, cujas velas poderão medir até 600 metros quadrados. Um navio convencional com um sistema *SkySail* tem dois métodos de propulsão, tornando-se um tipo de veículo híbrido.

Figura 3 Navio de carga MS Beluga



Fonte: <https://www.crewtoo.com/maritime-news/how-can-container-ships-save-fuel-by-using-kites>

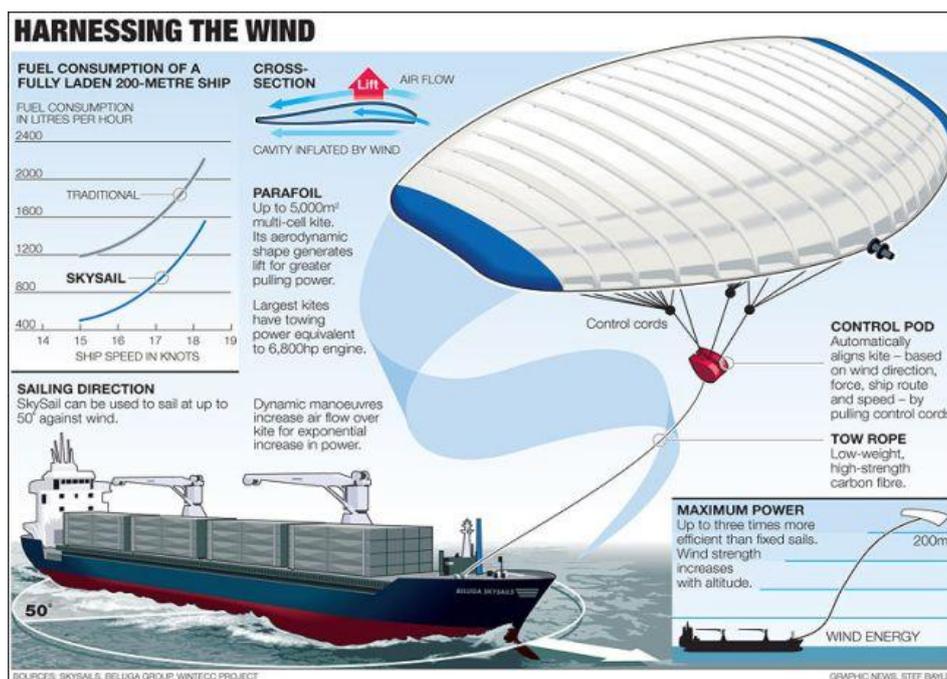
2.2.1 Funcionamento

As pipas são feitas para altitudes de 100-500 metros por causa dos ventos mais fortes nestas alturas, elas recebem um impulso substancialmente maior por unidade de área do que velas montadas em mastros convencionais. É possível que um navio equipado com as atuais *SkySails* pode consumir de 10 a 35 % menos combustível.

A força que impulsiona a pipa permite que o motor trabalhe em potência reduzida, permitindo além da redução do consumo de combustível, uma diminuição na emissão de poluentes. O Sistema *SkySails* é totalmente automatizado. Um computador ajuda-o a voar em forma de oito no céu – maximizando a energia que ele produz. Outro computador ajusta a sua direção.

No teste em percurso, a eficiência do sistema *SkySails* foi testado por até oito horas por dia em ventos de força cinco. O sistema foi considerado um sucesso, com economia calculada de até 2.5t de combustível por dia. Tecendo em valores, a economia pode chegar a 300.000 euros por ano e a redução global de dióxido de carbono do transporte poderia chegar a 150 milhões de toneladas por ano.

Figura 4 Projeto Skysails e como ele trabalha



Fonte: http://ports.co.za/news/article_2008_01_24_1851.html

2.2.2 Aplicação

Com a constante variação do preço do combustível, o sistema *SkySail* tem sido cada vez mais utilizado, sobretudo, em navios cargueiros visando tornar mais econômica, segura e capaz de amenizar o aumento no preço do combustível. O sistema pode ser potencialmente adaptado, com baixos custos, a qualquer navio. Sua aplicação garante uma redução de até 35% no consumo de combustível, bem como na emissão de gases poluentes para atmosfera representando, assim, um avanço nas tecnologias de preservação do meio ambiente.

3 SISTEMA DE PROPULSÃO POR ENERGIA ELÉTRICA

A indústria naval já percorreu um longo caminho para reduzir os custos de propulsão sem aumentar a poluição marinha. O sistema de propulsão convencional do navio é eficiente, mas requer altos custos operacionais e aumenta a poluição marinha. Entre todas as fontes de energia alternativas potenciais, o sistema de propulsão elétrica é uma das melhores alternativas experimentadas até hoje.

O uso de propulsão usando motores elétricos vem desde o século XIX, com a construção e operação de uma pequena lancha movida a baterias para o transporte de passageiros na Rússia. Experiências com aplicação de baterias suprimindo um sistema de propulsão elétrica foram feitas na também Alemanha. Nesse sistema, havia geradores que alimentavam e variavam a velocidade dos motores elétricos através da sua variação de tensão. Com a introdução dos motores a diesel de alta eficiência e economia em meados do século XX, a propulsão elétrica e as turbinas a vapor foram desaparecendo dos navios mercantes até a década de 1980.

Com o desenvolvimento dos inversores de frequência o sistema de propulsão elétrica novamente entrou em foco. Diferentes dos antigos sistemas, as modernas plantas elétricas possuem tensão e frequência constantes nos barramentos alimentados por geradores elétricos, geralmente a diesel, que funcionam com velocidade constante, passando a um maior rendimento e também se tornou possível à integração dos sistemas elétricos de propulsão e auxiliares.

Atualmente muitos navios mercantes e de passageiro usam esse tipo de propulsão como meio mais econômico e eficiente. A utilização de rebocadores, para a movimentação lateral da embarcação para auxiliar na manobra é difícil e custosa, portanto embarcações mais modernas começaram a utilizar hélices laterais de túnel, movidos por motores elétricos e hidráulicos, na popa "*Stern thruster*" na proa "*bow thruster*". Devido à fácil operação, maior rapidez de resposta e menores dimensões, os "*thrusters*" movidos por motores elétricos destacaram-se na marinha mercante mundial. Porém, o sistema de "*thrusters*", embora muito eficiente, possui o problema da grande tensão empregada em

alguns casos. Os motores de propulsão usados nesses sistemas, normalmente são motores de indução de corrente alternada e possuem altas correntes de partida.

