

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

**GUSTAVO PEREIRA REIS**

**PROPULSÃO ELÉTRICA EM NAVIOS MERCANTES**

**RIO DE JANEIRO**

**2015**

**GUSTAVO PEREIRA REIS**

**PROPULSÃO ELÉTRICA EM NAVIOS MERCANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como exigência para obtenção do título de  
Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de  
Formação de Oficiais de Máquinas da  
Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de  
Instrução Almirante Graça Aranha.  
Orientador: Msc. Eng. Paulo Ribeiro Batista Pinto

**RIO DE JANEIRO**

**2015**

**GUSTAVO PEREIRA REIS**

**PROPULSÃO ELÉTRICA EM NAVIOS MERCANTES**

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

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

Orientador: Msc. Eng. Paulo Ribeiro Batista Pinto

---

Assinatura do Orientador

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

## **RESUMO**

A tecnologia avança e consigo a exigência que o mercado se adapte as novas características. A grande demanda para as frotas de navios mercantes no mundo faz com que essa tecnologia seja rapidamente aplicada com intuito de melhorar o trabalho e aumentar os lucros das empresas. O transporte marítimo é o meio de transporte mais utilizado no mundo para se levar um produto de um lugar ao outro e, para se manter a alta performance e alta produtividade e a escolha o sistema propulsivo tem papel fundamental. O sistema mais utilizado é o sistema diesel-mecânico, tradicional. Mas o crescimento de outros modelos de propulsão faz o mercado viabilizar a utilização deles. Este trabalho de graduação tem como foco principal a análise do sistema de propulsão diesel-elétrica colocando suas vantagens em relação ao sistema propulsivo tradicional em pauta, bem como seu funcionamento físico e possíveis pesquisas futuras que possuem grandes tendências para o mercado marítimo.

Palavras-chave: Propulsão. Elétrica. Motor. Liquidpiston.

## **ABSTRACT**

Technology advances and, with it, the requirement that the market suits the new features. The great demand for fleets of merchant ships in the world makes this technology is quickly applied with a view to improving the work and increase corporate profits. Shipping is the most widely used means of transport in the world to take a product from one place to another and, to maintain high performance and high productivity, and choose the propulsion system has a fundamental role. The most widely used system is the diesel-mechanical, traditional. But the growth of other types of propulsion does the market make it possible to use them for your purpose. This final paper has focused primarily on the analysis of the diesel-electric propulsion system putting its advantages compared to traditional propulsion system on the agenda, as well as their physical functioning and future research.

Key words: Propulsion. Electric. Motor. LiquidPiston

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>CONTEXTO HISTÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1.	A volta para a potência elétrica	10
<b>3</b>	<b>UMA ANÁLISE DAS PROPULSÕES ELÉTRICA E MECÂNICA</b>	<b>11</b>
3.1	Os sistemas de propulsão	11
3.1.1	Sistema diesel-mecânico	11
3.1.2	Sistema Híbrido	12
3.1.3	Sistema Elétrico	13
3.2	Comparação entre os sistemas de propulsão	14
3.3	Vantagens do Sistema de Propulsão Elétrica	18
3.3.1	Tripulação	18
3.3.2	Projeto mais flexível	18
3.3.3	Capacidade de Sobrevivência do Navio	19
3.3.4	Vida útil	19
3.3.5	Custos de Manutenção	19
3.3.6	Emissão de Poluentes	19
3.3.7	Redução da Assinatura Acústica	20
<b>4</b>	<b>DA FÍSICA À APLICAÇÃO</b>	<b>21</b>
4.1	Leis da Física e Tipos de Motores	21
4.1.1	O Motor CC	21
4.1.2	Um pouco de física	23
4.1.3	O Motor AC	24
4.2	Geradores	27
4.2.1	Princípio de Funcionamento	28
4.2.2	Geradores a bordo	30
4.2.3	Uma Análise Física de Potência	31
<b>5</b>	<b>TIPO DE PROPULSORES</b>	<b>34</b>
5.1	Atuadores	34
5.1.1	Propulsores em duto	34
5.1.2	Propulsores azimutais	35
5.1.3	Propulsor AziPull (Azipod)	35
<b>6</b>	<b>ESTUDOS FUTUROS</b>	<b>37</b>
6.1	Introdução	37

<b>6.2</b>	<b>Liquid Piston X Engine.....</b>	<b>37</b>
<b>6.3</b>	<b>Ciclo Híbrido de Alta Eficiência .....</b>	<b>38</b>
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Marinha Mercante tem tido um importante papel para a globalização. Como o principal meio de transporte de produtos, as empresas tem procurado melhorar sua operação e com isso aumentar a lucratividade da empresa. Por esse motivo, as empresas precisam ter seus navios com as características que precisam para seu tipo de trabalho. Cada empresa possui seus diferentes tipos de navios com diferentes características.

Um dos aspectos mais significativos de um navio é seu sistema de propulsão. Os estudos e avanços da propulsão elétrica tem tomado mercado da propulsão mecânica tradicional nos últimos anos.

O sucesso obtido recentemente nas tentativas de aumentar a densidade de potência e reduzir o volume e o peso dos motores elétricos permitiram que navios de pequeno porte pudessem se beneficiar das vantagens associadas à Propulsão Elétrica[1]. Esse aumento das características como potência e eficiência ainda estão em pauta e cada vez mais novas pesquisas tem aparecido com novas informações e novos conceitos. Isso mantém o sistema elétrico propulsivo no foco do mercado.

Navios de pequeno porte já ganharam notoriedade com sistemas elétricos de propulsão e com sua rede redundante de energia. Mas novos mares estão prestes a surgir. Já pode-se pensar em viabilizar este tipo de propulsão para grandes viagens mantendo a eficiência maior que no sistema de propulsão tradicional.

A utilização desse sistema já diminuiu o uso de acoplamentos mecânicos e continua tomando novas características. O futuro se reserva a esta forma de propulsão fazendo com que os motores primeiros trabalhem sempre numa faixa de operação ótima, reduzindo o consumo de combustível, a manutenção e a emissão de poluentes e, em segundo lugar, um aumento de flexibilidade e manobrabilidade.



## 2 CONTEXTO HISTÓRICO

A necessidade de se obter larga eficiência na propulsão mecanizada com o intuito de ter menos gastos tem sido um pensamento existente desde o século XIX. Foi neste cenário que procurou-se implantar a propulsão elétrica no meio naval. Nesse século já haviam aplicações experimentais de baterias como fonte de energia para propulsão de embarcações.

Porém, foi só em 1920 que surgiu a primeira geração de navios não militares movidos a propulsão elétrica. O “S/S Normandie”<sup>1</sup> foi a mais renomada embarcação da época movida com um motor turbo-elétrico que procurava reduzir o tempo de travessia para embarcações transatlânticas de passageiros.

Cada um dos quatro eixos dos motores síncronos de 29 MW eram movidos por turbo-geradores. A velocidade de rotação do navio era dada pela frequência dos geradores e, apesar de se usar um gerador para cada motor, era possível colocar dois motores em um gerador apenas para que se pudesse manter baixa rotação.



Figura 1: O Navio “S/S Normandie” já em operação.

(Fonte: <http://en.wikipedia.org/>)

---

<sup>1</sup> O “S/S Normandie” foi considerado o maior navio do mundo durante cinco anos. Era um transatlântico francês que foi construído no início da década de 1930 e lançado ao mar em outubro de 1932. Foi o primeiro navio que ultrapassou 60 mil toneladas e tinha a capacidade para 3.317 pessoas. Devido a Segunda Guerra Mundial, ficou retido em Nova York e logo transformado no “USS Lafayette” que seria usado como navio de transporte de tropas. Durante o processo de transformação, uma fagulha de um maçarico iniciou um grande incêndio. Devido a instabilidade, o “USS Lafayette” tombou. Uma tentativa de reparo mal sucedida devido ao alto custo fez com iniciasse o seu desmanche em 1946.

Não foi só no meio de transporte de passageiros que a propulsão elétrica se fez presente. Na década de 1920, o navio carvoeiro “USS Jupiter” teve uma implementação experimental de 4.1 MW por eixo. Também movido por turbo-geradores, dois motores de indução com rotores bobinados eram movimentados. O sucesso do experimento fez com que, na década seguinte, o “USS Jupiter” fosse convertido no primeiro navio aeródromo americano batizado de “USS Langley” que permaneceu operacional até 1942, quando foi afundado em combate.



Figura 2: O navio “USS Langley” em operação.

(Fonte: <http://commons.wikipedia.org/>)

Durante a Segunda Guerra Mundial, mais de 160 navios com propulsão elétrica foram construídos para a Marinha Americana e mais de 500 embarcações de pequeno porte foram equipadas com sistemas de propulsão elétrica de corrente contínua. A potência desses navios variava entre 4,5 e 9,0 MW e de 225 kW e 15 MW para motores de propulsão com corrente contínua. A quantidade de navios com propulsão elétrica, nesse período, mostrou que era uma alternativa muito econômica com relação aos outros tipos de propulsão (turbina a vapor e motores de combustão a diesel). Isso se deu, principalmente, ao fato da produção de engrenagens em larga escala, na época, não ser viável devido a falta de capacitação técnica e as demandas de maquinário do fronte de batalha.

