

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

**SARA FERNANDES FIGUEIREDO DOS SANTOS**

**PROPULSÃO ELÉTRICA**

**RIO DE JANEIRO**

**2015**

**SARA FERNANDES FIGUEIREDO DOS SANTOS**

**PROPULSÃO ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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: MSC. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto**

**RIO DE JANEIRO**

**2015**

**SARA FERNANDES FIGUEIREDO DOS SANTOS**

**PROPULSÃO ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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:** MSC. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

---

**Assinatura do Orientador**

**NOTA FINAL:** \_\_\_\_\_

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que me deu todo o conhecimento e por estar aqui dentro, sem ele as coisas são mais difíceis, e os meus agradecimentos vão aos meus pais que se esforçaram para me dar o melhor que puderam me dar e com certeza a boa educação e estudo sem os quais não estaria fazendo este trabalho e principalmente ao meu orientador, nosso querido Mestre Paulo Pinto pelo esforço de ter me orientado a fazer este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu querido Mestre Paulo Pinto por ter me ajudado a fazer este trabalho, e aos amigos por terem me ajudado com as mínimas coisas na realização desse trabalho e principalmente a Deus.

“Se a sua coragem lhe faltar vá além da sua coragem”

Frase do livro e filme “livre” (wild)

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo falar sobre a Propulsão Elétrica e o seu desenvolvimento durante os anos, desde a sua primeira aplicação até os novos experimentos para tornar essa forma de propulsão cada vez mais eficiente.

Diante da demanda no atual cenário marítimo mundial, foi necessário investimento na inovação dos sistemas de propulsão das embarcações visando melhorias. A solução inclui os propulsores com motores elétricos com rotação variável através de inversores de frequência, substituindo o sistema mecânico de mudança de ângulo das pás da hélice.

Por fim, serão esclarecidas as modalidades de propulsão elétrica (Corrente Contínua e Corrente Alternada), principalmente o surgimento da revolucionária tecnologia AZIPOD, a propulsão nuclear, propulsão de motor elétrico e imã permanente até navio movido a energia solar.

**Palavras chaves:** propulsão elétrica, inversores de frequência, propulsão nuclear, tecnologia azipod, energia solar.

## **ABSTRACT**

This paper aims to talk about Electric Propulsion and its development over the years, since its application until the new experiments to make this form of propulsion increasingly efficient.

Given the demand in today's maritime world, it was necessary investment in innovation propulsion systems for vessels aiming improvements. The solution includes the engines with electric motors with variable speed by frequency inverters, replacing the mechanical system of change of angle of the propeller blades.

Finally, the procedures will be clarified electric propulsion (Direct Current and Alternating Current), especially the emergence of revolutionary AZIPOD, the nuclear propulsion, electric propulsion motor and permanent magnet until the solar energy propelled ship.

**Key word:** electric propulsion, frequency inverters, nuclear propulsion, revolutionary azipod and solar energy.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 Uss Jupiter da Marinha Americana
- Figura 2 Uss Langley da Marinha Americana
- Figura 3 New México da Marinha Americana
- Figura 4 Submarino americano na primeira guerra mundial
- Figura 5 Submarino com propulsão elétrica
- Figura 6 Gerador de corrente contínua elementar
- Figura 7 Diagrama de um sistema de propulsão elétrica
- Figura 8 Antigo destroyer Uss Dufilho da Marinha Americana
- Figura 9 Coletor danificado
- Figura 10 Processo de desgaste das escovas por atrito e centelhamento
- Figura 11 Consumo de combustível
- Figura 12 Redução de espaço no navio
- Figura 13 Emissões de Gases na Atmosfera.
- Figura 14 O ganho de potência no navio
- Figura 15 Sistema de propulsão azipod no navio
- Figura 16 Navio com o sistema de propulsão nuclear
- Figura 17 Prototipo de um motor magnético
- Figura 18 Polaridade do motor magnético entre os estatores e o rotores
- Figura 19 - O MS Turanor PlanetSolar navegando
- Figura 20- MS Turanor na construção



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>O COMEÇO DE TUDO</b>	<b>13</b>
2.1	Contribuição para a guerra	15
<b>3</b>	<b>A COMPARAÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA COM A MECÂNICA</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>PROPULSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA</b>	<b>20</b>
4.1	Manutenção das escovas	22
4.2	Vantagens e desvantagens da propulsão elétrica em corrente contínua	23
<b>5</b>	<b>PROPULSÃO ELÉTRICA EM CORRENTE ALTERNADA</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>AS PRINCIPAIS VANTAGENS DA CORRENTE ELÉTRICA</b>	<b>26</b>
6.1	Redução do consumo de combustível	26
6.2	Redução da tripulação	27
6.3	Flexibilidade do projeto	27
6.4	Aumento da capacidade de sobrevivência no navio	28
6.5	Aumento da vida útil do navio	28
6.6	Redução dos custos de manutenção	29
6.7	Redução da emissão de poluentes	29
6.8	Redução da assinatura acústica	31
<b>7</b>	<b>MODERNOS SISTEMAS DE PROPULSÃO</b>	<b>33</b>

<b>7.1 Azipod</b>	<b>33</b>
<b>7.2 Propulsão com instalação nuclear</b>	<b>35</b>
<b>7.3 Propulsão de motor elétrico e imã permanente</b>	<b>38</b>
<b>7.4 Navio a energia solar</b>	<b>39</b>
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sabemos que ao passar dos anos a ciência vai desenvolvendo novas tecnologias pra melhorar o desempenho dos objetos e a qualidade de vida do ser humano, é o que acontece também com a forma de propulsão que vem evoluindo pra buscar cada vez mais eficiência, espaço nos navios, qualidade de vida maior para a tripulação e a poluir cada vez menos o meio ambiente em que vivemos.

Com isso foi inventado a Propulsão Elétrica que tem um pouco mais de 100 anos, inventada para ajudar na guerra com o objetivo de ocultar os submarinos dos seus potenciais inimigos e a medida que o tempo passa esse tipo de propulsão vai ganhando mais fontes de energia, como a instalação nuclear, e também aperfeiçoamento no propulsor, o motor elétrico de indução e até de imã permanente.

## 2 O COMEÇO DE TUDO

No ano de 1903, ocorreu a primeira aplicação com propulsão elétrica no navio russo Vandal, a embarcação utilizava geradores de corrente contínua com 87 KW e 500 V conectados eletricamente aos motores elétricos de propulsão. Cada motor consumia 75 KW para girar seu eixo, tinha velocidade de 250 RPM e alcançava até 8 nós. O sistema era composto por três pares de geradores CC – motor elétrico. Esse sistema chamado diesel-elétrico foi criticado por perder cerca de 20% de energia, por outro lado levava 8 a 10 segundos para mudar da velocidade, o que era impressionante pra época.

Nos navios da marinha americana também foram instalados motores elétricos, sendo um experimento o USS Júpiter, com 4,1 MW de potência no eixo. O sistema consistia em dois motores de corrente alternada com rotor bobinado e um turbo gerador para alimentá-los. A experiência fez tanto sucesso que fez com que fosse convertido em navio-aeródromo, rebatizado de USS Langley e assim impulsionando a construção de mais 50 embarcações com o mesmo sistema de propulsão.

Figura 1 – Uss Jupiter da Marinha Americana



Fonte: ibiblio.org

Figura 2 – Uss Langley da Marinha Americana



Fonte: navsource.org

O sucesso obtido na utilização da propulsão elétrica e a percepção dos seus benefícios estimularam o grande esforço empregado para a construção de 50 navios com este tipo de propulsão, durante o período entre a Primeira e a Segunda Guerras Mundiais. Entre estes navios estava o USS “New Mexico” com 30 MW de potência instalada, o segundo e o terceiro navios- aeródromo da Marinha Americana, USS “Lexington” e USS “Saratoga”, com potência instalada de 135 MW.

Figura 3 – New México da Marinha Americana



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004.

## 2.1 Contribuição para a guerra

No Cenário bélico naval foi onde ocorreu a grande expansão dos sistemas elétricos de propulsão, com o advento dos submarinos. Pois em época de guerra era preciso estar oculto ao “inimigo” para que não fosse notada a aproximação, ou seja, era preciso navegar submerso para não estar no campo visual do adversário. Contudo, deparou-se com um problema para propelir esses artefatos, porque não havia oxigênio de quantidade suficiente para fornecer às máquinas e à tripulação. Só poderiam acionar esses equipamentos com o uso do SNORQUEL (se o submarino estivesse a poucos metros da superfície).