Figura 5 Navio com sistema de propulsão elétrica

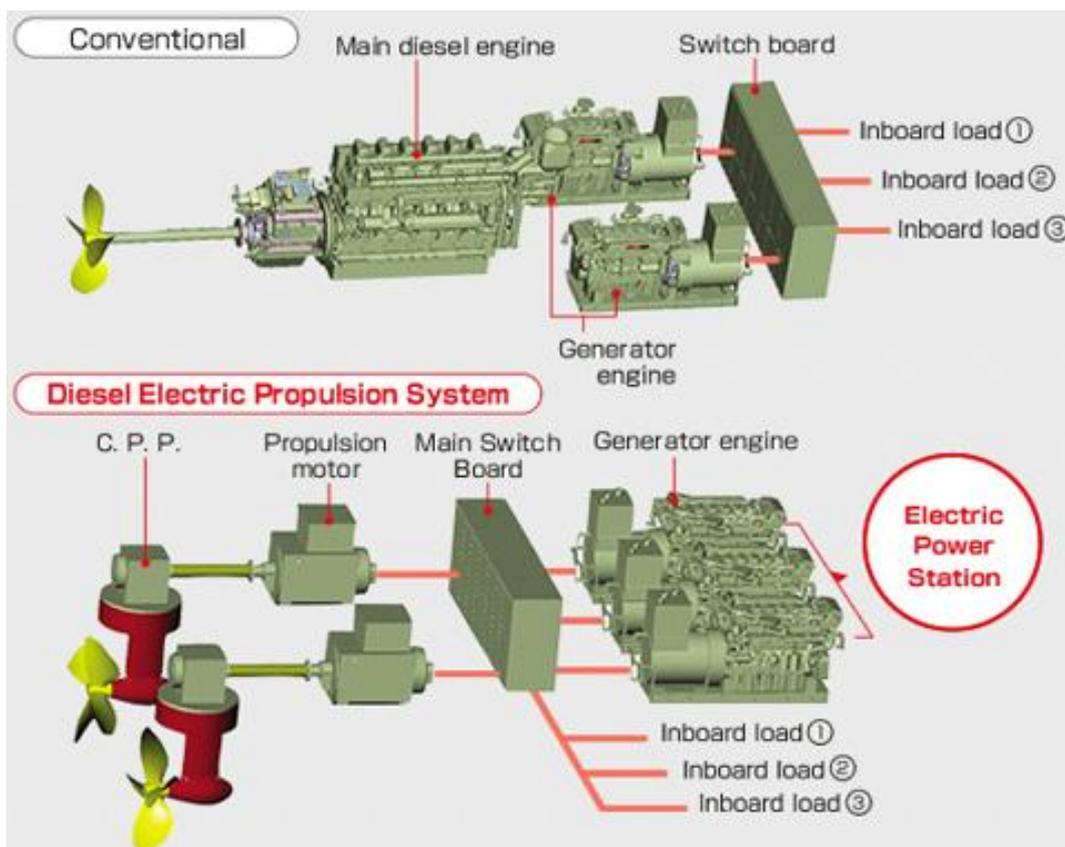


Fonte: <http://www.nauticexpo.com/prod/sam-electronics/product-27595-305914.html>

3.1 Arranjo e funcionamento

O sistema de propulsão elétrica consiste de um motor primário que pode ser de dois tipos: diesel ou turbina. Ambos os sistemas produzem menos poluição em comparação com sistema de propulsão marinha convencional, que envolve a queima de óleo pesado. O eixo da hélice do navio é ligado a grandes motores, que podem ser acionados por corrente contínua ou alternada e são conhecidos como motores de propulsão. A potência para a propulsão do motor é fornecida pelo gerador do navio e pelo MCP. O gerador pode ser de corrente contínua ou alternada, com motor a diesel ou vapor direcionado, dependendo da exigência ou demanda do navio. No sistema de propulsão elétrica, o sentido de rotação da hélice é regulada pelo controle elétrico do próprio motor ou mudando a alimentação elétrica. Normalmente motor elétrico de velocidade variável é usado para propulsão de sistema com hélice de passo fixo. Já o motor elétrico de velocidade constante ou variável e pode ser usado em sistemas de passo variável ou CPP.

Figura 6 Navio com sistema de propulsão elétrica



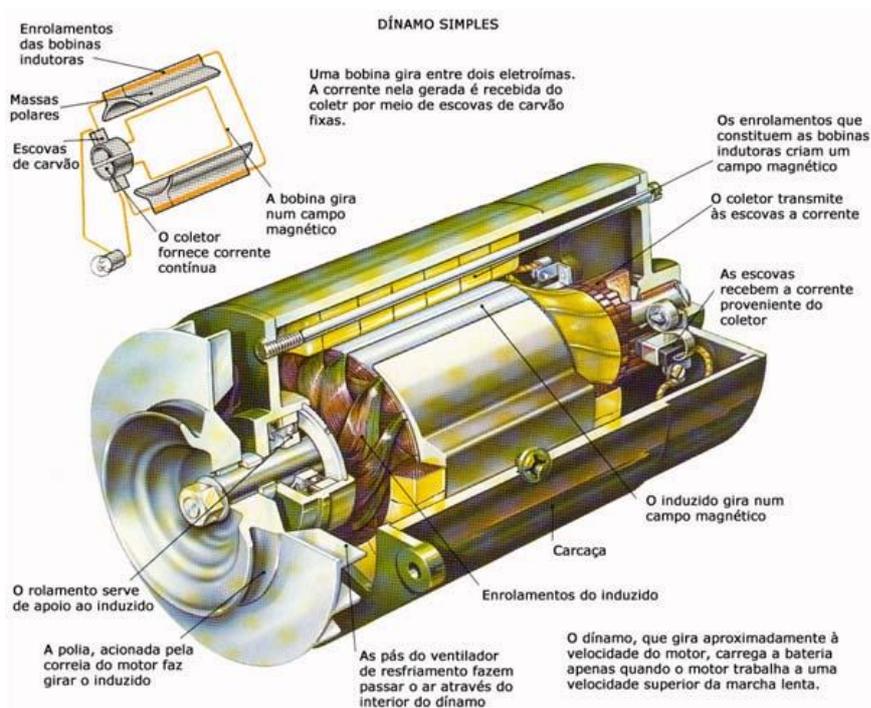
Fonte: <http://www.marineinsight.com/tech/marine-electrical/electrical-propulsion-system-in-ships/>

3.2 Propulsão com Corrente Contínua

As embarcações com propulsão elétrica em corrente contínua começaram a surgir no início do século XX, nessa época a propulsão elétrica em CC era considerada a melhor opção para realização de manobra porque tinha a possibilidade de ajustar gradualmente a velocidade da embarcação, para os rebocadores essa suavidade é muito importante para manter a integridade de seu casco, e do casco da outra embarcação que esta sendo rebocada. Esse procedimento de suavização na velocidade usava como controle reostatos que variavam a excitação do campo, mas dissipavam bastante energia em forma de calor. Para propulsão em corrente contínua, um possível arranjo é constituído por quatro geradores elétricos da propulsão, em 220 volts CC e quatro motores elétricos de propulsão, dois por eixo, localizados

no eixo propulsor entre o mancal de escora e o hélice. Devido a grande utilização desse sistema, com o atrito entre a escova e o coletor, temos o desgaste da escova, gerando um centelhamento. Como consequência, ocorre um aumento do calor emanado, que pode avariar o coletor do motor. A manutenção constante e complexa desse sistema é uma das suas maiores desvantagens, devido ao problema de comutação. Sua manutenção é feita com a limpeza do coletor, checagem da tensão da mola que mantém a escova faceando o coletor e com a calagem ou ajuste angular do porta-escova, além do uso de interpolos. Apesar dos problemas que encontramos no sistema de propulsão elétrica em corrente contínua, esse sistema ainda é utilizado em razão da sua grande capacidade de manobra, que é um fator fundamental no caso de rebocadores.