Mas foi por volta dos anos de 1940 que esse cenário começou a mudar. O desenvolvimento tecnológico dos sistemas de engrenagens de dupla redução começou a tornar os preços competitivos. Isso se aliou ao fato dos motores elétricos nessa época serem mais robustos, possuírem menor eficiência e serem mais pesados. Podemos considerar também que a tecnologia para o setor da metalurgia ajudou a mudar esse cenário. Com o avanço, começaram a se fazer engrenagens com redução de peso e volume e com uma eficiência melhor em termos de acústica. Isso inibiu a evolução da propulsão elétrica que foi completamente mudada para a propulsão mecânica convencional.

### **2.1. A volta para a potência elétrica**

Durante as décadas de 1980 e 1990, a transmissão elétrica de energia se tornou bem mais compacta e eficiente devido aos grandes avanços na construção das máquinas elétricas aumentando seu rendimento e na área da Eletrônica de Potência. Isso possibilitou o retorno da propulsão elétrica para diversos tipos de navios como oceanográficos, quebra-gelos, tanques e numerosos transatlânticos. Aproximadamente vinte anos, os avanços em motores AC de alta potência também auxiliaram a mudança da potência mecânica para a potência elétrica em navios de carga, navios de apoio marítimo e navios de cruzeiros.

No começo dos anos de 1980, a marinha americana colocou em funcionamento para testes o navio Jupiter II, com um motor AC supercondutor homopolar com 3000 HP. Por conta da disso, existem várias pesquisas da marinha dos Estados Unidos para um motor DC homopolar para propulsão de navios.

As pesquisas relativas aos motores de propulsão, para aplicação naval e militar, tem como requisitos essenciais o formato compacto, peso e volume reduzido, elevadas faixas de potências geradas para valores específicos de torque, resistência ao choque e baixos valores de assinatura acústica e eletromagnética.

As empresas perceberam que a propulsão elétrica é uma alternativa eficiente para navegação, incentivando as pesquisas para melhorar cada vez mais o funcionamento desse sistema e hoje vemos que a utilização de potência elétrica traz muitas vantagens. Inclusive, em embarcações offshore, temos uma grande quantidade de motores diesel-elétricos em todos os tipos de embarcações de apoio.

### 3 UMA ANÁLISE DAS PROPULSÕES ELÉTRICA E MECÂNICA

#### 3.1 Os sistemas de propulsão

Os sistemas de propulsão, hoje, se dividem essencialmente em três tipos: a propulsão diesel-mecânica, a diesel-elétrica e o sistema híbrido de propulsão. Com o objetivo de melhorar a eficiência e reduzir custos com combustível, manutenção e operação, o estudo de novos tipos de propulsão e sua aplicabilidade se tornou viável.

##### 3.1.1 Sistema diesel-mecânico

O sistema de propulsão diesel-mecânica, apesar de clássica, é um sistema amplamente utilizado em embarcações que precisam de grande potência propulsiva, que necessitam de “força bruta”, embarcações que produzam tração estática (*Bollard Pull*<sup>2</sup>) e outras embarcações.

A configuração desse tipo de sistema propulsivo está caracterizada por um eixo propulsor ligado ao motor, podendo conter ou não caixas redutoras para o caso do motor não ser reversível de passo fixo; existem também motores de passo fixo reversíveis e; motores de passo variável não reversíveis. Nessas três configurações, podem ser instalados no eixo propulsor um gerador de eixo que vai funcionar como um alternador e podendo assim gerar energia elétrica a partir do movimento rotativo.



Figura 3: Exemplo de propulsão Diesel-mecânica [13]

<sup>2</sup> *Bollard pull* é um parâmetro importante em um ponto de vista comercial e contratual. Ele é definido como a força média exercida, por um certo período de tempo, com velocidade zero.[11]

### 3.1.2 Sistema Híbrido

O sistema híbrido é caracterizado pela mescla dos sistemas diesel-mecânico e diesel-elétrico. Juntar esses dois tipos de sistemas foi uma tentativa de aliar as melhores qualidades do diesel-elétrico com o diesel-mecânico, afim de evitar consumo excessivo de combustível em embarcações com perfis operacionais com atividades distintas.

Esses sistema permite uma versatilidade muito grande na geração de energia nas faixas de motores e geradores. Por esse motivo, a eficiência energética e economia são significativas, já que trabalha dentro dos padrões de projeto.

A composição do sistema é basicamente formada pela parte mecânica que contém o motor diesel, a caixa de engrenagens redutoras (se tiver), e pela parte elétrica, com geradores de eixo e motores elétricos. Também possui geradores auxiliares que se tornam necessários para suprir a demanda energética da embarcação junto com os geradores de eixo, prncipalmente em variações de regime de funcionamento por condições de mar ou manobras.



Figura 4: Equipamentos do sistema propulsivo híbrido [13]

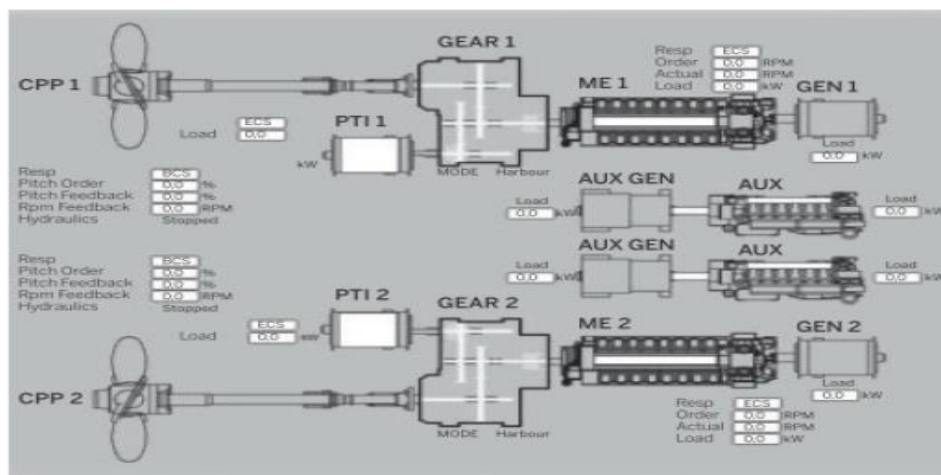


Figura 5: Sistema de propulsão híbrida [13]

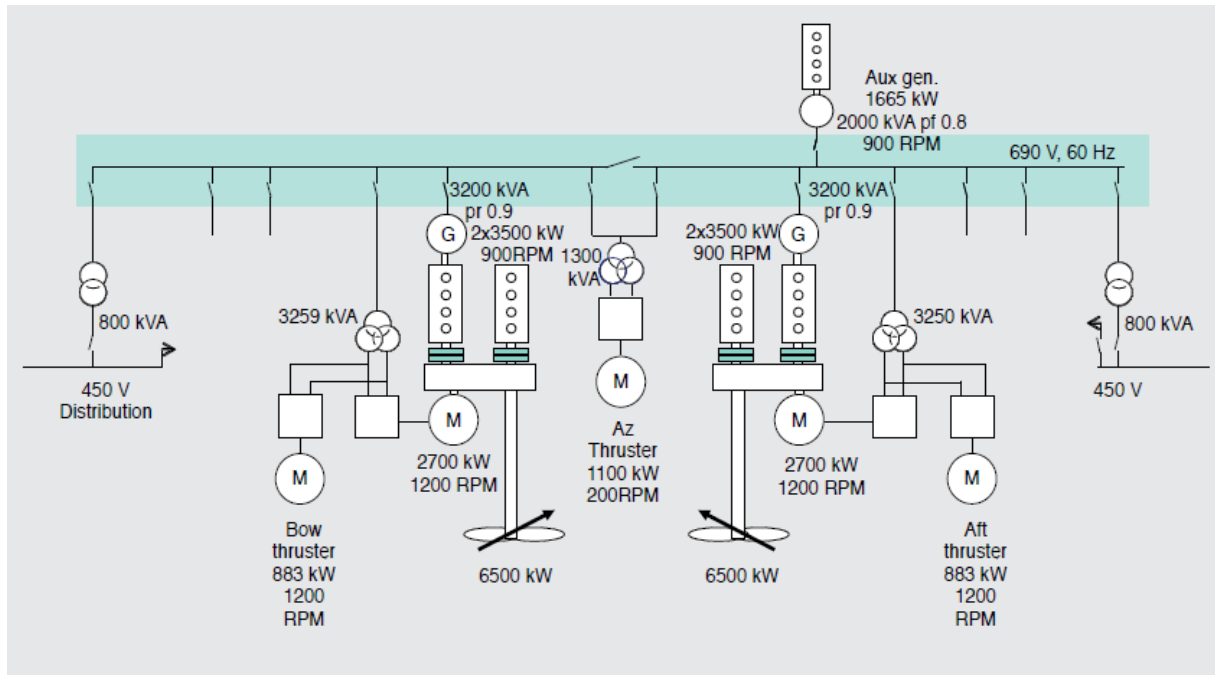


Figura 6: Esquema do Sistema Híbrido de Propulsão [13]

### 3.1.3 Sistema Elétrico

A propulsão elétrica é normalmente utilizada que requerem alto grau de manobrabilidade e a necessidade do sistema DP (*Dynamic Positioning*<sup>3</sup>). Estas duas características fazem um sistema não convencional seja o melhor para a propulsão de navios. O sistema é composto basicamente por Gerador Diesel Elétrico, painéis de distribuição, cabos de transmissão além de propulsores do tipo azimutais.