Figura 4 – Submarino americano na primeira guerra mundial

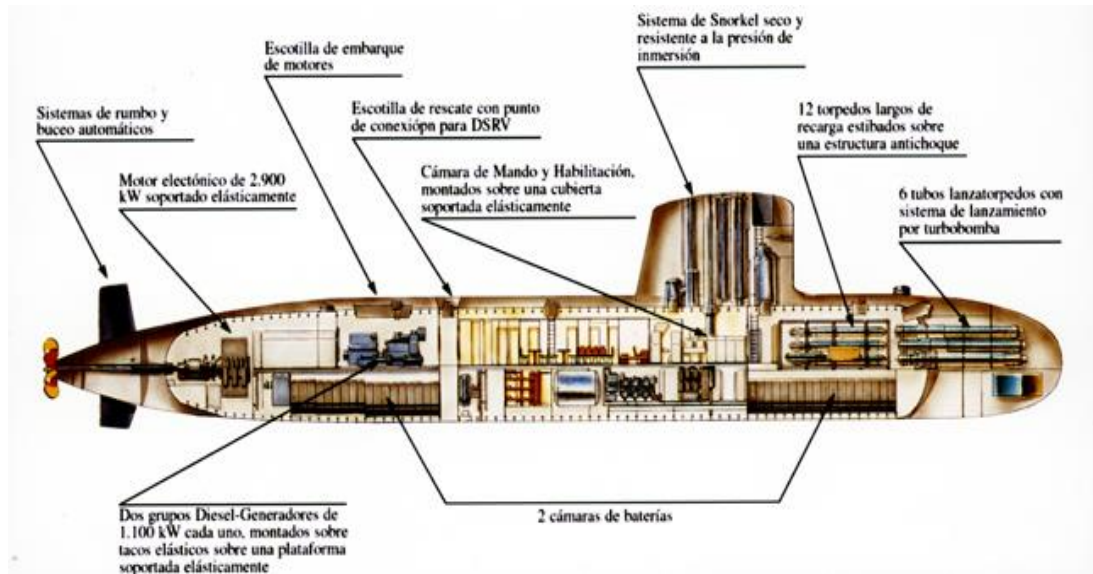


Fonte: [naval.com.br](http://naval.com.br)

Então, o uso de do motor elétrico de propulsão (MEP) tornou-se inevitável mediante as condições de operação e principalmente durante a guerra. A desvantagem seria o espaço excessivo do submarino ocupado pelos exorbitantes grupos de baterias. Ainda hoje esse tipo de propulsão é utilizado em submarinos, devido principalmente ao baixo nível de ruído emitido, o que dificulta sua localização pelo sonar.



Figura 5 – Submarino com propulsão elétrica



Fonte: [naval.com.br](http://naval.com.br)

Devido ao sucesso desse sistema de propulsão, durante a Segunda Guerra Mundial, mais de 160 navios de escolta dotados de propulsão elétrica foram construídos para a Marinha Americana, utilizando turbo ou diesel geradores na faixa de 4,5 a 9,0 MW. Aproximadamente 500 navios de pequeno porte foram também equipados com sistemas de propulsão elétrica em corrente contínua com potência instalada na faixa de 225 kW a 15 MW. Um dos motivos que também contribuíram para o significativo aumento do número de navios com propulsão elétrica durante o período da guerra foi a falta de capacitação técnica para a produção em larga escala de engrenagens. Entretanto, por volta da década de 40, os desenvolvimentos na tecnologia dos sistemas de engrenagens de dupla redução, para aplicações no setor naval e militar, passaram a apresentar preços competitivos nos Estados Unidos. Aliado a este fator e também a algumas desvantagens da propulsão elétrica existentes naquela época, como maior peso, maior volume e menor eficiência energética, levou a drástica redução do uso da propulsão elétrica em larga escala, em detrimento da propulsão mecânica convencional. A mudança da preferência do tipo de propulsão empregada também foi influenciada pelas melhorias tecnológicas obtidas no setor de metalurgia e na manufatura de engrenagens reductoras com peso e volume menores e melhores resultados no desempenho acústico dos equipamentos.

Este panorama da situação persistiu até o início do século XXI, quando a capacidade de transmissão mecânica de energia atingiu seu limite tecnológico e de viabilidade econômica. Durante as décadas de 1980 a 90, os avanços tecnológicos, na área de Eletrônica de Potência, tornaram a transmissão elétrica de energia mais eficiente e compacta, e desta forma, possibilitou o retorno do emprego da propulsão elétrica em diversas classes de navios, como quebra-gelos, oceanográficos, tanque e numerosos transatlânticos. Atualmente, as pesquisas para a definição das melhores alternativas de tecnologia envolvendo propulsão elétrica estão em plena evolução. As pesquisas relativas aos motores de propulsão, para aplicação naval e militar, apresentam os seguintes requisitos essenciais: formato compacto, peso e volume reduzido, elevadas faixas de potência gerada para valores específicos de torque, resistência ao choque, e baixos valores de assinatura acústica e eletromagnética. Dependendo de sua montagem, essa propulsão consegue até incorporar as funções de leme, retirando a máquina do leme de cena e o próprio leme.

### 3 A COMPARAÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA COM A MECÂNICA

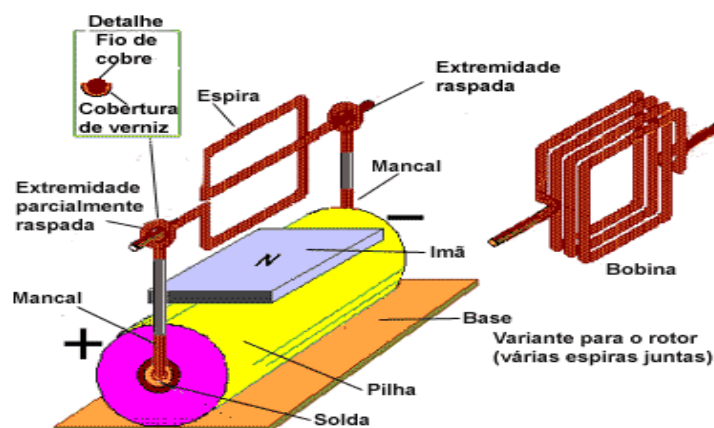
Nos navios que utilizam o Sistema de Propulsão Mecânica tradicional, a rotação do hélice é definida pela rotação do motor diesel, portanto, o motor em algumas condições de operação não opera na melhor faixa de rendimento, gerando desta forma um desperdício inevitável de combustível e aumento da emissão de poluentes.

No sistema de propulsão mecânico convencional o dispositivo de acionamento principal a ser empregado, que pode ser uma turbina a vapor, um motor diesel, ou uma turbina a gás, é acoplado diretamente ao eixo propulsor do navio através da engrenagem redutora. Neste tipo de configuração do sistema de propulsão é necessário um diesel gerador auxiliar, chamado MCA, instalado em local separado do sistema de propulsão, que fornecerá a potência elétrica para o atendimento dos sistemas auxiliares de bordo.

A Propulsão Elétrica pode ser descrita de forma mais precisa como a transmissão elétrica de potência entre o dispositivo de alimentação principal e a carga representada pelos propulsores do navio. Este sistema de propulsão consiste essencialmente na transmissão elétrica para a mudança entre a relativamente alta velocidade e baixo torque do dispositivo de acionamento principal para a baixa velocidade e elevado torque requerido para girar os propulsores.

No sistema de Propulsão Elétrica a eficiência da transmissão não é tão sensível à variação da velocidade do eixo propulsor, como ocorre com a transmissão mecânica convencional, e nos períodos em que a embarcação opera com velocidade mais baixa a eficiência da transmissão elétrica é maior do que a da transmissão mecânica.