Figura 7 Motor corrente contínua

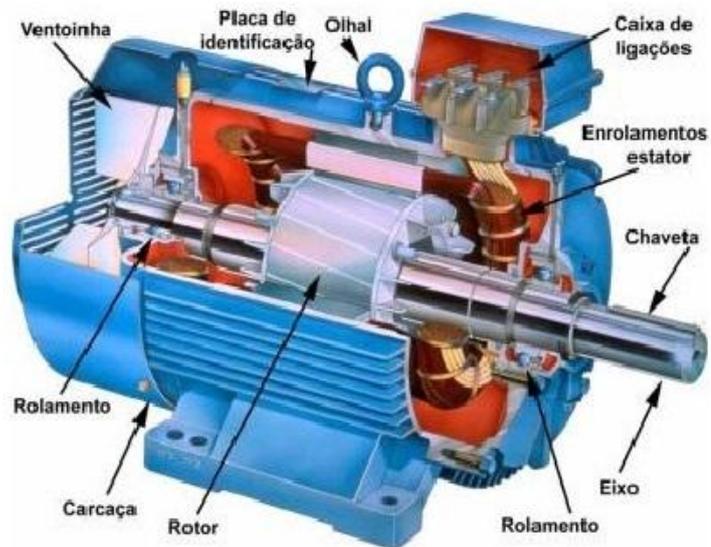


http://www.ebah.com.br/content/ABAAA3_wAB/gerador-corrente-continua

3.3 Propulsão com Corrente Alternada

Devido às limitações tecnológicas da propulsão elétrica por corrente contínua, foram desenvolvidos os motores elétricos de corrente alternada por possuírem vida útil maior, pois nesse tipo de propulsão não existe o desgaste excessivo das escovas e permitem trabalhar com menor corrente e maior tensão, além disso, possuem chaveamento eletrônico mais rápido, menor, mais preciso, mais barato e eficiente do que as chaves eletromecânicas utilizadas para corrente contínua. O desenvolvimento do conceito de propulsão elétrica em corrente alternada é devido à expansão da tecnologia da eletrônica de potência com grande utilização de dispositivos de microeletrônica. Os dispositivos da microeletrônica são, na realidade, semicondutores que permitem ou impedem a passagem de corrente elétrica, mas também são capazes de chavear altas correntes e altas potências de modo a controlar e processar a potência elétrica. Conforme o navio e a época da construção, esses artifícios variam desde mudanças na ligação de campos múltiplos, como nos motores Dahlander, até o emprego de circuitos eletrônicos e uma combinação desses métodos. Além disso, é comum encontrar hélices de passo controlado (HPC) nas instalações ora descritas, o que elimina a necessidade de variação na carga do motor elétrico. A variação de passo ainda permite a reversão sem precisar parar o MEP e inverter o sentido da sua rotação, como é preciso fazer nos motores elétricos menores, por exemplo, nos guinchos de atracação e molinetes dos ferros. Os mais modernos sistemas de geração de energia das embarcações empregam inúmeros equipamentos que controlam a frequência, tensão, corrente e fase da energia gerada. Quando a carga elétrica é variada, são gerados harmônicos de frequência e picos de corrente que podem provocar erros na leitura desses equipamentos, o que provoca a instabilidade dos geradores, podendo até ocorrer o desligamento desses sistemas. A solução para evitar esse excesso de corrente é a instalação de motores elétricos com sistemas azimutais.

Figura 8 Motor corrente alternada



<http://www.portaleletricista.com.br/motores-de-inducao/>

3.4 Vantagens da propulsão elétrica

- a) Economia de combustível e emissões de poluentes reduzidas;
- b) Transientes de motor reduzidos (reduzir as cargas transientes em motores);
- c) Dispensa o uso de leme;
- d) Funcionamento do motor otimizada e aumento do desempenho;
- e) Níveis baixos de ruído e vibração;
- f) Economia de espaço. Espaço no casco que anteriormente era reservado para a propulsão pode ser utilizado para outros propósitos;
- g) Capacidade de manobra significativamente melhor que os sistemas de leme convencional, pois o próprio propulsor pode girar em torno do seu eixo, comandando a direção do navio como se fosse o leme;
- h) Excelente capacidade de reversão durante a navegação à ré e melhor resposta no caso de desaceleração;
- i) Excelente desempenho em campo de esteira.

3.5 Desvantagens da propulsão elétrica

- a) Custo inicial elevado;
- b) Limitação da potência produzida pelo motor;
- c) Grande número de motores diesel é necessário para produção de energia.

3.6 Aplicações

Normalmente, sistema de propulsão elétrica era usado em pequena embarcação, mas hoje em dia as companhias de navegação estão adotando este sistema para navios maiores e de carga. Geralmente propulsão elétrica é montada em: rebocadores e navio para pesca, dragas, navios de posicionamento dinâmico, navio AHTS(*Anchor Handling Tug Supply Vessel*), navios quebradores de gelo, navio de pesquisa, guindastes flutuantes, navios de indústrias marítimas.

4 PROPULSORES ELÉTRICOS

Os propulsores elétricos vêm para agregar mais versatilidade a todo moderno sistema de propulsão já apresentado. Eles foram criados para substituir os antigos propulsores que eram movidos pelo eixo acoplado ao Motor de Combustão Interna.

Caracterizam-se principalmente pelo poder de rotação em 360°, dando ao navio uma maior manobrabilidade.

4.1 *Azipod*

Desenvolvido na Finlândia conjuntamente pela empresa de construção naval *Masa-Yards* e *ABB*, *Azipod* é uma unidade de propulsão marítima que consiste em uma hélice de passo fixo montado em uma gôndola ("pod"), que também contém o motor elétrico de condução do hélice.

O termo significa "*pod*" + *Azimuth*, *pod* devido ao formato do *thruster* e *AZI* de *azimuth* por conta da capacidade de giro de 360°.