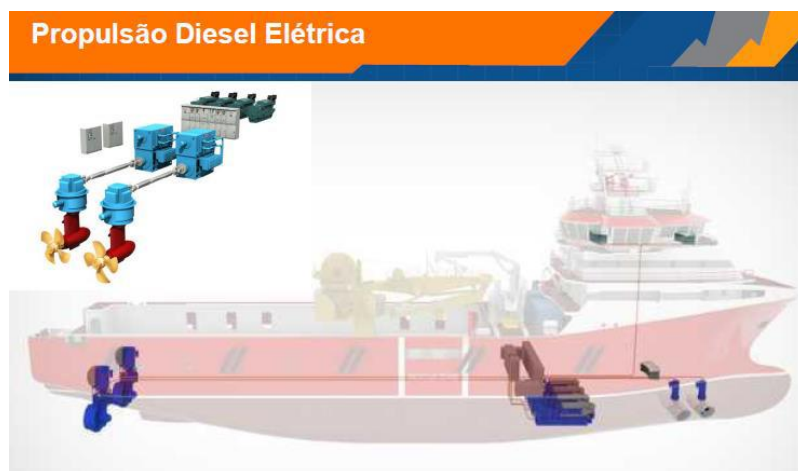


Figura 7: Sistema Elétrico de Propulsão [13]

<sup>3</sup> *Dynamic Positioning* ou Posicionamento Dinâmico é uma tecnologia que permite que a embarcação mantenha em condições de operações sua posição e cabreio usando um sistema de posicionamento sofisticado e sensores [12]



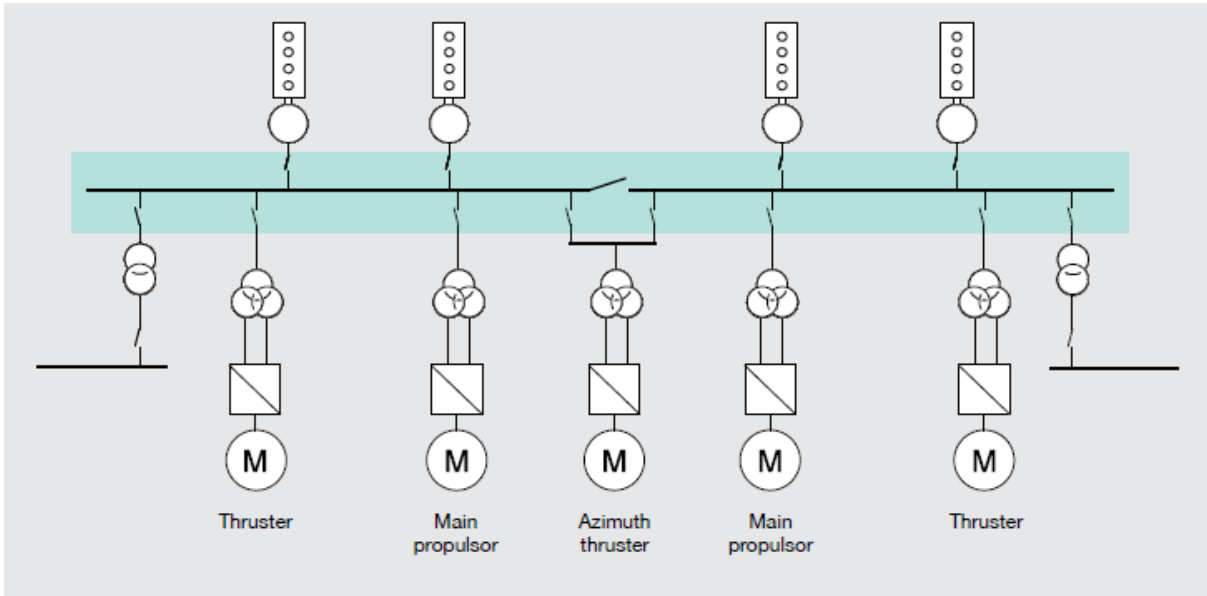


Figura 8: Esquema de sistema diesel-elétrico [13]

A principal característica desse tipo de sistema é o controle da velocidade do navio pelo controle de rotação do motor elétrico. Nesse tipo de sistema ao invés de dois sistemas de potência separados, passa-se a dispor de uma capacidade de geração única que atribui maior flexibilidade entre diversas áreas de bordo de acordo com alterações de demanda. Portanto, o conceito de propulsão elétrica visa basicamente a integração entre o sistema de potência da propulsão com os sistemas auxiliares.

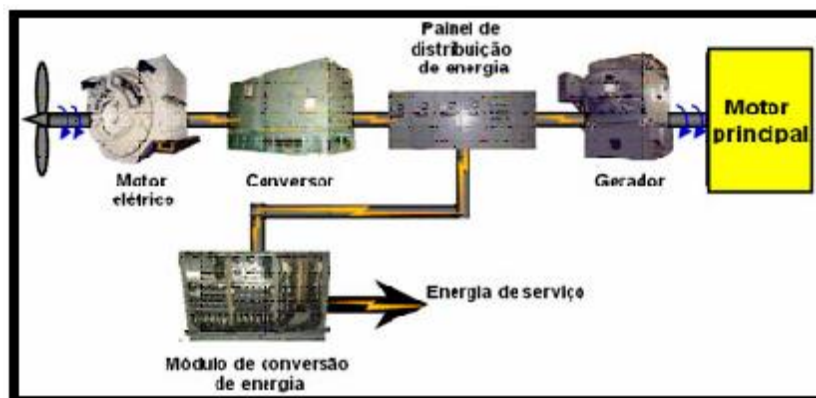


Figura 9: Sistema de acionamento elétrico integrado [1]

### 3.2 Comparação entre os sistemas de propulsão

Ao longo dos anos, as pesquisas referentes a propulsão elétrica tem gerado frutos e a tecnologia tem avançado para que os navio utilizem cada vez mais esse tipo de propulsão. Isso tem reduzido de forma significativa o consumo de combustível em comparação com a

propulsão direta mecânica em navios de apoio. A economia chega, muitas vezes, a faixa de 15-25% em perfis normais de operação, aumentando significativamente quando utilizado em operações com posicionamento dinâmico (DP) chegando a 40-50%.

Um dos principais fatores que auxiliam nessa redução do consumo é a velocidade de rotação do hélice. Em navio com propulsão mecânica tradicional, a velocidade do motor é que define a rotação do hélice. Então, dependendo da operação, o motor pode não operar na faixa de rendimento ótimo, gerando assim um consumo excessivo de combustível e grande desgaste mecânico. Com a utilização da propulsão elétrica, esse problema é resolvido. Isso acontece porque a conexão entre o motor primário e o eixo propulsor é extinta, ou seja, não existe mais relação entre a velocidade do motor e a rotação do hélice.

Nos navios dotados de propulsão elétrica convencional o dispositivo de acionamento principal a ser empregado (turbina a vapor, turbina a gas ou motor diesel) é acoplado diretamente ao eixo propulsor através de uma engrenagem redutora. Neste tipo de configuração, é necessário que existe um diesel-gerador auxiliar instalado em local separado que fornecerá potência elétrica para os outros sistemas de bordo

A propulsão elétrica pode ser descrita como a transmissão de potência elétrica entre o dispositivo de acionamento principal e a carga representada pelos propulsores do navio. Isso vai auxiliar na mudança das características dos dispositivo, passando de alta velocidade e baixo torque para baixa velocidade e alto torque que é requerido para girar os propulsores. Portanto, quando o navio opera com velocidade mais baixa, a eficiência da propulsão elétrica é maior do que a da propulsão mecânica.

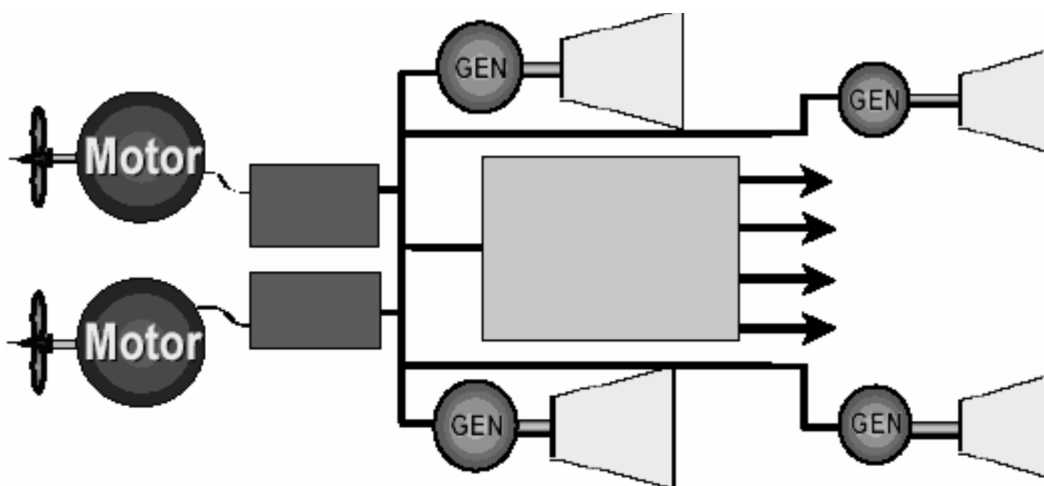


Figura 10: Diagrama de blocos da propulsão elétrica [1]



Quando se trata da relação velocidade x passo do hélice para sistemas diesel-elétricos, vemos que há uma redução grande nas perdas para hélices de velocidades fixas e passo variável. Quando comparados com hélices de velocidade variável, o uso dos hélices com velocidade constante e passo variável se mostra uma maneira muito eficiente de controle. Isso porque naquele tipo de hélice as perdas na condição “*idle run*” são maiores. Além disso, a utilização da capacidade do propulsor é muito baixa quando se está em posicionamento dinâmico. Isso pode acarretar um desperdício de potência pelo fato do sistema propulsivo não se adequar ao perfil operacional da embarcação.