Figura 6 – Gerador de corrente contínua elementar

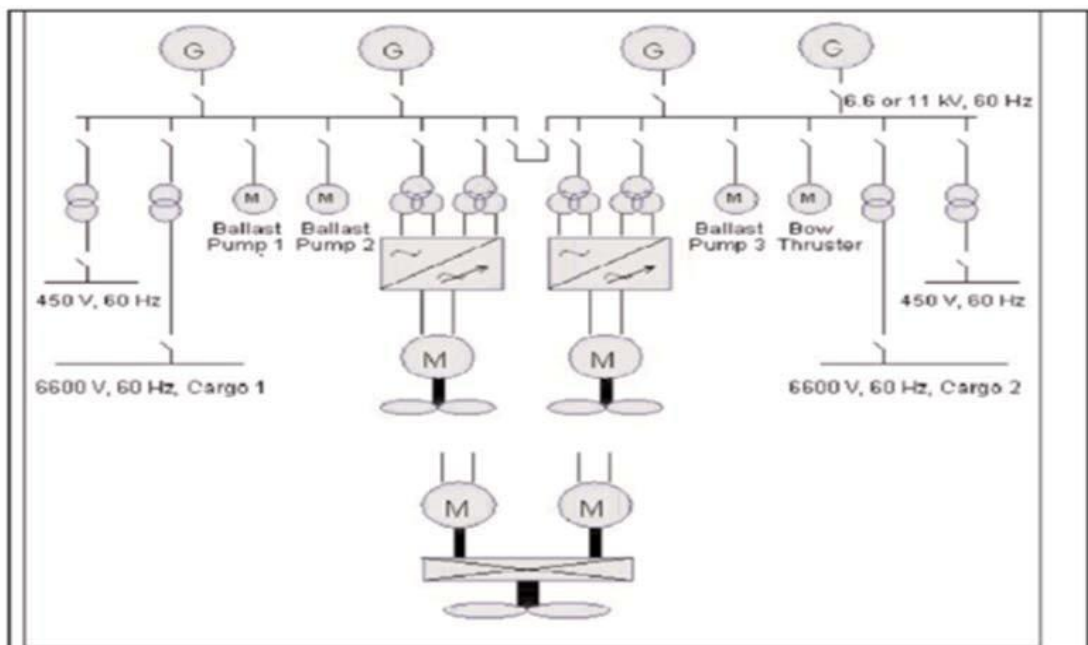


Fonte: megarquivo.com

Existem quatro aspectos de maior relevância na escolha do arranjo da propulsão elétrica a ser empregado:

- tipo de potência elétrica disponível entre o gerador e o motor elétrico (CA ou CC);
- o método de controle da velocidade (variação da tensão CC e/ou a variação da frequência e da tensão para aplicações em CA);
- o tipo do equipamento de acionamento principal;
- o método de controle do propulsor.

Figura 7 – Diagrama de um sistema de propulsão elétrica



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004

#### 4 PROPULSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

Durante a segunda guerra mundial alguns rebocadores de alto mar foram produzidos com propulsão elétrica em corrente contínua (CC), com instalação muito similar á empregada nos antigos destroyers de escolta e nos submarinos.

Figura 8 – Antigo destroyer Uss Dufilho da Marinha Americana



Fonte: en.wikipedia.org

Os rebocadores de alto mar existentes na metade do século XX eram, na sua maioria, destinados ao socorro e salvamento e são antepassados das atuais escola de aprendiz de marinheiros. Alguns deles, inclusive os antigos Rebocadores de Alto Mar da MB, tinham propulsão em corrente contínua e uma instalação muito semelhante a dos submarinos convencionais. Os submarinos convencionais modernos, os antigos Rebocadores de Alto mar e os velhos Destroyers de Escolta têm uma planta bastante semelhante, com a diferença que os Rebocadores de Alto Mar e os Destroyers de Escolta não têm baterias e os submarinos modernos têm um número maior de baterias.

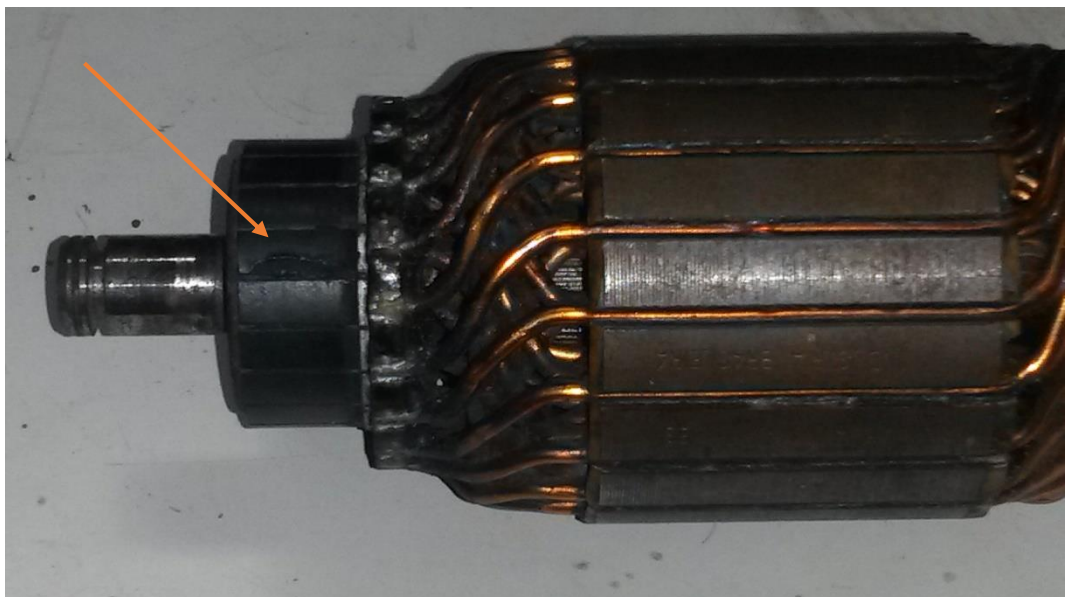
A antiga planta de propulsão elétrica em corrente contínua, ainda usada em algumas dragas, é constituída com quatro geradores elétricos da propulsão e mais quatro motores elétricos da propulsão, sendo dois por eixo, mecanicamente

conectados ao eixo propulsor entre o mancal de escora e o hélice. Os controles são muitos para permitir a flexibilidade de manobra. Vários desses controles consistiam de chaves manuais e reostatos, todos com dissipação de calor muito grande. A aceleração do eixo propulsor era obtida aumentando a corrente de excitação no campo dos motor elétrico da propulsão pela redução de resistência no seu reostato de campo e ainda pelos reguladores de velocidade dos motores de combustão.

As baterias dos submarinos são “amarradas” em série ou paralelo conforme a ordem de máquinas, para proporcionar mais velocidade ou maior duração da sua carga, sempre buscando a menor corrente de descarga possível. Mesmo nos submarinos convencionais modernos a carga das baterias pode durar apenas uma fração de hora se a embarcação usar a máxima velocidade, ou seja, maior corrente elétrica.

Um motor de CC possui escovas e comutador (ou coletor), sendo comum em grandes motores a existência de interpolos para aumentar a vida útil dessas peças. A limpeza do coletor é feito com materiais não abrasivos e não condutores. A limpeza do isolante no espaço entre as teclas deve ser feita com cuidado para não destruir o material que isola uma tecla da outra. Em alguns casos é feita uma deposição de liga de níquel recobrindo as teclas.