O *Azipod* combina a propulsão e governo em um único sistema. Substitui as tradicionais hélices, longos eixos de transmissão e os lemes. Esse sistema apresenta uma maior eficiência, diminuição da poluição, baixo ruído e vibração e permite alta manobrabilidade às embarcações de apoio marítimo.

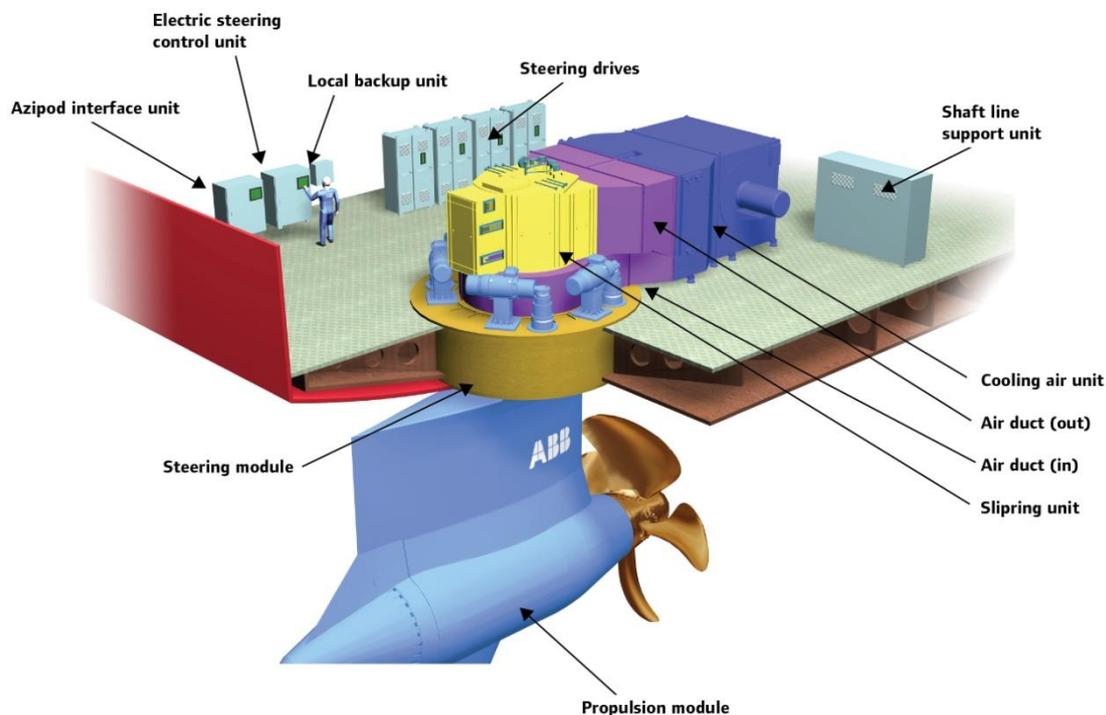
4.1.1 Funcionamento

Consiste basicamente de um motor elétrico instalado dentro de um capsula chamada de POD, que permanece dentro da água e aciona um hélice de passo fixo. Por dispensar o eixo de transmissão é possível ser instalado mais baixo do casco, com isso diminui a turbulência causada pela água, aumentando a eficiência hidrodinâmica e mecânica. Por não haver a transmissão por eixo, não há perdas de transmissão. A única perda é a elétrica nos cabos de energia por efeito Joule.

Com a substituição do hélice com eixo fixo por um propulsor que pode girar em 360° em torno do seu eixo vertical, foi possível direcionar a força em qualquer direção com alto grau de precisão. Esse fato fez com que não fosse

mais necessário a utilização do leme, reduzindo o peso da embarcação e o número de partes móveis, mas tende a aumentar o calado do navio.

Figura 9 Sistema de propulsão *Azipod*



5

Fonte: <http://businessroundtable.org/inventing-the-future/abb>

O sistema também apresenta inversores de frequência, transformadores, quadros, automação, controles e geradores. O diâmetro do *POD* deve ser menor que o diâmetro do hélice, isto influencia hidrodinamicamente proporcionando uma menor resistência de movimento e eficiência da propulsão.

4.1.2 Aplicação

As unidades *AZIPOD* têm sido instaladas em duas modalidades de arranjos: simples; duplos. Citaremos agora a aplicação de cada modalidade.

Propulsão *AZIPOD* simples: a propulsão *AZIPOD* simples, ou singela, é mais empregada em navios cargueiros e tanques.

A propulsão *AZIPOD* dupla: mais usada em navios de cruzeiro e *ferry-boats*, e é um excelente sistema de propulsão nos casos em que é preciso uma boa capacidade de manobra e alta redundância. Redundância é a capacidade de poder acionar outro equipamento de forma automática a partir do momento exato em que o equipamento principal der problema sem o prejuízo da interrupção da operação, uma caracte

4.1.3 Vantagens

- a) No caso de navios grandes, dois ou mais *azipods* independentes entre si podem ser utilizados, pois proporcionam manobras de maior precisão;
- b) Economiza-se muito espaço na praça de máquinas já que não existem motores, impelidores, eixos e outros arranjos. O espaço economizado pode ser utilizado para mais carga no navio;
- c) O sistema pode ser posicionado embaixo do navio promovendo desta forma mais eficiência do que o sistema convencional;
- d) O uso de impelidores laterais (*bow thruster*, *side thruster*) pode ser eliminado já que os *pods* podem prover tais esforços laterais;
- e) Vibrações e barulho menores do que no sistema convencional;
- f) Baixo consumo de combustível e lubrificante em relação ao sistema convencional.
- g) Amigável com o meio ambiente já que as emissões são mais baixas.

4.1.4 Desvantagens

- a) Sistema *azipod* requer um custo inicial elevado;
- b) Um grande número de motores a diesel é necessário para a produção de energia;

- c) Há uma limitação da potência produzida pelo motor: atualmente as potências mais elevadas disponíveis estão na faixa dos 21 MW;
- d) Não pode ainda ser instalado em grandes navios, pois eles precisam de grandes potências.

Figura 10 Propulsores *Azipod* duplo



Fonte: <http://www.motorship.com/news101/industry-news/azipods-ordered-for-two-rcl-cruise-ships>

Figura 11 Propulsor *Azipod* simples ou singelo



Fonte: <http://grabpage.info/t/www.bing.com:80/images/search?q=All+ABB+Azipod+Azipod+Azimuthing&FORM=RESTAB>

4.2 CRPAzipod (Contra-Rotating Pod)

Esse sistema combina dois diferentes sistemas de propulsão: um hélice principal acionada convencionalmente e outro hélice por trás deste, alinhado com o principal e girando em sentido contrário. O hélice principal de passo variável é acoplado ao motor de combustão principal, enquanto o segundo hélice, de passo fixo, é acionado por um motor elétrico que está alojado dentro do *Azipod* e que pode girar 360° em torno do seu eixo vertical. Neste caso, o *Azipod* também é instalado para substituir os lemes convencionais.