A figura abaixo mostra a comparação de gasto de energia quando o hélice está com velocidade fixa e passo variável (curva vermelha; motor diesel elétrico) com um hélice de velocidade variável e passo fixo (curva azul; motor diesel-mecânico).

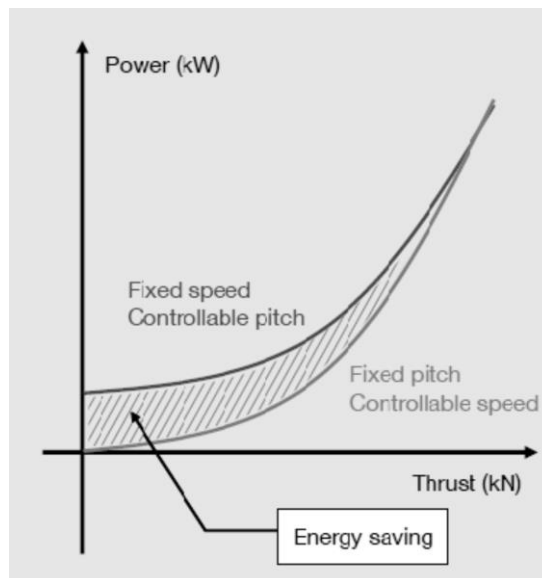


Figura 11: Comparação da potência do eixo [13]

Outro principal fator que auxilia na redução do consumo de combustível é a possibilidade de partida e parada automática dos motores diesel dos MCAs de acordo com a demanda, que assegura que a carga do motor seja mantida próxima do ponto ótimo de trabalho, dentro do limite operacional. A propulsão elétrica também oferece o potencial para o carregamento ótimo dos motores diesel através do uso de um menor número de motores, quando comparado com o uso de unidades maiores. Dependendo da carga, o acionamento automático dos motores diesel produz melhor carga e ainda reduz o consumo de combustível. [13]

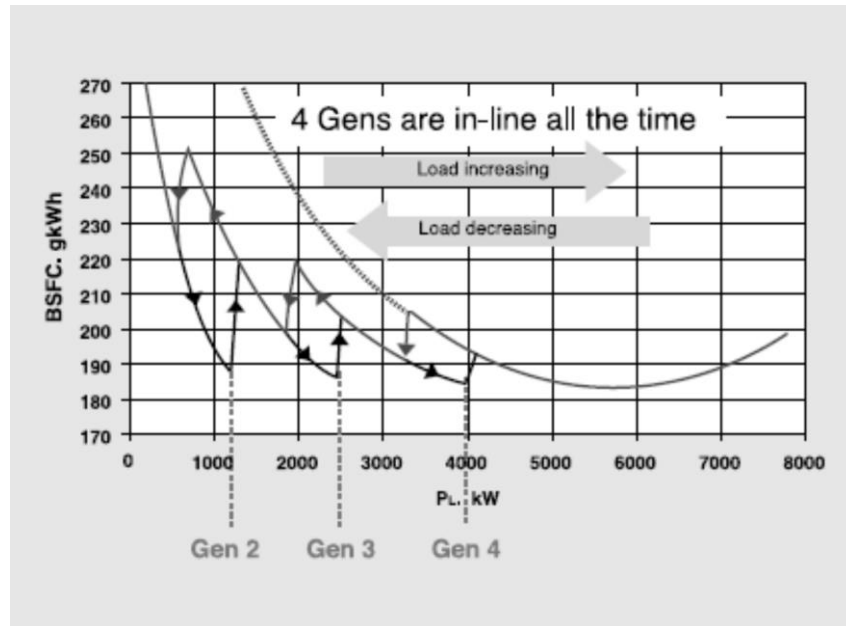


Figura 12: Consumo de combustível por kWh de energia produzida [13]

Porém, essa redução do consumo de combustível é, em certa medida, neutralizada pelas perdas elevadas no sistema de transmissão entre motores diesel e os propulsores no sistema diesel-elétrico.

Os navios do tipo AHTS (Anchor Handling Tug Supply) foram construídos para utilizar o processo de propulsão convencional. Entretanto, o sistema de propulsão elétrico e híbrido vieram como soluções fortes para a economia de combustível desse tipo de embarcação. Um estudo de caso feito com um navio AHTS de 200 toneladas de tração estática (*bollard pull*) teve como resultado uma economia de combustível de, aproximadamente, 1,9 toneladas por hora quando se tratava de propulsão puramente elétrica.

Apesar do potencial econômico e do grande interesse em utilizar a propulsão elétrica para esse tipo de navio, vê-se ainda que a maioria dos navios AHTS são com propulsão diesel-mecânica. A melhor explicação para essa maioria é o fato dos fretadores desse setor estarem mais focados no cumprimento do *bollard pull* em detrimento de menor consumo de combustível. Uma solução para esse problema seria a utilização do sistema híbrido de propulsão. Em termos de instalação, ela é mais econômica do que sistema puramente elétrico. A eficiência energética para operações com carga baixa juntamente com as poucas perdas do sistema mecânico de transmissão fariam desse sistema uma solução. No entanto, o aumento da complexidade mecânica dos sistemas híbridos faz com que a tripulação da embarcação deva ser mais ativa para selecionar manualmente o funcionamento dela para os diferentes modos e condições verificando qual deve prevalecer [13].

Outro fator que auxilia o sistema puro elétrico é a facilidade de otimizar o sistema de alimentação automaticamente, conforme já observado. Com isso, obtém-se uma redução significativa no consumo de combustível, além de minimizar as emissões de poluentes para o ambiente, especialmente NO e CO<sub>2</sub>. Com a adoção do sistema de propulsão elétrica para navios offshore, principalmente PSV's e AHTS, o consumo de combustível, a emissão de poluentes e custos operacionais estão sendo reduzidos drasticamente.

### **3.3 Vantagens do Sistema de Propulsão Elétrica**

Como visto, uma das principais características da propulsão elétrica é a sua economia no consumo de combustível. Talvez, para regimes operacionais, seja a vantagem mais importante para os armadores devido aos preços praticados pela OPEP. Entretanto, esse sistema traz muitas vantagens importantes que nos fazem pensar em perspectivas também futuras.

#### **3.3.1 Tripulação**

Uma grande tendência para os futuros navios elétricos é estarem equipados com seus sistemas auxiliares amplamente difundidos juntamente com acessórios alimentados por eletricidade para substituição dos sistemas mecânico, hidráulico e pneumático. Sistemas elétricos possuem a facilidade de se poder controlar a distância e possuem grande compatibilidade com sistemas eletrônicos. Essa compatibilidade possibilita o incremento da automação com conseqüente redução da tripulação e da exposição a acidentes.

#### **3.3.2 Projeto mais flexível**

Os equipamentos de propulsão elétrica não precisam ser posicionados próximos uns aos outros, podendo até serem instalados em compartimentos diferentes. Dependendo do tamanho das máquinas, elas podem ser instaladas em compartimentos mais altos deixando apenas o motor elétrico conectado ao propulsor no fundo do casco. Essa flexibilização desconcentra equipamentos em praças de máquinas principais; sendo possível dividir o compartimento de máquinas pelo navio, em áreas menos críticas, com uma otimização do espaço com aumento da área útil de carga. Vale lembrar que em navios de propulsão elétrica não são necessários motores auxiliares diminuindo a quantidade de motores provocando uma redução nos custos e economia de espaço.

Outro fato importante é que, como o sistema é modular, em altas velocidades podemos utilizar todos os dispositivos de geração para o acionamento principal e, nas velocidades econômicas podemos desligar aqueles que não forem necessários.

### **3.3.3 Capacidade de Sobrevivência do Navio**

A flexibilidade e modularidade do navio proporcionam um sistema de geração de energia e de propulsão redundantes, distribuídos e configuráveis. Então, caso haja algum tipo de dano a algum compartimento de máquinas, seja provocado por incêndio, alagamento ou mau funcionamento, podem ser facilmente desligados e “by-passados”, mantendo o sistema operando. Essa facilidade para redirecionamento de energia elétrica a bordo, possibilita uma elevada gama de ações para minimizar os efeitos decorrentes de múltiplas falhas simultâneas.

### **3.3.4 Vida útil**

Os navios modernos incorporam cada vez mais sensores e novas tecnologias de automação com grande complexidade tecnológica, o que os tornam mais potentes e flexíveis que os navios de gerações anteriores. Além disso, os investimentos necessários para a aquisição destes meios tem crescido numa progressão ainda maior. Com a automação dos sistemas, mais equipamentos eletrônicos e elétricos estão sendo incorporados aos navios, aumentando a demanda por energia elétrica. Isso faz com que os navios tenham a bordo geradores com potência elétrica maior a fim de suprir a demanda já instalada e manter uma reserva para o crescimento futuro.

Com a propulsão elétrica, os geradores de bordo alimentam ao mesmo tempo o sistema de propulsão e os auxiliares, tornando a distribuição redundante e reconfigurável. Os motores são dimensionados para atender ao navio em velocidade máxima com todos os sistemas operando simultaneamente. Com isso, com velocidade normal, o navio possui a capacidade de geração em excesso, capaz de atender toda a demanda com folga. Navios projetados com esse tipo de sistema podem vir a ter vida útil maior, chegando a 50 anos, contra 25 a 30 em navios com sistemas de propulsão convencionais.