Figura 9 – Coletor danificado

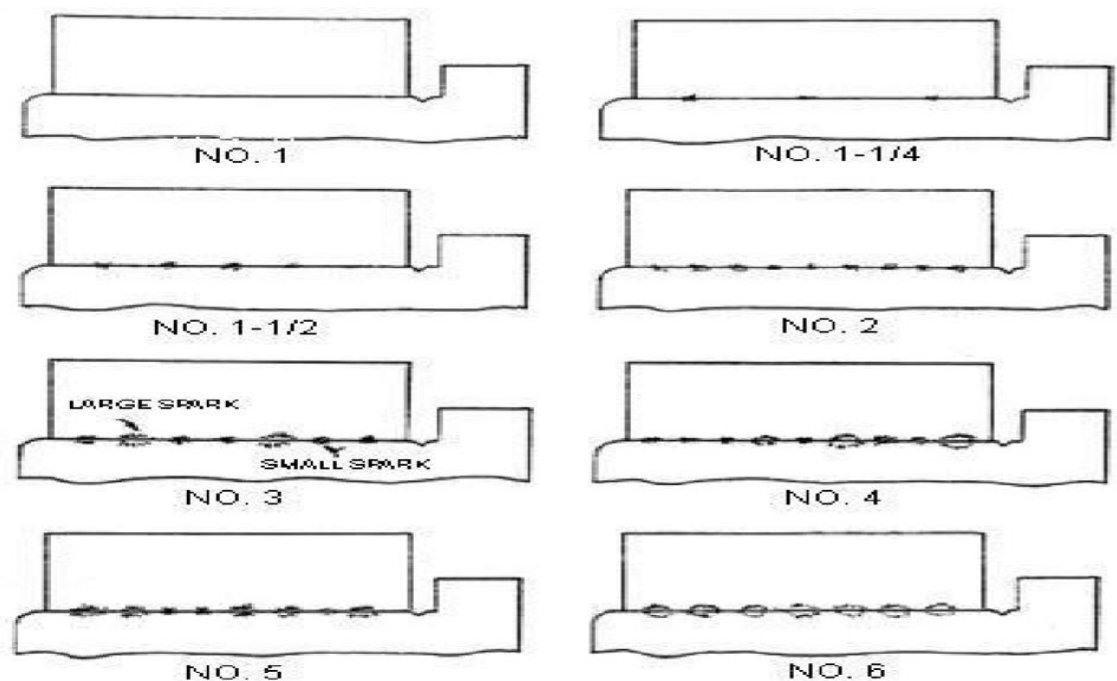


Fonte: ARQUIVO PESSOAL

#### 4.1 Manutenção das escovas

Dependendo da quantidade que foi gasta, as escovas podem ser tratadas ou não. Pode ser suficiente regularizar a superfície da escova, se ainda restar uma extensão de escova bastante para que a mola tenha tensão suficiente para manter a escova de encontro ao coletor. Essa tensão da mola só poderá ser verificada pela prática ou pelo uso de um aparelho medidor de tensão de mola. Uma verificação simples e prática do serviço de ajuste executado nas escovas e depois girar o motor manual e lentamente, as vezes usando um papel no encontro dos dois. O carvão deixará no papel branco o perfil da sua superfície de contato com o coletor como um lápis sobre o papel. Alguns motores não permitem ajustagens na posição da escova, pois o ajuste angular ou calagem das escovas tem procedimentos minuciosos e relativamente complexos.

Figura 10 – Processo de desgaste das escovas por atrito e centelhamento



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004

Os antigos geradores elétrico de propulsores e motores elétricos principais da propulsão elétrica em corrente contínua não podiam ser enclausurados como os modernos motores da corrente alternada do tipo gaiola de esquilo. O calor gerado pela

comutação escovas – coletor, mais o calor dos campos da máquina, precisavam ser dissipados, o que normalmente é feito por uma ventoinha, do mesmo modo que na furadeira manual. A circulação de ar introduz nos campos da máquina o pó produzido pelo atrito da escova de encontro ao coletor e até mesmo pequenos pedaços das escovas. Desse modo, além da umidade e poeira da praça de máquinas, tanto o motor elétrico principal como o gerador elétrico de propulsão em corrente contínua recebem uma grande quantidade de partículas de carbono e, ocasionalmente, algum corpo estranho. Por isso, essas máquinas são muito mais vulneráveis às baixas resistências de isolamento nos seus campos.

#### **4.2 Vantagens e desvantagens da propulsão elétrica em corrente contínua**

Apesar de todos os problemas, a propulsão elétrica em corrente contínua era adotada porque se constituía em uma solução para as missões das embarcações de superfície que a empregavam, especialmente na questão de manobrabilidade. No caso dos antigos rebocadores de alto mar a variação suave da velocidade, especialmente na partida, é fundamental nos serviços de reboque, de modo similar a partida de um trem ou uma composição do metrô lotado de passageiros.

Os rebocadores com propulsão elétrica em corrente contínua têm os motores diesel sempre operando, acionando os geradores elétricos de propulsão, mesmo com o navio atracado ou fundeado. O acionamento das hélices propulsoras pelos motores elétricos propulsores pode ser feito lentamente, a partir do zero, ajustando o deslocamento do rebocador conforme as necessidades deste, para evitar choques bruscos no cabo ou no dispositivo de reboque, para não rompê-lo. Cerca de 50 anos atrás esse era quase que o único imperativo que exigia a propulsão elétrica nas embarcações de superfície, ou seja, a sua principal vantagem é melhorar a capacidade de manobra pela variação da RPM, resultando em trabalhos de socorro mais seguro, por outro lado, a manutenção exigida é cara, frequente e complexa devido ao problema da comutação elétrica entre as escovas e coletor.



## 5 PROPULSÃO ELÉTRICA EM CORRENTE ALTERNADA

A partir da década de 1970 o mercado para embarcações de apoio começou a crescer. Era preciso manobrar navios cada vez mais maiores nas águas restritas de um porto ou terminal, usando embarcações de apoio portuário. A partir das crises do petróleo e do fechamento do Canal de Suez surgiram os gigantescos navios tanques transportando petróleo do oriente médio para portos europeus e japoneses. A manobra desses grandes navios requeria embarcações melhores.

O eixo longo entre a hélice e o MCP foi eliminado, essa foi a outra solução projetada na década de 70, e em seu lugar foi usada a propulsão elétrica. Nela os MCP, quatro ou seis, acionam igual número de geradores elétricos propulsores. Os geradores são ligados a uns quadros elétricos principais e deles sai a energia para os utilizadores do navio e também para o quadro de manobra (controle) dos motores elétricos da propulsão. Desse quadro até os motores elétricos da propulsão o navio tem cabos elétricos no lugar dos eixos extensos, e esses motores ficam dentro do casco do navio, ficam posicionados nas proximidades do propulsor reduzindo a extensão do eixo entre o acionador e a hélice, mas ainda têm um eixo curto na popa.

No caso da embarcação com propulsão elétrica o barramento do quadro elétrico principal é obrigado pela Convenção SOLAS a ter uma chave seccionadora. Essa chave pode ser encontrada normalmente aberta (NO) ou normalmente fechada (NC). Os planos dos quadros e os balanços elétricos das instalações devem indicar qual a posição normal das seccionadoras, se NO ou NC. Podem existir várias chaves seccionadoras nos quadros em vez de apenas uma, em função da corrente de carga. Embora não existam normas detalhadas na Convenção SOLAS estabelecendo como deve ser a automação em todos os navios, é comum a automação do quadro elétrico principal supervisionar a situação da carga elétrica do navio. Nesse caso, ao aumentar a demanda de energia devido á aceleração do navio, a automação “chama” outro gerador. Ou seja, a automação aciona o motor diesel do MCA programado, verifica a geração do gerador elétrico propulsor inclusive a excitação, fecha o disjuntor e distribui a carga, para em seguida, liberar o aumento da velocidade do navio para aceleração da rotação do motor elétrico da propulsão. Nas embarcações dessa espécie os motores elétricos da propulsão são motores de indução em corrente alternada, a variação de velocidade é feita através de vários artifícios que, isoladamente ou

combinados vão atender às necessidades do navio. Conforme o navio e a época da construção, esses artifícios variam desde mudança na amarração de campos múltiplos, até o emprego de circuitos eletrônicos e uma combinação desses métodos. Além disso é comum encontrar hélices de passo controlado (HPC) nas instalações descritas, o que diminui a necessidade de grande variação na carga do motor elétrico da propulsão. A variação de passo ainda permite a reversão sem precisar parar o motor elétrico da propulsão e inverter o sentido da sua rotação, como é preciso fazer nos motores elétricos menores, por exemplo, nos guinchos de atracação e molinetes de ferro.