Figura 12 Propulsor CRPAzipod



Fonte:<http://new.abb.com/marine/references/shin-nikonhai-ferry-co>

A propulsão contra rotatória, que dá o nome ao sistema, permite que o hélice principal direcione um melhor fluxo de água para o propulsor POD, fornecendo mais energia e uma maior eficiência. Alguns aspectos destacáveis:

- A relação de carga entre o hélice principal e o hélice do *Azipod* pode ser ajustada, 60 a 70% de carga para o principal e 40 a 30% de carga para o *Azipod*.
- O diâmetro do hélice do *Azipod* é menor do que o hélice principal para prevenir cavitação.
- O número de pás entre os hélices são diferentes para prevenir ressonância.
- A velocidade do hélice do *Azipod* é maior do que o hélice principal para garantir uma máxima eficiência para os dois hélices.

4.3 *Siemens Schottel*

Siemens-Schottel Propulsion (SSP) é um sistema diesel-elétrico de propulsão que fornece melhor manobrabilidade e pode ser facilmente integrado no navio. Ele combina a perícia mecânica e hidrodinâmica da *SCHOTTEL* e a tecnologia de acionamento de um motor Siemens permanentemente excitado. Este propulsor, eficiente e flexível, pode ser perfeitamente integrado e é ideal para os navios com elevadas exigências de manobrabilidade, conforto e utilização do espaço, como balsas, navios de cruzeiro e embarcações especiais. É uma solução para economia de espaço.

Figura 13 *Propulsor Siemens Shottel*



Fonte: <http://www.seaequipment.com/specs/261>

Este propulsor é acionado por um motor altamente eficiente que fica permanentemente excitado, o qual é arrefecido pela água do mar circundante e tem um design otimizado delgado e hidrodinâmico. Estas qualidades são reforçadas pelo conceito de dupla hélice, em que estes são montados no veio do motor, e giram na mesma direção, um em cada extremidade da cápsula. O SSP pode ser girado em 360° completos, o que melhora significativamente a capacidade de manobra, especialmente a baixas velocidades. O motor elétrico que está montado abaixo de um recipiente aciona o hélice diretamente e como o propulsor pode girar livremente, este também pode atuar como leme.

5 SISTEMAS HÍBRIDOS

Em navios de suporte a plataforma a capacidade total do motor deve ser dimensionada para atingir a velocidade de serviço solicitada pela embarcação, ou a capacidade de posicionamento dinâmico nas piores situações meteorológicas possíveis. Como a maioria das novas embarcações *supply* são classificadas como DP (*Dynamic Position*), ou seja, com necessidade de redundância de seus equipamentos, a potência total instalada pode ser muito maior que a requerida para cargas médias.

Até pouco tempo atrás quase todos os navios do tipo AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*) eram construídos com sistema propulsivo do tipo Diesel Mecânico, devido ao foco primordial da embarcação que é o *ballard pull*, capacidade de tração estática, característica necessária para as atividades operacionais de reboque. O sistema conhecido como Híbrido foi estudado como uma possível solução para esses navios, que por possuírem um diversificado perfil operacional possuíam grande desperdício de energia. Um fator importante do estudo foi que os custos de construção adicionais eram mais baixos quando comparados com os benefícios gerados, como a economia de combustível inerente a esse sistema, que é caracterizado pela mescla dos dois primeiros sistemas propulsivos: Diesel Mecânico + Diesel Elétrico. Foi uma forma escolhida por projetistas de aliar as melhores qualidades desses dois sistemas afim de evitar o consumo excessivo de combustível em embarcações com perfis operacionais de atividades distintas, exigindo diferentes níveis de energia.

Esse sistema permite uma versatilidade na geração de energia, atendendo todas as faixas de consumo, dentro das faixas de operação dos Motores e Geradores do sistema. Trabalhar a maior parte do tempo dentro da faixa de operação de projeto dos motores e geradores resulta em maior eficiência energética e economia de combustível.

5.1 Estrutura

O sistema é composto por duas linhas de eixo, sendo que cada uma delas possui um propulsor de passo controlável e uma caixa redutora. Há duas

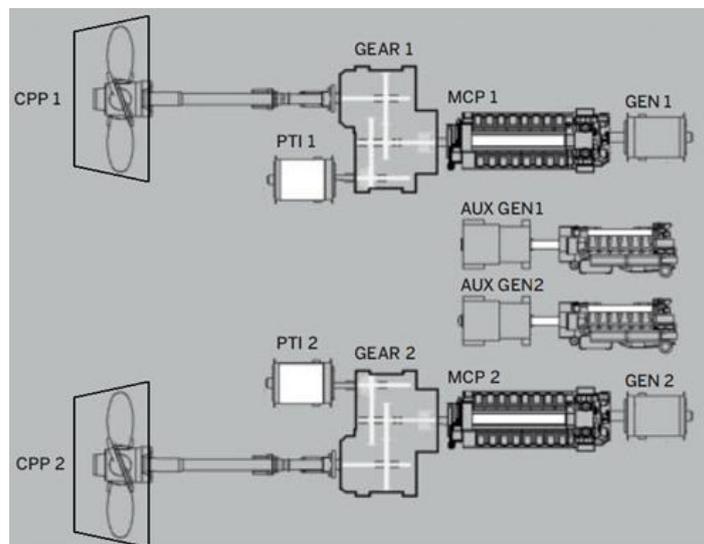
entradas para esta caixa redutora, uma com um motor diesel, e outra com um motor elétrico. Há ainda um gerador de eixo ligado diretamente ao motor principal. Há toda uma gama de modos operacionais, mas basicamente pode ser afirmado que o sistema Diesel Elétrico permite a utilização dos motores seja escalonada de forma a impedir o funcionamento em baixa carga. Da mesma forma, o problema da dissipação de potência quando em passo zero pode ser eliminado pelo acionamento dos motores elétricos através de um variador de frequência.