### **3.3.5 Custos de Manutenção**

Uma vez que com a adoção da propulsão elétrica não são tão necessários motores auxiliares, esta redução da quantidade de equipamentos instalados resulta numa diminuição dos custos de manutenção. Associado a este fato, sabe-se que os equipamentos elétricos apresentam custos e períodos menores de manutenção devido à elevada automação dos sistemas elétricos, e as manutenções preditiva e preventiva são ferramentas eficazes para a redução dos custos totais de manutenção. [1]

### **3.3.6 Emissão de Poluentes**

Atualmente todas as Marinhas do mundo são pressionadas pelos órgãos ambientais para que seus projetos de futuros navios, e aqueles que já estão em funcionamento,

apresentem uma redução na quantidade de poluentes emitidos durante a realização das operações. Todos os tipos de poluentes emitidos estão sendo cada vez mais monitorados e as legislações e convenções, como a MARPOL, obtêm requisitos mais rigorosos, até proibindo acesso a determinados terminais portuários.

Em decorrência das pressões internacionais, busca-se utilizar cada vez menos combustíveis fósseis. As emissões de gases poluentes oriundas da queima de óleo diesel e gasolina são os maiores responsáveis pelo efeito estufa. Nesse contexto, a propulsão elétrica está fortemente indicada. Durante a operação com navios, deve-se sempre levar em conta os aspectos ambientais do transporte. Partindo desse ponto, a propulsão elétrica ganha grande cenário com suas vantagens:

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

É fácil pensar que no futuro não só os gases emitidos pelos navios em operação serão monitorados, mas também todos aqueles produzidos durante a sua construção até a sua total desativação no meio naval. Esta é uma filosofia nova e que ainda é difícil de aplicar mas está ganhando muita força devido as atitudes políticas de âmbito mundial.

### **3.3.7 Redução da Assinatura Acústica**

Na propulsão elétrica não é necessário ter alinhamento entre as máquinas acionadoras principais e suas linhas de eixo, sendo a utilização de engrenagens redutoras descartada. Isso contribui significativamente para a redução de ruídos e vibração, garantindo uma diminuição da assinatura acústica do meio. Além disso, motores elétricos apresentam menor nível de ruído irradiado, devido as suas características construtivas e, portanto, não produzem tanta vibração. Mancais magnéticos irão diminuir mais ainda essas vibrações nos próximos anos.

## 4 DA FÍSICA À APLICAÇÃO

Máquinas rotativas operam através da interação de campos magnéticos criados em partes estáticas e partes móveis. É a interação desses campos, ou seja, a tentativa de alinhar um campo com o outro (polos norte e sul magnéticos), que cria uma resultante que dá o torque do motor.

### 4.1 Leis da Física e Tipos de Motores

Os motores elétricos são basicamente máquinas que convertem energia elétrica em energia mecânica. Esse tipo de conversão pode ser feita em corrente contínua (motor CC) ou corrente alternada (motor AC). Ambos utilizam conceitos muito próximos para o funcionamento.

#### 4.1.1 O Motor CC

Quando uma corrente passa através de um condutor, linhas de fluxo magnético são geradas através dele. A direção desse fluxo depende da direção e sentido da corrente sobre o condutor.

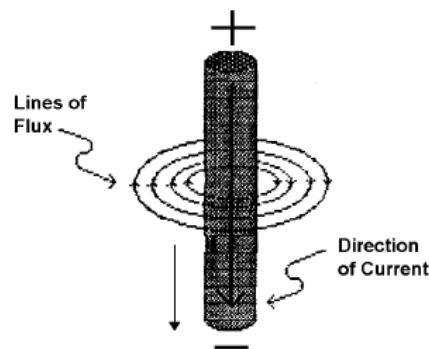


Figura 13: Um condutor e suas linhas de campo [14]

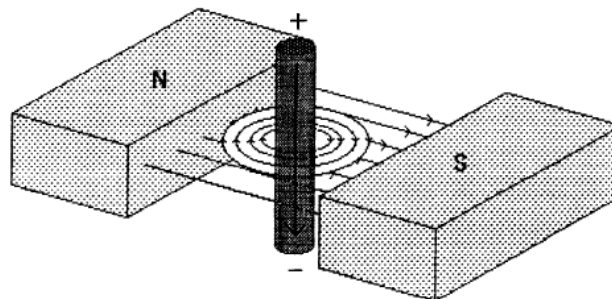


Figura 14: Linha de campo de um condutor interagindo com linhas de campo de dois ímãs [14]

Mas se colocarmos esse condutor com corrente entre dois ímãs, as linhas de fluxo magnético criado serão afetadas pelas linhas de fluxo dos ímãs.

Uma espira, feita de um fio condutor é colocada entre os dois ímãs e é livre para rotacionar. Quando essa espira é percorrida por uma corrente elétrica, os campos criados pela espira e pelos ímãs tendem a se alinhar, dando um torque a espira. A espira é alimentada por uma tensão contínua aplicada a parte girante (rotor) através de um comutador. Quando os campos da espira e dos ímãs estão próximos a se alinhas, o comutador, que é bipartido, muda o sentido da corrente na espira. Então, os campos que estavam quase alinhados agora estão opostos e procuram se alinhar novamente. Por inércia, o sentido de rotação é mantido e esse processo é repetido até que a corrente na espira seja retirada.

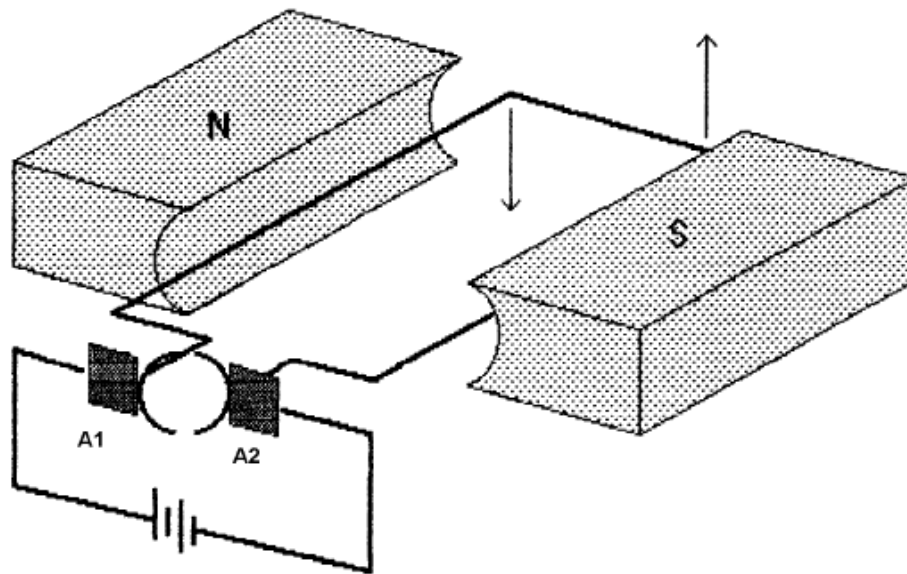


Figura 15: Modelo básico de um motor DC [14]

De forma matemática:

$$T = K_t \varphi_F I_A \quad (\text{Eq. 1})$$

$$K_t = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

T = Torque

Kt = Constante de Torque

$\varphi_F$  = Porcentagem do Fluxo

$I_A$  = Corrente na Espira, em [A]

D = Diâmetro do propulsor, em [m]

$n$  = Rotação do propulsor, em [rps]

$Q$  = Torque do propulsor, em [Nm]

$\rho$  = Densidade da água, em [kg/m<sup>3</sup>]

A velocidade de rotação do motor é determinada pela voltagem aplicada na espira:

$$N = \frac{E_T - I_A R_A}{K_v \varphi_F} \quad (\text{Eq 3})$$

Onde:

$N$  = Velocidade (rpm)

$E_T$  = Tensão nos terminais

$I_A$  = Corrente na Espira

$R_A$  = Resistência da Espira

$K_v$  = Constante de Tensão

$\varphi_F$  = Porcentagem do Fluxo Magnético

#### 4.1.2 Um pouco de física

Para entender melhor os conceitos de motores, é necessário rever conceitos importantes da física.

A Lei de Faraday nos diz que *“Uma força eletromotriz é induzida numa espira quando o número de linhas de campo magnético que a atravessa varia”*. Então, podemos perceber que um valor de tensão será induzido em uma espira se o fluxo magnético sobre ela variar.

O fluxo magnético  $\varphi$  pode ser calculado, utilizando um campo magnético  $\mathbf{B}$  sobre uma área  $\mathbf{A}$ , da seguinte forma:

$$\varphi = \oint \vec{B} d\vec{A} \quad (\text{Eq 4})$$

Pela lei de Faraday, temos:

$$\varepsilon = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{Eq 5})$$

Se considerarmos  $N$  espiras, temos:

$$\varepsilon = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{Eq. 6})$$



Como sabemos, toda diferença de potencial em um condutor gera uma movimentação de cargas negativas livres (corrente elétrica). Logo depois da lei de Faraday, foi criada uma nova regra que ficou conhecida posteriormente como lei de Lenz, que diz: *“A corrente induzida em uma espira tem um sentido tal que o campo magnético produzido pela corrente se opõe ao campo magnético que induz a corrente”*.