A corrente alternada tem um efeito indesejável, especialmente durante as variações de carga elétrica, que são os harmônicos de frequência, dentre outros problemas. Do ponto de vista do consumo de energia, os harmônicos não trazem maiores problemas, mas, no caso dos sinais ou informações empregadas pela automação, os harmônicos são prejudiciais. Eles induzem sinais falsos nos sensores da automação, e esses por sua vez provocam reações incorretas da automação, do que resulta a instabilidade dos geradores elétrico propulsores em paralelo no barramento, podendo desliga-los do barramento através das proteções automáticas ou gerar picos indesejáveis de tensão que podem queimar os dispositivos eletrônicos dos sistemas de bordo. Na propulsão elétrica a maior variação ocorre, principalmente, nas variações de velocidade e sentido de rotação das máquinas durante as manobras do navio. É então que a instabilidade no paralelo dos geradores elétricos pode desligar toda a geração de energia do navio, justamente no momento da manobra, seja junto ao cais, seja pairando nas proximidades de uma plataforma. Em nenhuma dessas ocasiões isso é desejável. Para eliminar as indesejáveis frequências harmônicas, utilizamos do mesmo modo que os filtros de antenas de comunicações, filtros no quadro elétrico principal sintonizados em frequências múltiplas de 60 Hz, para deixar passar apenas o valor puro. Essa filtragem é feita com circuitos "LC", os quais jogam para "terra" ou equivalente as frequências harmônicas. Se os geradores elétricos propulsores do navio têm problemas para permanecer em paralelo no barramento do quadro elétrico principal, o filtro ou filtros de frequências harmônicas são um item a ser verificado pelo maquinista.

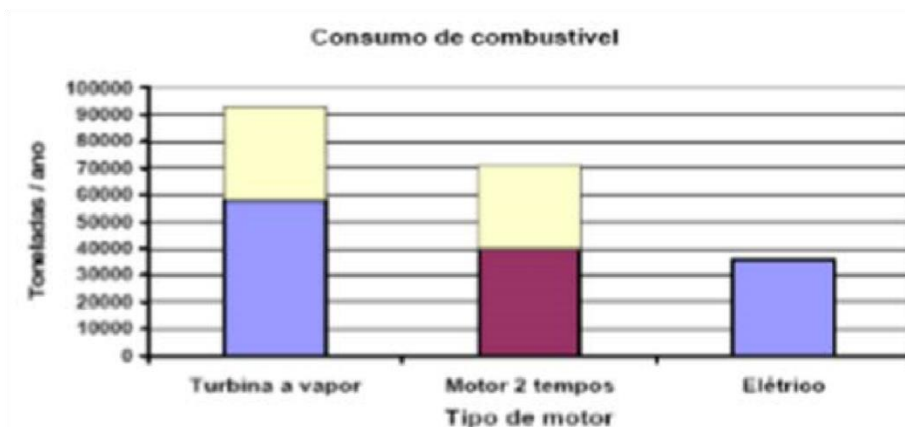
## 6 AS PRINCIPAIS VANTAGENS DA PROPULSÃO ELÉTRICA

### 6.1 Redução do Consumo de Combustível

Em navios com propulsão mecânica tradicional, a velocidade do motor é que define a rotação do hélice; conseqüentemente, dependendo do perfil de operação do navio, o motor pode não operar na faixa de rendimento ótimo, associado às altas velocidades. Isto significa desperdício de combustível e excessivo desgaste mecânico. Com o uso da propulsão elétrica, este problema é eliminado, e o motor primário pode operar no ponto de melhor rendimento independente da velocidade de rotação do hélice, já que inexistente a conexão mecânica entre motor de combustão primário e o eixo propulsor e não há mais relação direta entre a velocidade do eixo do motor primário e a rotação do hélice. Segundo o documento da referência [9], a Marinha Americana estimou a eficiência energética em aproximadamente 17% melhor que em relação à propulsão convencional mecânica.

De acordo com a linha de pesquisa apresentada [8], que comparou três tipos de instalações propulsoras diferentes, para um mesmo navio gaseiro, durante um ano de operação, a Propulsão Elétrica foi a que apresentou os melhores resultados e as maiores vantagens em relação ao consumo de combustível.

Figura 11: Consumo de combustível



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004

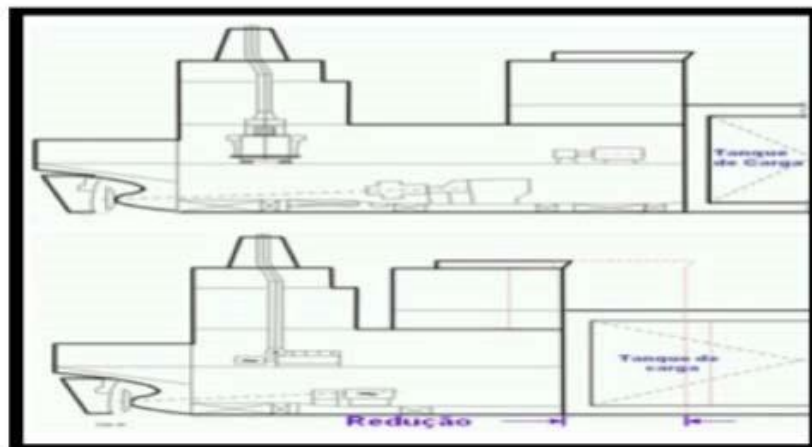
## 6.2 Redução da Tripulação

A tendência para os futuros navios elétricos é de uma ampla difusão de sistemas auxiliares e acessórios alimentados por eletricidade, em substituição aos sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos. Sistemas elétricos são mais fáceis de controlar à distância e possuem maior compatibilidade com controles eletrônicos, como é visto nos sistemas DP (*dynamic position*). Esta tendência possibilita o incremento de automação com conseqüente redução de tripulação, proporcionando adicional benefício ao armador através da redução de custo operacional.

## 6.3 Flexibilidade do Projeto

Os equipamentos da propulsão elétrica são modulares e não precisam ser posicionados próximos uns aos outros (podem inclusive ser instalados em compartimentos diferentes). Dependendo do tamanho das máquinas, elas podem ser instaladas nas partes mais altas do casco, deixando apenas o motor elétrico junto ao fundo do casco conectado ao propulsor.

Figura 12 – Redução de espaço no navio



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004

Observa-se na Fig. 12 um ganho no espaço reaproveitado no transporte de cargas reposicionando a máquina diesel no convés superior, e desta forma, reduz-se

o volume ocupado pelos dutos de admissão e exaustão dos motores. Como resultado desta flexibilização, torna-se desnecessário concentrar equipamentos em praças de máquinas principais; sendo possível espalhar os compartimentos de máquinas pelo navio, em áreas menos críticas, com um aproveitamento otimizado do espaço disponível a bordo.

No navio com propulsão elétrica não são necessários motores auxiliares. Toda energia demandada pelo navio será gerada pelos motores principais. Esta diminuição na quantidade de motores também provoca redução de custos e economia de espaço, além da modularidade do sistema permitir que em altas velocidades sejam utilizados todos os dispositivos de acionamento principal e, nas velocidades econômicas sejam desligados os que não forem necessários.

#### **6.4 Aumento da Capacidade de Sobrevivência do Navio**

A modularidade e a flexibilidade proporcionam um sistema de geração de energia e de propulsão redundantes, distribuídos e reconfiguráveis, o que aumenta a resiliência aos danos em um compartimento de máquinas, seja provocado por incêndio, alagamento ou simples mau funcionamento, sendo facilmente detectados e “by-passados”, mantendo-se o funcionamento do sistema inalterado, possibilitando uma elevada gama de possibilidades de ações para minimizar os efeitos decorrentes de múltiplas falhas simultâneas.

#### **6.5 Aumento da Vida Útil do Navio**

Os navios militares modernos incorporam cada vez mais sensores e armas de alta complexidade tecnológica, que os tornam muito mais potentes do que os navios de gerações anteriores. Já os investimentos necessários para a aquisição destes meios têm crescido numa progressão ainda maior, tornando difícil justificar este gasto considerando o tempo de vida útil dos navios tradicionais. Com o evento da automação dos sistemas de armas, nas décadas de 1980 e 90, mais equipamentos elétricos e eletrônicos estão sendo incorporados aos navios, aumentando a demanda por energia elétrica. Isto vem fazendo com que os geradores instalados a bordo sejam de potência mais elevada, a fim de suprir a demanda já instalada e manter uma

reserva para crescimento futuro. A futura adoção das armas elétricas, que estão atualmente em pleno desenvolvimento, tende a agravar ao extremo esta situação. Com a propulsão elétrica temos mais opções, pois os geradores de bordo alimentam simultaneamente a propulsão, os sistemas auxiliares e os sistemas de armas, através de um sistema de distribuição redundante e reconfigurável. Os motores são dimensionados para atender ao navio em velocidade máxima, com todos os sistemas vitais em operação, e em velocidade normal, o navio possui capacidade de geração em excesso, capaz de atender todos os usuários com folga, assimilando sem dificuldades as substituições ou inclusões futuras de novos equipamentos ou sistemas.