Figura 14 Equipamentos Sistema Diesel Elétrico (híbrido)



Fonte: wartsila.com

Figura 15 Arquitetura de sistema propulsivo híbrido para AHTS



Fonte: Wartsila.com

5.2 Funcionamento

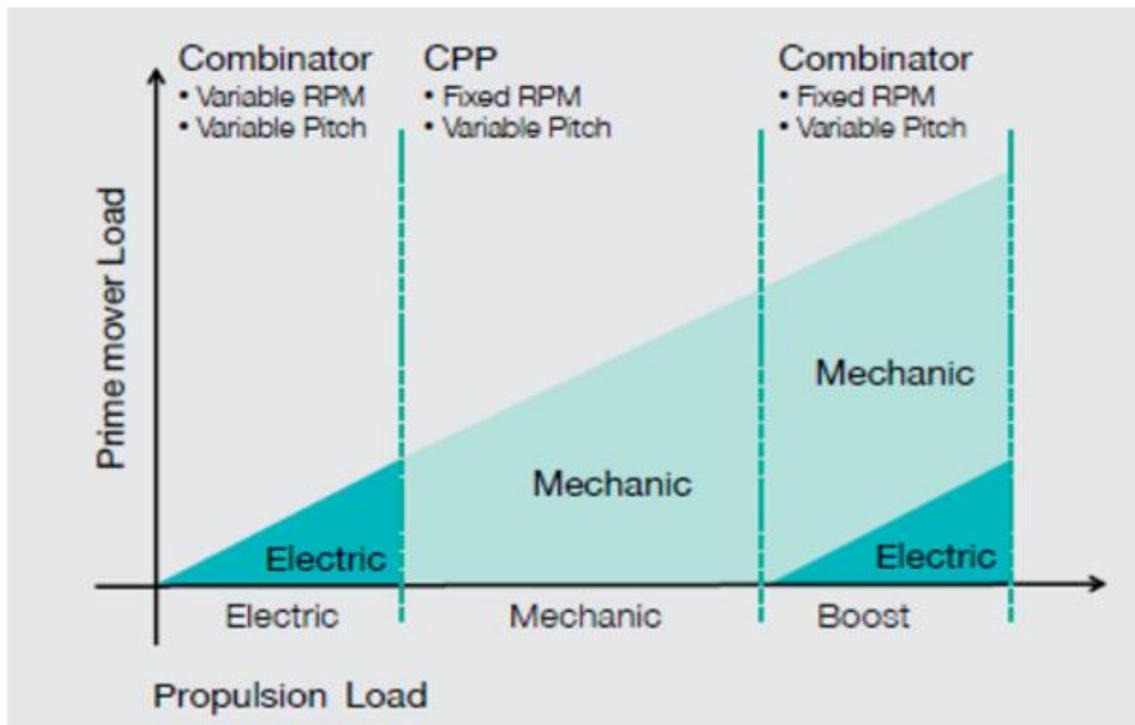
Quando em navegação, os dois motores diesel acoplados à linha de eixo acionam a mesma que transmite sua força a um único hélice de passo controlável e grande diâmetro, tal qual um sistema diesel-mecânico. Neste momento, a potência elétrica necessária para a carga de hotelaria e sistemas do navio pode tanto vir dos grupos-geradores auxiliares, como dos geradores de eixo. No entanto, quando da chegada à unidade que irá ser abastecida, os dois motores da linha de eixo central são desconectados da mesma e passam a acionar somente os geradores de eixo, e a trabalhar em paralelo com geradores auxiliares, formando um sistema diesel-elétrico com quatro grupos geradores. Os propulsores azimutais retráteis são baixados e postos em funcionamento, sendo alimentados pela planta de geração até a operação terminar. Então os propulsores retráteis são suspensos para dentro do casco novamente, e os motores centrais são acoplados à linha de eixo, quando a embarcação então parte para seu próximo destino com a propulsão diesel-mecânica em funcionamento.

5.3 Aplicação

Este trabalho é voltado, sobretudo, para utilizações em embarcações de apoio marítimo. Este sistema se mostra uma alternativa bastante interessante para embarcações que possuam demanda de energia caracterizada por picos de pouca duração e longos períodos com rotação constante e pouca carga. Em princípio, a embarcação com Sistema Propulsivo Híbrido pode ser operada de três maneiras:

- a) Propulsão elétrica pura para manobras de baixa velocidade, trânsito e DP;
- b) Propulsão mecânica pura para operações de reboque e trânsito de alta velocidade;
- c) Propulsão elétrica e mecânica híbrida, onde equipamentos elétricos podem ser utilizados como um “reforço” para o sistema de propulsão mecânica no intuito de atingir os requisitos de tração estática.

Figura 16 Tipos de Operação para Sistemas Híbridos



Fonte: ABB

5.4 Vantagens

- O sistema híbrido atualmente possui um grande potencial de utilização devido a grande disseminação de sistemas eletrônicos a bordo. Dentre eles está o Posicionamento Dinâmico que corresponde a um complexo sistema de controle de posição dinâmica, composto por várias variáveis capazes de tornar seu posicionamento mais preciso (GPS, DGPS, Anemômetros, Giroscópios, Agulhas Magnéticas, etc);
- Esse sistema permite uma flexibilidade na geração de energia a bordo, atendendo todas as faixas de consumo, dentro das faixas de operação dos motores e geradores do sistema. Trabalhar a maior parte do tempo dentro da faixa de operação de projeto dos motores e geradores resulta em maior eficiência energética e economia de combustível e redução de emissão de poluentes.

6 PROPULSÃO COM JATO DE ÁGUA

Esse tipo de propulsão é, basicamente, uma função de diferença na massa de fluxo de água. A água entra e sai em uma unidade de jato em velocidades diferentes, a energia é convertida em pressão através de um impulsor, e o *thrust* produzido impulsiona o barco. A mudança de direção (direita e esquerda) realizada direciona o fluxo do sistema de saída em um sentido ou outro e movimento para frente e reverso é controlado através de um defletor reverso, que apenas desvia o impulso para vante ou para ré. Aproximadamente 50% do impulso para frente pode ser utilizado quando é acionado o defletor reversamente. Seus componentes principais são: bomba e bico.

A bomba é geralmente acionada por um eixo de um motor diesel ou turbina a gás, para tirar água através de um duto de admissão inclinada sob o casco do navio. Água de alta pressão da bomba é descarregada através de um bocal na popa para mover o navio. O bocal da bomba descarrega seu jato de água somente abaixo da superfície da água. A seguir iremos estudar dois propulsores de jato d'água de última tecnologia e atuais no que tange o ramo da propulsão para navios.