O valor da tensão induzida em uma espira pode ser mudado de três formas: mudando o valor do campo magnético aplicado a ela, diminuindo ou aumentando a área que o fluxo atravessa, ou mudando o ângulo do vetor campo com a orientação do plano da bobina.

### 4.1.3 O Motor AC

Os motores de corrente alternada são, de longe, os mais utilizados hoje. Eles se dividem em dois tipos: o motor síncrono e o assíncrono. Esses motores possuem uma parte estática chamada de estator e uma parte móvel chamada de rotor. As formas que essas duas partes vão interagir, depende do tipo do motor AC.

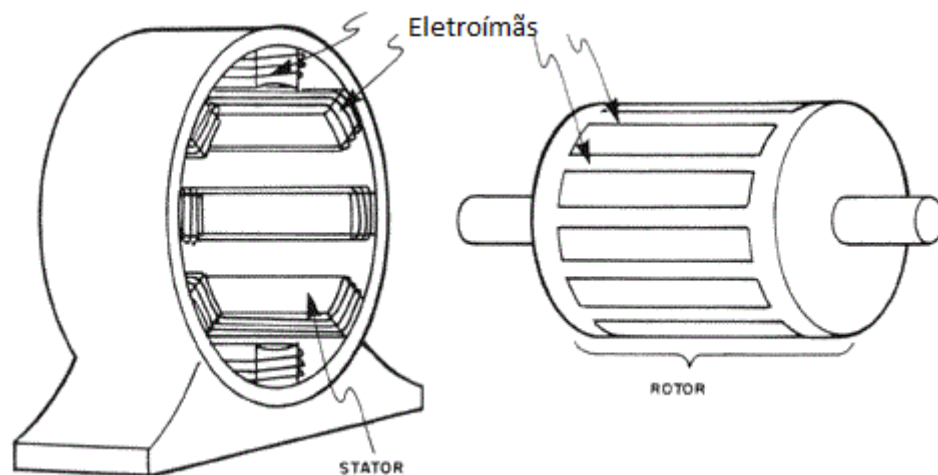


Figura 16: Estator e Rotor

(Fonte: <http://100porcentoeletricista.motoreletrico.zip.net/>)

O princípio de funcionamento de um motor síncrono pode ser facilmente visto utilizando um ímã permanente e duas bobinas. As bobinas serão alimentadas com corrente alternada e terão seus pólos magnéticos (Norte e Sul) alinhados com os pólos magnéticos do ímã permanente. Dessa forma, podemos imaginar que o ímã permanente é o rotor e as duas bobinas se situam no estator.

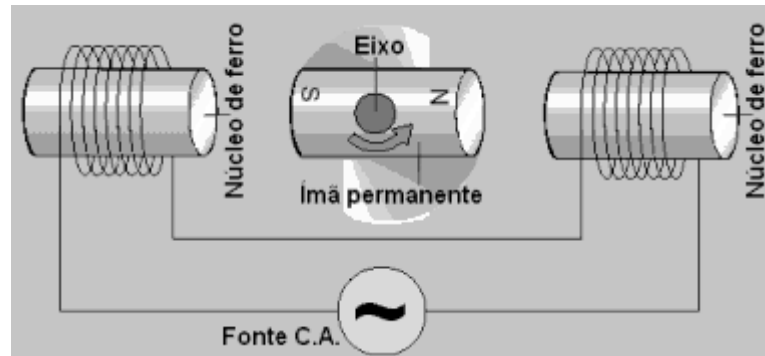


Figura 17: Esquema explicativo de um motor síncrono.

(Fonte: <http://feiradeciencias.com.br>)

Uma vez alinhados os campos magnéticos do estator e do rotor, a corrente aplicada no estator inverte. Isso faz com que os pólos se desalinhem gerando uma força de repulsão a pólos iguais e de atração entre pólos diferentes. Então, os pólos tendem a se alinhar novamente, criando um efeito cíclico que só para quando a corrente alternada for interrompida ou quando não houver fluxo magnético. Em um motor trifásico, o fluxo magnético do estator não muda de sentido. Ele fica girando em volta do rotor que gira seguindo seu campo magnético. Por conta dessas características, a velocidade do campo do rotor e do estator são as mesmas, por isso o nome síncrono.

Os motores assíncronos, também chamados de motores de indução, usam os mesmos princípios magnéticos. Entretanto, o rotor do motor de indução não é um ímã permanente. No rotor podem ser colocados barras de ferro que lembram uma gaiola de esquilo ou outros tipos de rotores. Há experimentos com ímãs de nióbio no rotor.

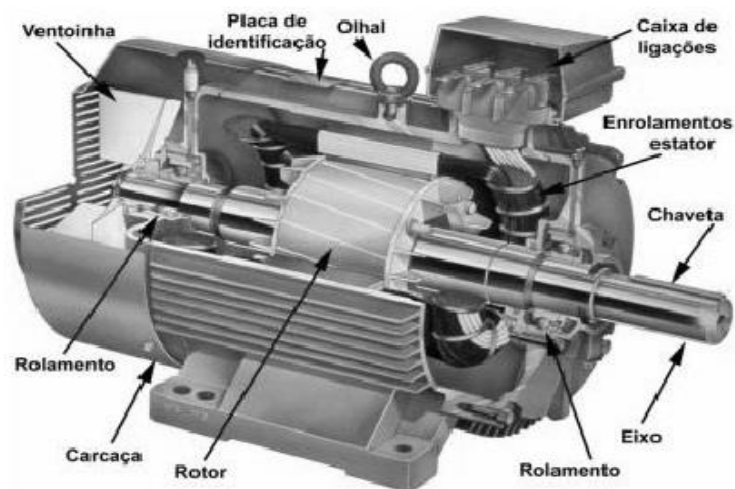


Figura 18: Motor de indução

(Fonte: <http://portaldoeletricista.com.br>)

Um motor assíncrono trabalha com indução magnética. Um motor trifásico possui bobinas em seu estator que estão sendo alimentadas por uma corrente alternada de fases diferentes. Cada bobina cria seu campo magnético que interage com os outros dois. A resultante desse vetor cria um campo magnético girante, aonde o rotor se encontra e passa a acompanhar esse deslocamento. Essa mudança constante do campo magnético resultante sobre o rotor, cria uma corrente induzida nele, como explica as leis de Faraday e Lenz. Essa corrente induzida produz um campo magnético induzido (campo magnético do rotor) e a tendência é que esse campo magnético induzido se alinhe ao campo magnético do estator, gerando torque e fazendo o rotor girar.

O fluxo é determinado pela corrente através do estator. Porém, um outro fator que determina o torque e uma outra diferença entre os motores síncronos e assíncronos é o escorregamento, sendo este é a diferença entre a velocidade do campo magnético do estator e do rotor. O escorregamento é o movimento relativo necessário no motor de indução para induzir uma tensão no rotor. Se o motor está com uma velocidade sincronizada, não existe escorregamento, não haverá indução e não haverá torque. Isso implica que um grande escorregamento, gera um grande torque. Isso é verdade até certo ponto.

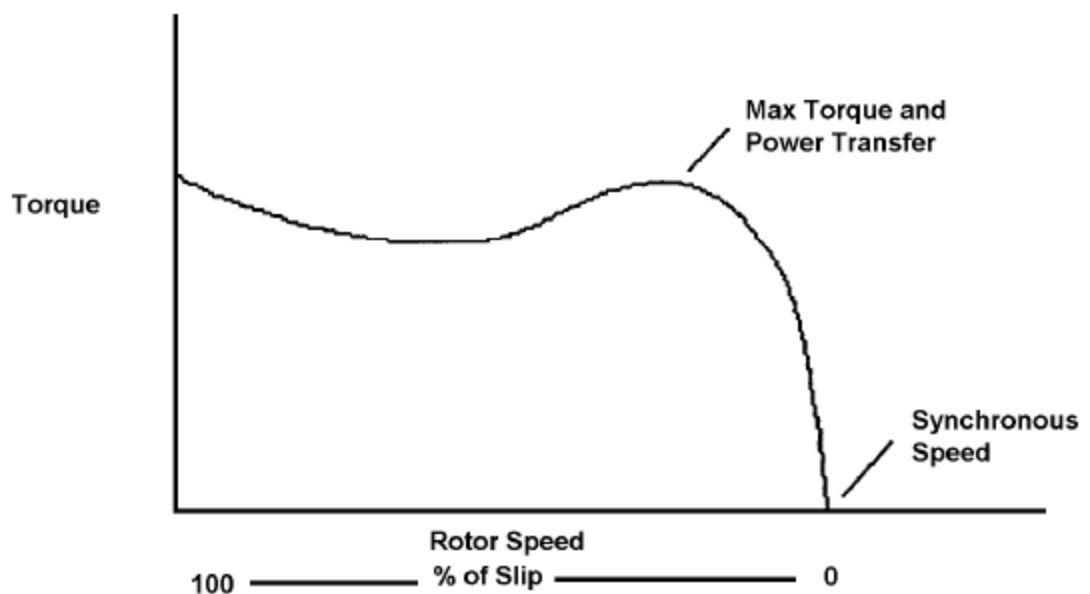


Figura 19: Curva característica de torque de um motor de indução [14]

O gráfico acima mostra que o controle do escorregamento pode manter o motor trabalhando em um ponto ótimo. A utilização da eletrônica e de controladores auxilia no

controle do escorregamento. Para isso, são usados modelos matemáticos que dirão qual velocidade/toque o motor terá a partir de uma certa frequência e tensão aplicadas.