Os navios projetados com propulsão elétrica podem ter vida útil maior, da ordem de 50 anos, limitada pelos materiais utilizados na estrutura da embarcação, contra 25 ou 40 anos dos navios com propulsões tradicionais.

## **6.6 Redução dos Custos de Manutenção**

A viabilidade da existência de uma tecnologia comum dentre as diversas plataformas navais (ex: navios de superfície e submarinos), com a adoção da Propulsão Elétrica, possibilitará a coordenação do desenvolvimento e aplicação de modelos comuns, ferramentas de projetos, métodos de fabricação, novos materiais, componentes, sistemas, contribuindo para significativas reduções no risco do projeto e maximizando os custos e a logística.

Uma vez que com a adoção da Propulsão Elétrica não são necessários motores auxiliares, esta redução na quantidade de equipamentos instalados resulta numa diminuição dos custos e tempo de manutenção, e devido à elevada automação dos sistemas elétricos, as manutenções preditiva e preventiva são ferramentas eficazes para a redução dos custos totais de manutenção.

## **6.7 Redução da Emissão de Poluentes**

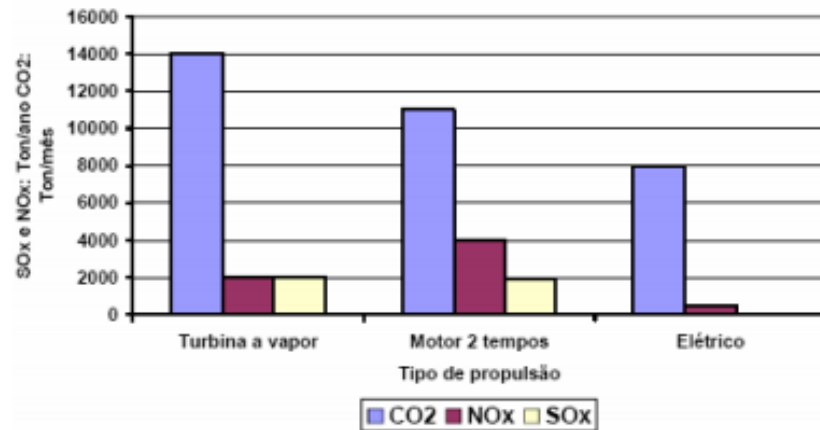
Atualmente todas as Marinhas do mundo são pressionadas pelos órgãos ambientais para que as mesmas em seus projetos de futuros navios, e também em relação aqueles já em funcionamento, apresentem uma redução na quantidade de

poluentes emitidos durante a realização das operações militares. Todos os tipos de poluentes emitidos (gasosos, líquidos ou sólidos) estão sendo cada vez mais monitorados e as legislações (ex: MARPOL) estão sendo elaboradas com requisitos mais rigorosos. As emissões de gases poluentes oriundas da queima de óleo diesel e gasolina são grandes responsáveis pelo efeito estufa e em decorrência das pressões internacionais busca-se utilizar cada vez menos combustíveis fósseis. Neste contexto, a propulsão elétrica está sendo fortemente indicada, principalmente para navios que operam em países que assinaram o Protocolo de Kyoto, apresentando vantagens em relação à propulsão mecânica, tais como:

- Redução das emissões de gases poluentes oriundos da queima do óleo diesel;
- Menor utilização de insumos que podem gerar resíduos poluidores; e
- Menor emissão de ruídos durante as viagens.

A Propulsão Elétrica gera menos gases poluentes que os sistemas convencionais (que operam somente com turbinas a vapor ou motores diesel), pois o motor diesel opera constantemente no ponto ótimo de projeto, o que proporciona um rendimento maior e conseqüentemente uma menor liberação de gases poluentes (ex: CO<sub>2</sub> - Dióxido Carbônico, NO<sub>x</sub> – Óxido de Nitrogênio e SO<sub>x</sub> – Óxido de Enxofre) durante as operações. É interessante destacar que o modelo utilizado na pesquisa abaixo considerou também a geração de gases durante a operação portuária e tempos com o navio parado durante as viagens. No futuro não somente os poluentes emitidos durante a vida operativa do navio serão controlados, mas também todos aqueles produzidos durante a sua construção até o encerramento do período operativo do meio (desativação do meio naval), seguindo uma nova filosofia, ainda de difícil aplicação prática, mas que devido à atitudes políticas de interesse mundial está ganhando muita força nos dias atuais.

Figura 13 – Emissões de Gases na Atmosfera

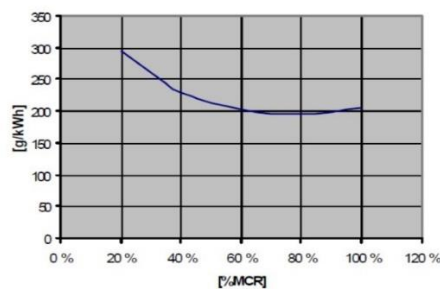


Fonte: pt.slideshare.net

## 6.8 Redução da Assinatura Acústica

Na Propulsão Elétrica não é necessário haver o alinhamento das máquinas acionadoras principais com as linhas de eixo, tornando desnecessária a utilização de engrenagens redutoras, assim como o uso dos motores elétricos, contribuindo significativamente para a redução nos níveis de ruído e vibração e garantindo desta forma uma significativa diminuição da assinatura acústica do meio, reduzindo a possibilidade do navio ser detectado por sonares. E à medida que mais sistemas e equipamentos que atualmente são mecânicos forem substituídos pelos elétricos, ocorrerá à diminuição da assinatura acústica total emitida.

Figura 14 – O ganho de potência no navio



Fonte: FREIRE, P. R. M.; FERREIRA, C. L., 2004

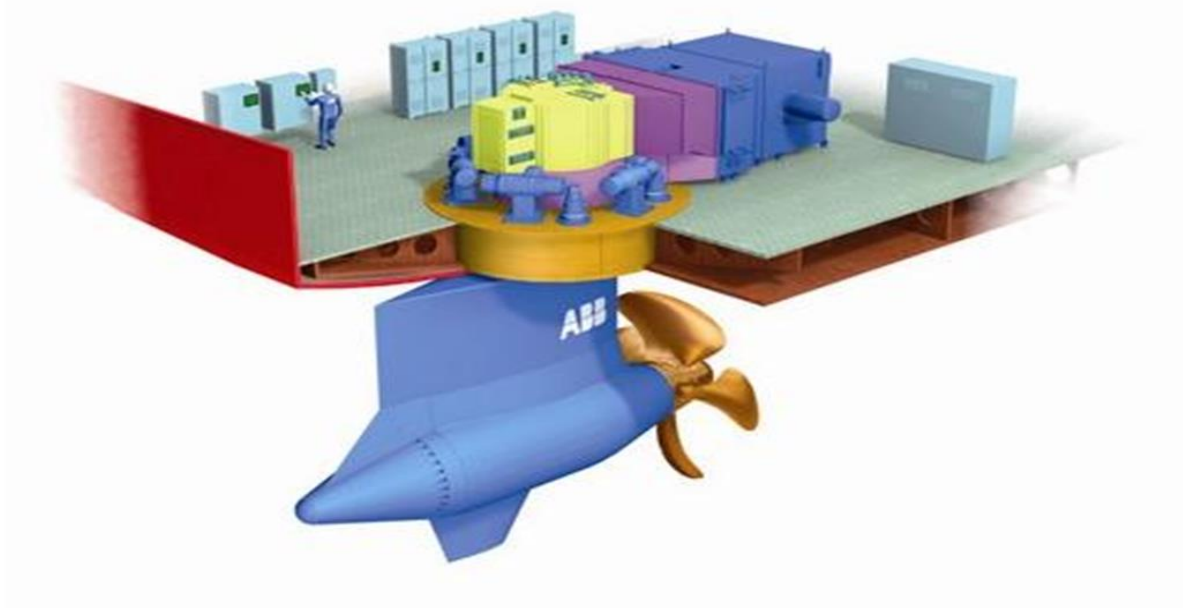


## 7 MODERNOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

### 7.1 Azipod

Azipod é marca registrada da ABB, termo que significa "pod" + Azimuth, pod é devido ao formato do thruster e AZI de azimuth por conta da capacidade de giro de 360°. O azipod é um motor elétrico fixado fora do casco, sendo seu induzido o eixo propulsor, que possui hélices de passo fixo, desta forma o sentido e a velocidade da hélice é controlado por um inversor de frequência. Esta tecnologia é extremamente eficaz na manobrabilidade da embarcação e sua potência pode atender aos mais variados tipos de embarcações.