6.1 *Watsila midsize waterjets*

Figura 17 *Watsila midsize waterjets*

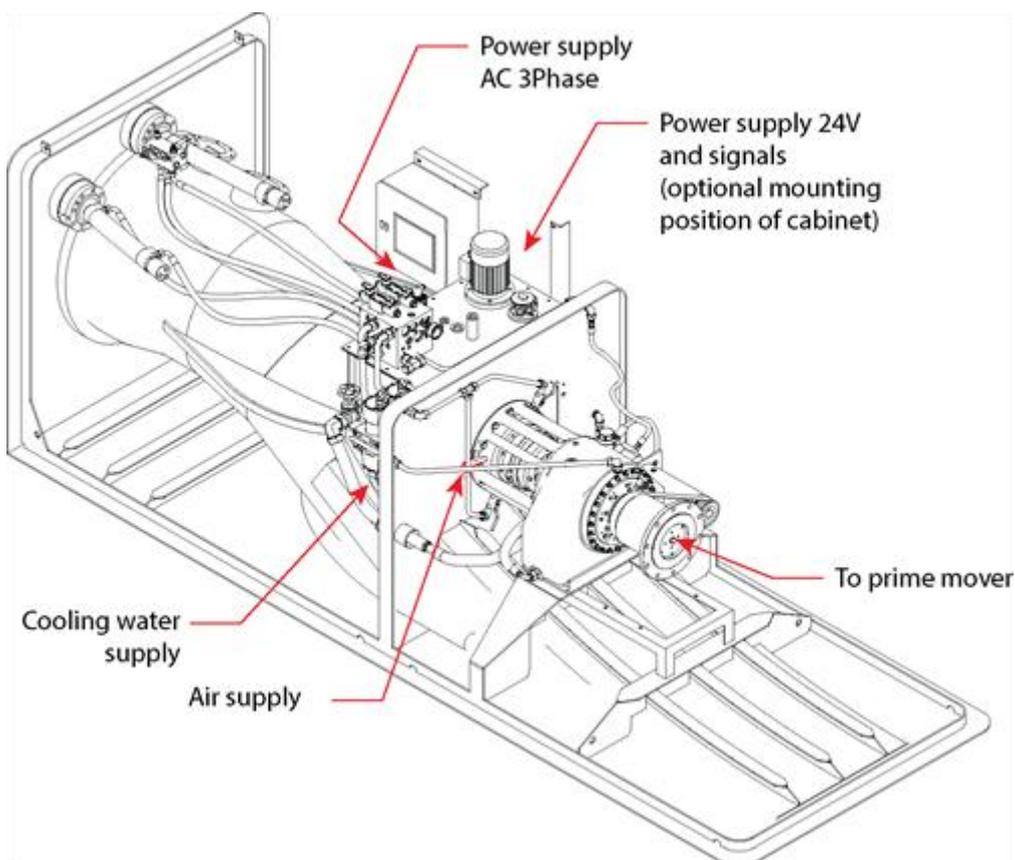


Fonte:Wartsila.com

Este propulsor é uma unidade pré-montada, isto reduz o tempo de instalação, além disso contém bomba axial compacta com excelentes características em relação à eficiência, cavitação e barulho. No que tange a soluções ambientais e conservação do equipamento, o *Wartsila Midsize Waterjet* apresenta o rolamento lubrificado por água na bacia do estator, equipamentos hidráulicos, que auxiliam na conservação do meio ambiente, componentes de aço inoxidável de alta performance para evitar o desgaste/corrosão e o bloco é montado dentro da embarcação para o aumento da vida útil e fácil manutenção. O controle dos equipamentos é integrado dentro da unidade

6.1.1 Benefícios

Figura 18 Estrutura *wartsila midsize waterjet*



Fonte:wartsila.com

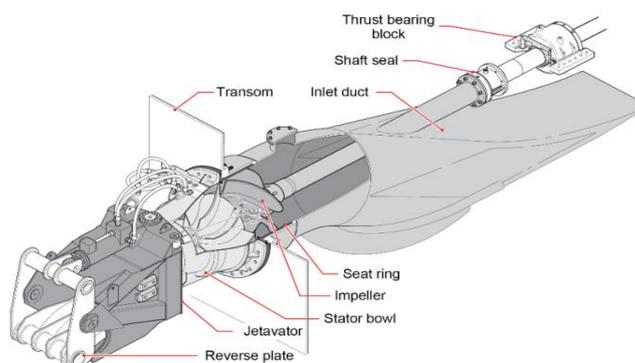
O conceito é *Plug and Play Waterjet*, com todos os sistemas auxiliares pré-instalados em um suporte. O pacote *waterjet* é soldado ao casco e com isso, o tamanho das conexões são reduzidas a um mínimo.

O uso de um rolamento lubrificado a água no estator da proa é benéfico para o meio ambiente e aumenta a confiabilidade e capacidade de manutenção do jato de água. O bloco de rolamento e todos os sistemas hidráulicos, incluindo os cilindros, estão localizados no interior do navio. A localização interior permite excelente facilidade de manutenção e permite o uso de rolamentos de maior capacidade para aumentar a vida útil. O bloco de apoio é projetado com um depósito para garantir a lubrificação dos rolamentos em todas as circunstâncias.

As margens de cavitação da bomba axial são deslocadas para trás em 35% como resultado deste aumento da margem de cavitação e a diminuição da velocidade da ponta do rotor, mais energia pode ser utilizada durante a manobra, dando assim um impulso de manobra 15% mais elevada. Graças à margem de cavitação adicional, a operação com um número reduzido de linhas de eixo é possível com uma carga mais elevada dos motores remanescentes, resultando em melhor flexibilidade operacional.

6.2 Wartsila modular waterjet

Figura 19 Estrutura Wartsila modular waterjet

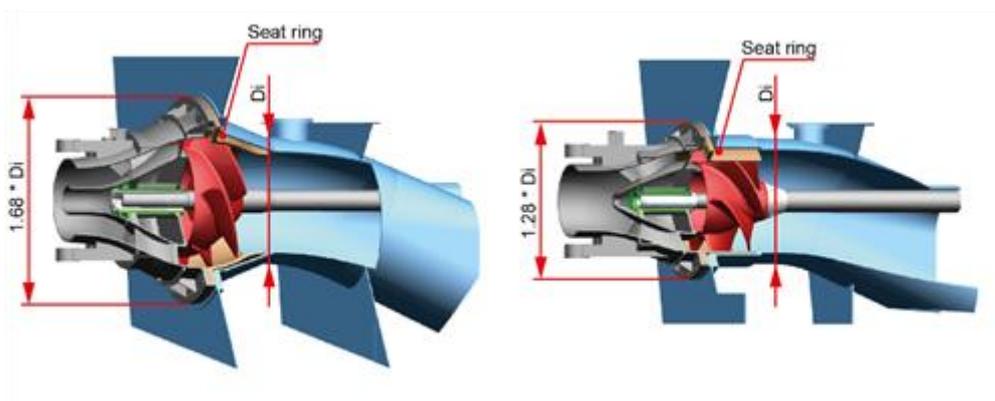


Fonte: wartsila.com

O nome modular vem do design que permite flexibilidade no escopo de fornecimento. Assim como o propulsor anterior, este também contém uma bomba axial com excelentes características em relação a eficiência, cavitação e barulho, características importantes para navios de passageiros. Seguindo a mesma lógica, os componentes de aço inoxidável de alto desempenho são para prevenir a corrosão e evitar o desgaste, aumentando a vida útil do equipamento. Quanto a soluções ambientais, o rolamento lubrificado por água na bacia do estator fornece uma boa solução. Este propulsor é feito sob medida, baseado no tamanho e perfil do navio.