Podemos calcular o escorregamento de um motor de indução:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde:

$s$  = Escorregamento

$n_s$  = Velocidade real do motor em rpm

$n$  = Velocidade síncrona em rpm

A velocidade síncrona pode ser calculada com:

$$n_s = \frac{120 f_{excitação}}{p} \quad (\text{Eq. 8})$$

onde:

$n_s$  = Velocidade real do motor em rpm

$f_{excitação}$  = Frequência da excitatriz

$p$  = número de polos

Se o motor girar a uma velocidade diferente da velocidade síncrona (rotação do campo girante), o enrolamento do rotor vai cortar as linhas de força magnética do campo girante e, pelas Leis do Eletromagnetismo, circularão nele correntes induzidas. Quanto maior a carga, maior terá que ser o torque necessário para acioná-la. Para obter um maior torque, proporcionalmente terá que ser maior a diferença de velocidades entre o rotor e o campo girante do estator para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta, cai a rotação do motor. Quando a carga for nula (motor a vazão) o rotor irá girar praticamente na rotação síncrona.[1]

## 4.2 Geradores

Diferentemente de outros tipos de sistemas de propulsão, os navios que utilizam propulsão elétrica não possuem motores diesel com linhas de eixo e geradores de eixo. Seu sistema é composto de um motor diesel que está acoplado a um gerador que, através de cabos, transmitem a energia para os propulsores.

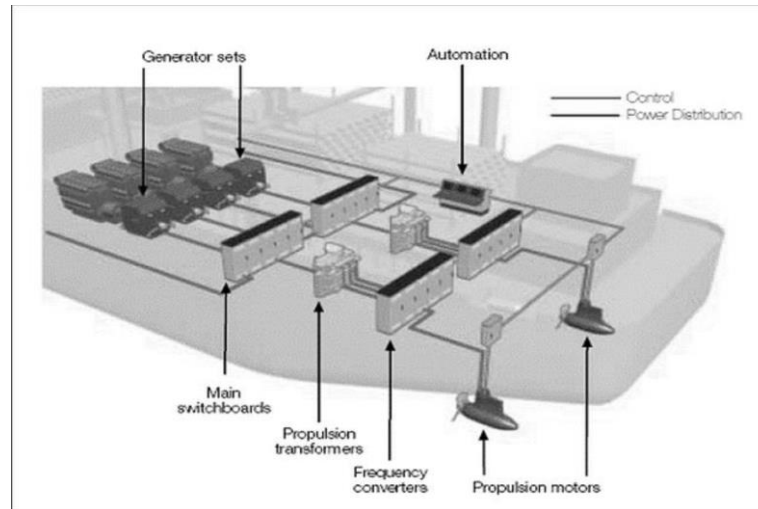


Figura 20: Equipamentos do sistema Diesel elétrico [13]

A potência requerida para um navio pode variar, levando ao aumento das tensões utilizadas na transmissão dessa energia. Um AHTS pode ter sua potência requerida em Bollard Pull por volta de 13000 kW. Por esse motivo, a manutenção e operação de geradores é essencial para um bom funcionamento de um sistema de propulsão diesel-elétrico.

#### 4.2.1 Princípio de Funcionamento

Geradores e motores utilizam do mesmo princípio físico para suas funções. Entretanto, enquanto o motor elétrico transforma energia elétrica em mecânica, o gerador faz o contrário, transforma energia mecânica em elétrica. Para isso, é possível criar um modelo simples utilizando uma espira condutora e dois ímãs permanentes.

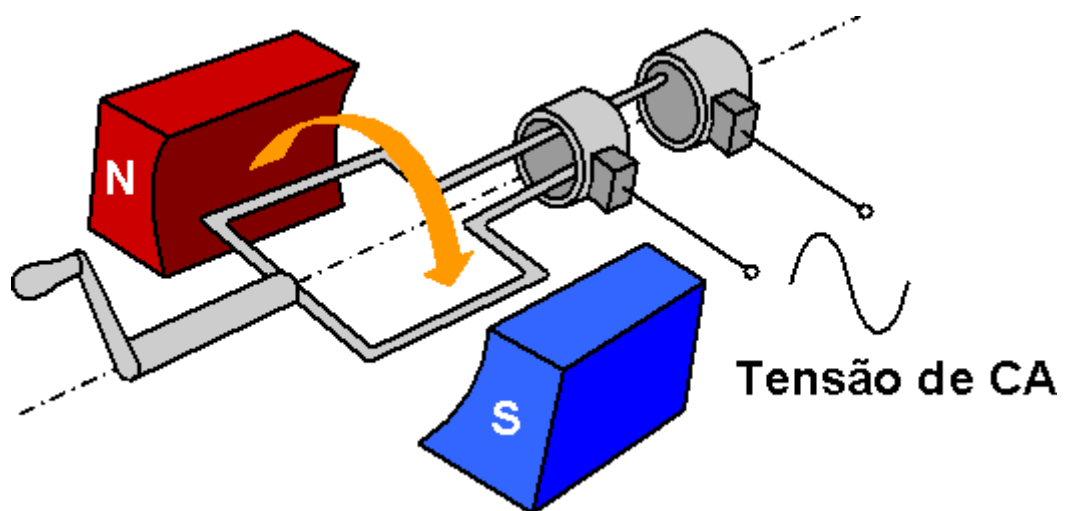


Figura 21: Esquema básico de um gerador de corrente alternada

(Fonte: [http:// http://macao.communications.museum/](http://macao.communications.museum/))

A espira condutora é colocada para girar dentro do campo elétrico uniforme oriundo do campo magnético uniforme dos ímãs. Esse giro da bobina, modifica o ângulo entre o vetor do campo e a área da bobina. Como consequência, há uma tensão induzida na espira, que é recolhida com os anéis coletores.

Pela equação 5:

$$\varepsilon = - \frac{d\varphi}{dt}$$

Sendo:

$$\varphi = \oint \vec{B} d\vec{A} \quad e, logo, \quad \varphi = BA \cos \theta$$

Temos:

$$\varepsilon = - \frac{d(BA \cos \theta)}{dt};$$

$$\varepsilon = -BA \frac{d(\cos \theta)}{dt};$$

Sendo:

$$\theta = \omega t \quad (\text{Eq. 9})$$

Então:

$$\varepsilon = -BA \frac{d(\cos \omega t)}{dt};$$

$$\varepsilon = BA\omega \sin(\omega t + \theta_0);$$

Para **N** espiras:

$$\varepsilon = NBA\omega \sin(\omega t + \theta_0);$$

Da onde tiramos:

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \sin(\omega t + \theta_0); \quad (\text{Eq. 10})$$

A partir da equação acima, verificamos que é uma equação senoidal, o que prova que a tensão induzida na espira é alternada.

#### 4.2.2 Geradores a bordo

Levando em consideração o princípio de funcionamento de um gerador, vemos que é quase impossível mantermos ímãs como principal fonte de campo magnético. Por esse motivo, assim como nos motores, utilizamos bobinas para gerar esse campo. Entretanto, essas bobinas devem ser alimentadas com uma corrente contínua (CC) para gerar um campo uniforme. A partir disso, vemos que o gerador é uma máquina síncrona que possui um rotor magnetizado com corrente contínua e um estator com trifásico (utilizaremos um gerador trifásico como exemplo) para ser induzido. A frequência  $f$  da corrente induzida no estator é proporcional a velocidade de rotação  $n$  e o número de polos da máquina síncrona:

$$f = \frac{p}{2} \frac{n}{60} \quad (\text{Eq. 11})$$

A corrente contínua é passada para o rotor através de escovas. Em geradores modernos não há excitação com escovas para reduzir a manutenção (gerador *brushless*).

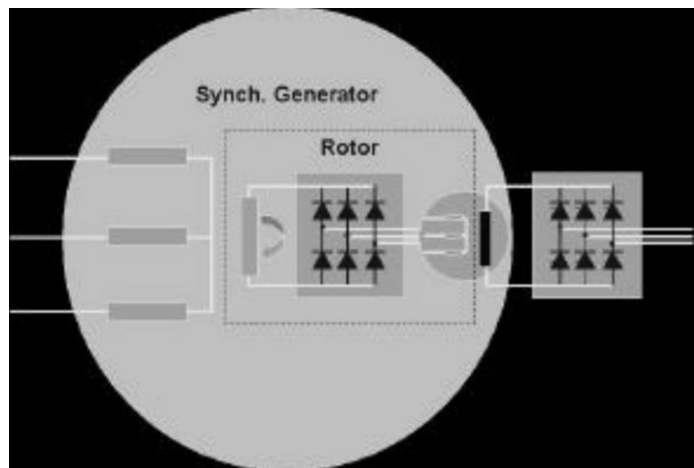


Figura 22: Magnetização sem escovas [6]

A excitação é controlada por um dispositivo automático de regulação de tensão (AVR) que percebe a tensão de geração e compara com um valor pre-determinado. De acordo com as regras, a variação da tensão estacionária nos terminais do gerador não pode exceder 2,5%, para mais ou para menos. Por esse motivo, foram adicionados ao rotor um *damper*. Damper, é um circuito que consiste em barras axiais colocadas nas extremidades dos polos do rotor em que é feito um curto sobre elas com um anel de cobre. O principal propósito do damper é

melhorar a dinâmica entre estator e rotor e evitar as oscilações de frequência para variações de carga.