Figura 15 – Sistema de propulsão AZIPOD em um navio



Fonte: militar.org.ua

Sistemas Azipod usados em navios é uma combinação dos sistemas de direção e propulsão. No sistema de propulsão convencional, um grande motor de dois tempos

é conectado ao eixo, o qual atravessa um túnel via tubo telescópico e se conecta ao hélice pela parte externa do casco na popa do navio. O sistema de manobra (máquina do leme) de tal sistema é feito com o auxílio de um leme localizado atrás do hélice e exige grandes cilindros hidráulicos e seu sistema de alimentação. No entanto, no arranjo azipod, os sistemas de propulsão e de manobra são combinados e fabricados em uma única peça, consistindo de um hélice o qual é manobrado por um motor elétrico e é girado pelo leme que é conectado ao sistema. O motor é localizado dentro do casulo selado e é conectado ao impelidor, com o sistema de selagem devendo ser perfeito caso contrário pode danificar o motor integralmente. O motor utilizado para este sistema é um motor elétrico de frequência variável, permitindo que a velocidade rotacional do impelidor possa ser controlada e a velocidade possa ser aumentada ou diminuída.

O sistema azipod é um tipo de sistema de propulsão elétrica que consiste de três componentes principais:

1) Transformador de Suprimento

A tensão fornecida pelos geradores pode ser tão elevada quanto 6600 KV e a potência chegar a Mw, a qual é reduzida para a tensão necessária pelo transformador de suprimento e deste é fornecido ao motor disposto no interior do casulo (pod).

2) Motor de Propulsão

O motor de propulsão é utilizado para produzir empuxo ou para dirigibilidade. O sistema precisa de algum método para girar o impelidor e isto é feito com auxílio de outro motor elétrico.

3) Controlador/Conversor de Frequência

É utilizado para mudar a frequência da potência suprida de maneira que a velocidade de rotação do motor possa ser controlada dependendo da necessidade.

Vantagens do Sistema Azipod

1) Maior manobrabilidade já que o impelidor pode ser girado em todas as direções. Isto proporciona melhor distância de parada durante as manobras do que aquela fornecida pelos sistemas convencionais;

2) No caso de grandes navios, dois ou mais azipods os quais são independentes entre si podem ser utilizados. Isto proporciona manobras mais precisas;

3) Economiza-se muito espaço na praça de máquinas já que não existe motores, impelidores, eixos e outros arranjos. O espaço economizado pode ser utilizado para mais carga do navio;

4) O sistema pode ser posicionado embaixo do navio promovendo desta forma mais eficiência do que o sistema convencional, com menor influência das ondas,

5) O uso de impelidores lateral (bow thruster, side thruster) pode ser eliminado já que os pods podem prover tais esforços lateral;

6) Vibrações e barulho menores do que no sistema convencional

7) Baixo consumo de combustível e lubrificantes;

8) Amigável com o meio ambiente já que as emissões são extremamente baixas.

#### Desvantagens

1) Sistema azipod requer um custo inicial elevado;

2) Um grande número de motores diesel são necessários para a produção necessária de energia;

3) Há uma limitação da potência produzida pelo motor. Atualmente as potências mais elevadas disponíveis estão na faixa dos 21 MW;

4) Não pode ser instalado em grandes navio com grandes capacidades de carga os quais precisão de muita potência e grandes motores;

5) Aumentam o calado da embarcação.

## 7.2 Propulsão com instalação nuclear

Propulsão nuclear designa uma grande variedade de métodos de propulsão que de alguma forma usa da reação nuclear como fonte primária de potência, cada vez mais utilizada por submarinos militares, vasos de guerra, navios-aeródromo e grandes navios quebra – gelo.

Figura 16 – Submarino com o sistema de propulsão nuclear



Fonte: defesaaereanaval.com.br

#### Vantagens:

É uma fonte mais concentrada na geração de energia. Uma pequena quantidade de urânio pode abastecer um cidade inteira, fazendo assim com que não sejam necessários grandes investimentos no recurso;

Não causa nenhum efeito de estufa ou chuvas ácidas;

É fácil de transportar como novo combustível;

Tem uma base científica extensiva para todo o ciclo;

É uma fonte de energia segura, pois o número de acidentes ocorridos até à data é extremamente reduzido;

Permite reduzir o déficit comercial;

Permite aumentar a competitividade.

#### Desvantagens:

Ser uma energia não renovável, como referido anteriormente, torna-se uma das desvantagens, visto que o recurso utilizado para produzir este tipo de energia se esgotará futuramente;

As elevadas temperaturas da água utilizada no aquecimento causa a poluição térmica, pois esta é lançada nos rios e nas ribeiras, destruindo assim ecossistemas e interferindo com o equilíbrio destas mesmas;

O risco de acidente, visto que qualquer falha humana, ou técnica poderá causar uma catástrofe sem retorno, apesar de atualmente existirem sistemas de segurança elevada, de modo a tentar minimizar e evitar que estas falhas (humanas ou técnicas) aconteçam;

A formação de resíduos nucleares perigosos e a emissão de radiações causam a poluição radioativa. Os resíduos são um dos principais inconvenientes desta energia, visto que atualmente não existem planos para estes resíduos, quer de baixo ou alto nível de radioatividade. Estes podem ter um período de vida de até 300 anos após serem produzidos podendo assim prejudicar as gerações vindouras;

Pode ser utilizada para fins bélicos, para a construção de armas nucleares. Esta foi uma das primeiras utilizações da energia nuclear. É uma das grandes preocupações a nível mundial, porque projetos nucleares como o do Irão, ameaçam a estabilidade económica e social;

O investimento inicial, e a manutenção das energias nucleares são de elevados custos.

A energia nuclear ou núcleo-elétrica é proveniente da fissão do urânio em reator nuclear. Apesar da complexidade de uma planta nuclear, seu princípio de funcionamento é similar ao de uma termelétrica convencional, onde o calor gerado pela queima de um combustível produz vapor, que aciona uma turbina, acoplada a um gerador de corrente elétrica, podendo também acionar um eixo propulsor. Em uma central nuclear, o calor é produzido pela fissão do urânio no reator que necessita de um sistema de controle para a reação nuclear (hastes absorvedoras de nêutrons) e uma blindagem eficiente contra os nêutrons e raios gamas emitida pelo produto da fissão.

O modelo de reator empregado nos submarinos nucleares e desenvolvido pela Marinha do Brasil é do tipo de água pressurizada (Pressurized Water Reactor – PWR) constituído por três circuitos: primário, secundário e de refrigeração.

No circuito primário a água é aquecida pela energia liberada pela reação da fissão nuclear e está submetida à alta pressão. Em seguida, esta água passa por uma tubulação trocando calor e vaporizando a água do circuito secundário no gerador de

vapor, sem que haja contato físico entre os dois circuitos. O vapor gerado aciona uma turbina, que alimenta os geradores do Sistema Elétrico de Propulsão e do Sistema Elétrico de Serviço do submarino.

### 7.3 Propulsão de motor elétrico e imã permanente

Os motores magnéticos foram criados da ideia do seu princípio de funcionamento ser através de campo magnético gerado por ímãs de neodímio permanentes, precisamente colocados numa estrutura com o objetivo de proporcionar rotação dos mesmos em um eixo fixo. Pelo fato dos ímãs terem dois polos magnéticos (positivo e negativo) é criada a existência de atração ou repulsão entre eles em um sistema, possibilitando o funcionamento de um motor magnético.