6.2.1 Benefícios

Figura 20 Wartsila modular waterjet



Fonte:wartsila.com

A seguir, os benefícios que o *Wartsila Modular Waterjet* proporciona:

- a) *Wärtsilä waterjets* axiais proporcionam uma redução de espaço média de 25% onde será instalado o propulsor. Para os arquitetos navais isso cria a possibilidade de desenvolver uma potência maior para cascos estreitos, de modo a obter um desempenho superior embarcação;
- b) O tamanho dos jets é indicado pelo diâmetro frontal do anel de assento de propulsor, ao contrário de um projeto não axial;
- c) O uso de um rolamento lubrificado a água no estator da proa é benéfico para o meio ambiente e aumenta a confiabilidade e capacidade de manutenção do jato de água;

d) O bloco de rolamento e todos os sistemas hidráulicos, incluindo os cilindros, estão localizados no interior do navio. A localização interior permite excelente facilidade de manutenção e permite o uso de rolamentos de maior capacidade para aumentar a vida útil. O bloco de apoio é projetado com um depósito para garantir a lubrificação dos rolamentos em todas as circunstâncias;

e) As margens de cavitação da bomba axial são deslocadas para trás em 35%, resultando num aumento da margem de cavitação e a diminuição da velocidade da ponta do rotor, permitindo o uso de mais energia durante a manobra, tipicamente de 15% mais elevada. Graças à isso pode-se reduzir o número de linhas de eixo atuando com uma carga mais elevada dos motores remanescentes, resultando em maior flexibilidade operacional.

6.3 Aplicações

O sistema de propulsão por jato d'água é voltado para embarcações com velocidades elevadas e com necessidade de boa manobrabilidade.

As principais embarcações que utilizam esta propulsão são:

- a) Barcas rápidas;
- b) Navios de combatelitorais;
- c) Barcos de patrulha rápidos;
- d) Embarcações de salvamento;
- e) lates rápidos;
- f) Navios de abastecimento.

6.4 Vantagens numa visão geral

- a) Produz menos ruído e vibração;
- b) Excelente capacidade de acelerar, reverter, parar e pilotar;
- c) Maior eficiência;
- d) Maior velocidade com menor consumo de combustível;
- e) Sem sobrecargas no motor, diminuição de avarias e aumento do ciclo de vida.

6.5 Desvantagens numa visão geral

- a) Pode ser menos eficiente que um propulsor em baixa velocidade;
- b) Alto custo;
- c) A grade de entrada pode ficar obstruída com detritos como, por exemplo, algas, cujos efeitos podem ser mitigados através de uma caixa inversora entre o motor e o jato d'água.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram estudados neste trabalho alguns dos modernos sistemas propulsivos dos navios mercantes atuais, tomando-se parte de seus funcionamentos, componentes e aplicações. Era de suma importância o surgimento dessas tecnologias, tendo em vista da grande quantidade de poluentes que o Motor de Combustão Interna emitia e a necessidade de uma maior eficiência de propulsão. Conforme soluções tecnológicas foram sendo criadas, cada vez mais surgiam inconvenientes que inviabilizavam o seu uso. O *POD* junto com outros propulsores elétricos azimutais e o sistema híbrido foram inovações que deram certo e se tornaram excelentes respostas ao mercado consumidor, principalmente aos que utilizam o *DP (Dynamic Position)*.

Com o surgimento do Sistema de Propulsão Elétrica muitas necessidades foram supridas, como a diminuição da poluição e a economia de combustível, porém ainda se utilizava de uma fonte de energia não renovável. O planeta precisava, e ainda precisa de uma maior utilização de fontes energéticas limpas, foi então que se teve a ideia de aproveitar a força do vento para auxiliar na propulsão dos navios.

Todos esses modernos sistemas de propulsão citados no trabalho, apesar de parecerem pequenos passos, representam grandes avanços no ponto de vista ambiental. E fica a esperança de que esses sistemas possam ser desenvolvidos para que possam atingir 100% de toda a frota da marinha mercante internacional e que novos sistemas de propulsão sejam criados e que venham a somar aos já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Wartsila Solutions For Marine and Oil & Gas Markets, Wartsila2015

Propulsors and Gears-Waterjets. Disponível em:
<<http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/propulsors-gears/waterjets>>
Acesso em: 25 ago. 2015

Electric Propulsion Systems. Disponível em:
<<http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/electrical-automation/electric-propulsion-systems>> Acesso em: 22 ago. 2015

Powerful-Unlimited-Free. Disponível em:
<www.skysails.info/english/skysailsmarine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/> Acesso em: 22 ago. 2015.

GERKE, Thomas. 21st-Century Sailing: 80 Years Later-A New Beginning, E-Ship 1 -. Disponível em: <www.cleantechnica.com/2012/04/10/e-ship-1-21st-century-sailing/> Acesso em: 20 ago. 2015.

Man Diesel & Turbo. Hybrid Propulsion: Flexibility and maximum efficiency optimally combined. Disponível em: <
<http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/17642/HybridPropulsion-Brochure.pdf> > Acesso em: 15 ago. 2015.

BARCELLOS, R. O sistema híbrido de propulsão como uma alternativa viável aos sistemas diesel-elétrico e diesel-mecânico. [S.l.]: 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 2012.

Generations ABB. Parallel hybrid propulsion for AHTS. [S.l.], 2012.

ABB. Azipod gear less propulsors. Disponível em: <
<http://new.abb.com/marine/systemsand-solutions/electric-propulsion/azipod>>
Acesso em: 15 ago. 2015.

Bosch. Sistemas para navios. Disponível em: <
http://www.boschtecnologiaautomotiva.com.br/pt_br/br/powertrain_2/powertrain_systems_for_commercial_vehicles_3/diesel_systems_for_marine_applications/dieselsystemsformarineapplications.html > Acesso em: 10 ago. 2015.

DANG, J., LAHEIJ, H. Hydrodynamic Aspects of Steerable Thrusters In: Dynamic Positioning Conference 2004, Houston, Technical Conference Presentation, 2004, 33 pp.

SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V. Ship Design for Efficiency and Economy. 2 ed. Oxford: Butterworth-Heineman, 1998. 220 pp.

WOUD, H. K.; STAPERSMA, D. Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems. London: IMarEST, 2002. 494 pp.

CARLTON, J. S. Marine Propellers and Propulsion. 2. ed. Oxford: Butterworth Heineman, 2007. 533 pp.