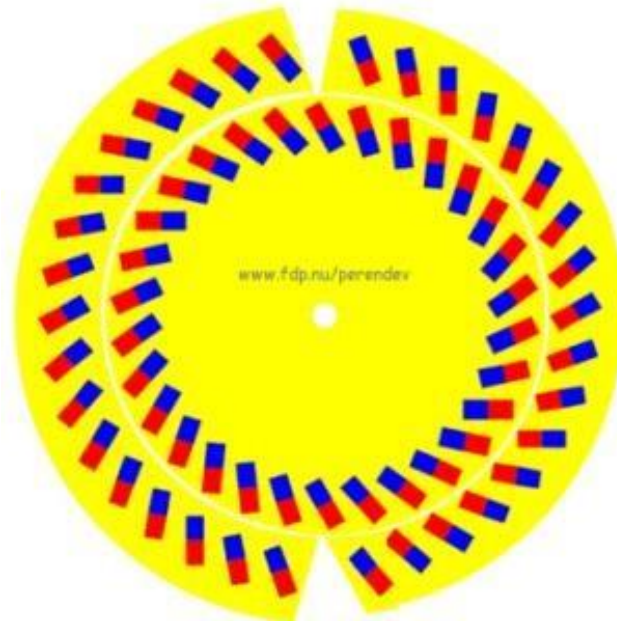
Figura 17 - Protótipo de um motor magnético



Fonte: Ricardo Kostetzer Alves, Geovane Vieira - 2º Seminário de Tecnologia,

Esse modelo foi construído utilizando ímãs de neodímio e materiais não magnéticos. Os três discos centrais são os rotores e os semicírculos por fora são os estatores. Os estatores estão divididos em seis partes. Três deles são fixos e os outros três são móveis. Essa maneira de construção é a mais comum entre os pesquisadores que tentam reproduzir esse motor.

Figura 18 - Polaridade do motor magnético entre os estatores e o rotores



Fonte: Ricardo Kostetzer Alves, Geovane Vieira - 2º  
Seminário de Tecnologia,

Esse protótipo utiliza o princípio de atração e repulsão dos ímãs ao mesmo tempo para movimentar o rotor. Observe na imagem acima que todos os ímãs do rotor estão com o polo vermelho voltado para fora e os ímãs do estator um dos lados estão com o polo vermelho para dentro e o outro está voltado para fora. Assim enquanto de um lado do motor está atraindo o rotor, o outro lado está repelindo. Além de ter esse detalhe de atração e repulsão, esse motor possui uma defasagem entre os rotores. Ou seja, os rotores não estão perfeitamente alinhados como normalmente se faz em montagens mecânicas.

#### **7.4 Navio a energia solar**

Depois do desenvolvimento de protótipos de casas, carros e até aviões movidos a energia solar, coube a indústria náutica desenvolver o seu projeto de barco movido a esse tipo de energia. Após mais de sete meses navegando, depois de



realizar vários testes de mar durante o verão de 2010 de Kiel a Barcelona, em abril de 2011 aconteceu uma viagem de 40 mil quilômetros ao redor do mundo para promover a energia solar a bordo, com uma duração prevista de 140 dias numa velocidade média de 8 nós, O MS TÛRANOR PlanetSolar completou metade do seu desafio de dar à volta ao mundo usando apenas energia solar. Construído na Alemanha, o barco possui quatro motores movidos a energia solar, captada por 825 módulos fotovoltaicos localizados na superfície da embarcação. Esses módulos ocupam 537 m<sup>2</sup> da parte superior do barco, que possui quinze metros de largura e trinta e um de comprimento. Apesar das dimensões e do número de motores, o navio é silencioso e possui uma autonomia de três dias sem captação de luz solar. Os principais objetivos do projeto são mostrar que as novas tecnologias de eficiência energética são confiáveis, e estimular o desenvolvimento de pesquisas em diversas áreas de energia renovável.

O desenvolvimento de veículos que não utilizam combustíveis fósseis é de grande importância para o meio ambiente, ainda mais se levarmos em conta a grande contribuição que o setor de transportes tem nas emissões de gases do efeito estufa.

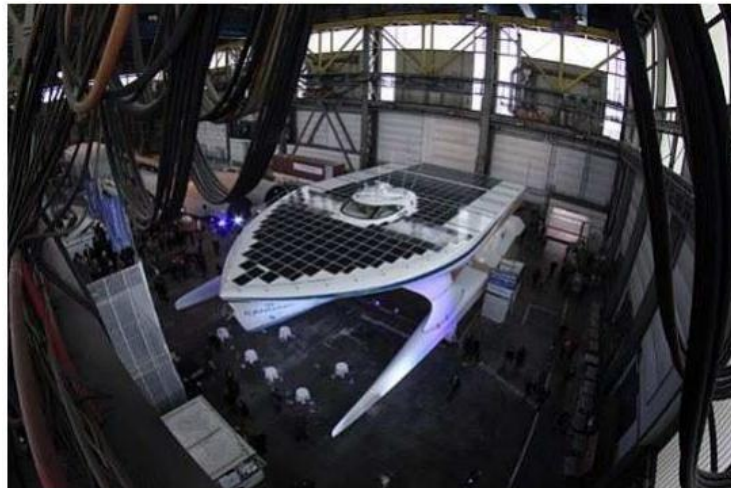
Figura 19 - O MS Turanor PlanetSolar navegando



Fonte: [www.planetsolar.org](http://www.planetsolar.org) – acessado em 15/08/2015



Figura 20- MS Turanor na construção



**Fonte:** [www.planetsolar.org](http://www.planetsolar.org) – acessado em 15/08/2015

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi visto nesse trabalho, a propulsão elétrica foi evoluindo através dos tempos, afim de melhorar a relação de interesses da relação fretador x afretador, com economia e a obtenção de cada vez mais velocidade, assim melhorando o custo benefício entre ambos.

A aplicação da propulsão elétrica em navios tem uma história de sucessos ao longo dos últimos anos com intenção de melhorar cada vez a eficiência do navio e diminuir a emissão de poluentes. O sucesso nas tentativas recentes, de aumentar a densidade de potência dos motores elétricos empregados neste tipo de propulsão, permite que embarcações de apoio marítimo possam se beneficiar das vantagens inerentes ao seu uso. Algumas vantagens associadas à adoção do acionamento elétrico são listadas a seguir:

- Excelente controle de velocidade e torque em toda faixa de velocidade;
- Facilidade para adoção de controles automáticos e remotos;
- Maior capacidade de reversão rápida de velocidade, propiciando a redução de tempo e distância de parada brusca (30 a 50% de redução na distância de parada, em caso de emergência);
- Não é necessário usar hélice de passo controlável, haja vista que, o custo deste hélice representa cerca de 33% do valor da máquina principal, enquanto que, o hélice de passo fixo representa apenas 8% ;
- Redução do ruído do motor e da vibração transmitida do eixo ao hélice; e
- Flexibilidade no gerenciamento da distribuição da potência em operações normais e rápida recuperação após a detecção de defeitos (incêndios, alagamentos e outros tipos de falhas).

E com o avanço da tecnologia esse tipo de propulsão se tornará cada vez mais eficiente utilizando diferentes fontes de energia.

## REFERÊNCIAS

- [1] ADNANES, Alf Kàre. Maritime electrical installations and diesel electric propulsion. Disponível em:  
<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.372.301>>. Acesso em: maio 2014.
- [2] ARRINGTON, J. W. The analysis of components, designs and operation for electric propulsion and integrated electrical system. Monterey. Califórnia, USA, 1988.
- [3] FREIRE, P., R., M., FERREIRA, C., L., 2004, “Propulsão Elétrica – Histórico e Perspectivas Futuras”, 20º Congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção Naval e Offshore – EXPONAVAL 2004, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.
- [4] HARRINGTON, R. L. Reliability and maintainability analyses of shipboard systems. In: Marine Technology. Society of Naval Architects and Marine Engineers SNAME. New York, EUA, 1970.
- [5] MCCOY, T. J. Trends in ship electric propulsion power engineering society summer meeting. vol. 1, p. 343-346, IEEE, 2002.
- [6] NEWELL, J. M.; YOUNG, S. S. Beyond electric ship. Transactions ImarE.
- [7] PÊGO, J. et al. Construction of a test facility for further research of ship propulsion systems. Emirates Journal for Engineering Research, 10 (2), 1-8 2005.
- [8] PEREIRA, N. N.; BRINATI H. L. Estudo do impacto da propulsão a diesel-elétrica na emissão de gases poluentes. 22º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore - EXPONAVAL 2006, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval - SOBENA.

[9] WHITMAN, E., C., “The IPS Advantage. Electric Drive: A Propulsion System for Tomorrow’s Submarine Fleet?”, Seapower Magazine, Jul. 2001.

[10] <http://www.planetsolar.org>, Sept. 2015.