Geralmente, em sistemas de propulsão diesel-mecânico, os geradores são acoplados ao eixo para aproveitar o movimento de rotação deste para gerar energia elétrica. Entretanto, em sistemas de propulsão diesel-elétrica, a energia mecânica gerada pela queima do combustível movimentam um eixo auxiliar que faz a geração de tensão. Essa tensão é distribuída para o propulsor, transformando a energia elétrica em mecânica.

### 4.2.3 Uma Análise Física de Potência

Uma das principais preocupações sobre a adoção de um sistema de propulsão, seja ele qual for, é a eficiência. Em um sistema diesel-elétrico, a necessidade de obter energia elétrica para propulsão está diretamente entrelaçada a potência mecânica gerada pela combustão do motor diesel. Então, quanto mais carga o sistema pedir, mais potência mecânica o gerador precisa para gerar mais energia elétrica. O maior interesse é que essa conversão de energia seja mais próxima do ideal.

Indo para uma análise matemática, podemos supor que dentro de um gerador exista um campo magnético uniforme  $\mathbf{B}$  que gera uma força magnética uniforme  $\mathbf{F}_B$ . Partindo desse princípio, podemos lembrar que força é um conceito diretamente ligado ao trabalho:

$$\tau = F_B \Delta S; \quad (\text{Eq. 11})$$

o que nos leva a:

$$\tau = qvB\Delta S;$$

porém, sabemos que:

$$\varepsilon = \frac{\tau}{q};$$

então:

$$\varepsilon q = qvB\Delta S;$$

$$\varepsilon = vB\Delta S;$$



sendo:

$$Pot = Fv; \quad (\text{Eq. 12})$$

$$F_B = BI\Delta S; \quad (\text{Eq. 13})$$

temos:

$$Pot = IvB\Delta S;$$

o que nos leva a quer que:

$$Pot = I\varepsilon \quad (\text{Eq. 14})$$

Então, conseguimos provar, matematicamente, que a potência efetiva do motor é completamente transformada em potência elétrica.

Entretanto, estamos tratando de uma espira e, como vimos, um gerador possui um rotor que é uma superfície. Então, podemos utilizar as equações de Maxwell para explicar o funcionamento elétrico do gerador, isso significa que:

$$\oint E ds = - \frac{d \int B ds}{dt} \text{ sobre uma superfície } S; \quad (\text{Eq. 15})$$

Considerando que S é uma superfície parada de campo variável, podemos escrever a equação acima da seguinte forma:

$$\oint E ds = - \int \frac{dB}{dt} ds \text{ sobre uma superfície } S;$$

Aplicando o teorema de Stokes na integral de linha:

$$\int (\nabla \times E) ds = - \int \frac{dB}{dt} ds;$$

Verificamos que ambas as equações são idênticas. O que nos leva a:

$$(\nabla \times E) = - \frac{dB}{dt};$$

É possível observar que se o campo não variar com o tempo,  $(\nabla \times E) = 0$  pois caímos em um sistema eletrostático e não geramos força eletromotriz.

Ainda nessa análise, a equação na forma de integral  $\oint E ds$  é a mesma da forma diferencial  $(\nabla \times E)$ . Isso nos leva a crer que:

$$\varepsilon = \oint E ds = (\nabla \times E) = - \frac{dB}{dt};$$

Comprovando a Lei de Faraday para o gerador:

$$\varepsilon = - \frac{dB}{dt} \text{ ou } \varepsilon = -N \frac{dB}{dt}, \text{ para } N \text{ espiras.}$$

## 5 TIPO DE PROPULSORES

É notório que o sistema de propulsão elétrica tem tomado espaço no meio naval e tem se mostrado uma forma de aumentar a eficiência sem aumentar os gastos. Um dos principais fatores que auxiliam a introdução desse sistema no mercado é a quantidade de aplicações que seus atuadores tem.

Com o desenvolvimento da tecnologia de propulsão, os navios passaram a utilizar atuadores em dutos e azimutais, que possibilitam a geração de empuxo na direção transversal da embarcação. Esses atuadores permitiram contra-atar esforços gerados sobre o movimento de guinada (yaw), deriva (sway) e avanço (surge), mantendo a embarcação no plano horizontal, chegando até a substituir o uso de lemes como sistema de controle de navegação.

Juntamente com as tecnologias de sistemas de posicionamento dinâmico (SPD), o sistema de propulsão elétrica tem se tornado marca para manter a operação de navios, principalmente de navios aliviadores que tem tomado as águas brasileiras desde a década de 1980 e evoluído de forma significativa a partir do século XXI.

### 5.1 Atuadores

#### 5.1.1 Propulsores em duto

Propulsores em duto são um dos atuadores mais empregados em embarcações aliviadoras com SPD. A principal característica é o propulsor no interior de um duto localizado transversalmente na embarcação. Esses atuadores são colocados mais próximos da extremidade da proa ou da popa, com o intuito de aumentar o movimento de guinada.

Em termos de projeto, o desempenho desses propulsores depende de muitos fatores:

- Tipo de seções das pás;
- Número de pás;
- Diâmetro da estrutura de suporte;
- Posição do duto em relação ao calado; e
- Relação entre comprimento e diâmetro do duto.

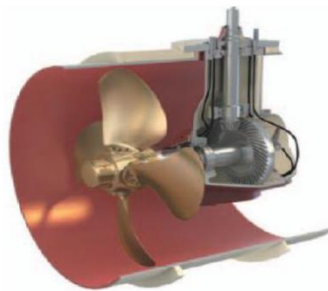


Figura 23: Vista em corte do propulsor em duto [18]

### 5.1.2 Propulsores azimutais

Propulsores azimutais são atuadores que possuem grau de liberdade para realizar um movimento de giro em torno de um eixo vertical. Esta característica permite direcionar o fluxo do propulsor em qualquer direção. Com o avanço da eletrônica de potência, esses atuadores começaram a ser largamente utilizados.



Figura 24: Propulsor Azimutal Wartsila [18]

Esses propulsores possuem grande número de variações e tem se mostrado o principal propulsor que trabalha em SPD. Este tipo de propulsor são largamente utilizados para operações específicas e são retráteis, para não aumentar a resistência ao avanço na condição de viagem. Dificilmente este tipo de propulsor será utilizado em velocidade de cruzeiro, a não ser que tenham sido projetados para tal finalidade.

### 5.1.3 Propulsor AziPull (Azipod)

Os propulsores AziPull diferem dos azimutais por conta da posição do hélice que fica de frente para o escoamento, ou seja, virado para a proa, enquanto em outras unidades o hélice fica atrás.



Figura 25: Unidade AziPull Ulstein Aquamaster [8]

O Azipod é um propulsor com um motor AC incorporado a uma unidade com passo fixo. O motor desse propulsor é controlado por um conversor de frequência que produz máximo de torque para qualquer direção.

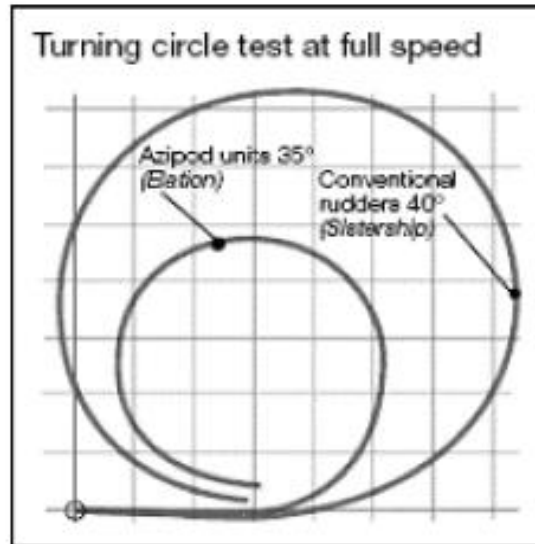


Figura 26: Teste de curva de giro [8]

Esse tipo de propulsor possui vantagens sobre qualquer outro tipo de propulsor como melhor manobrabilidade, melhor desempenho e eficiência, baixo arrasto, estabilidade de curso, baixo ruído e vibração, facilidade e flexibilidade. Atualmente, o sistema AziPull é o que possui maior eficiência de desempenho.

A melhor manobrabilidade é característica de propulsores Azimuth, Azipod e Azipull e se deve principalmente pelo fato de ser possível fazer um giro de 360° sobre um eixo vertical, permitindo seu uso na função de leme.

## 6 ESTUDOS FUTUROS

### 6.1 Introdução

A geração de energia elétrica a bordo para embarcações com sistema de propulsão elétrica é fator fundamental para que esse tipo de sistema seja aplicado a um navio. Por isso, uma maior eficiência nesta geração é crucial para se manter um navio com melhor operação e sem riscos. O avanço da eficiência de motores de combustão interna, normalmente usados para movimentar o eixo do gerador está atrelado a eficiência deste. Já foi demonstrado que toda potência mecânica é convertida em potência elétrica e, por isso, melhorando a forma de trabalho de motores tradicionais, podemos ter geradores que trabalhem com alta performance.

### 6.2 Liquid Piston X Engine

A estrutura dos motores de combustão, apesar dos avanços tecnológicos, se mantiveram praticamente as mesmas desde que foi inventado. As pesquisas de metalurgia, eletrônica, automação e manutenção tornaram este processo mais prático mas não modificaram a essência de funcionamento.

Como a eficiência é a maior característica que nos cabe com relação a operação e viagem de navios, os motores ficam presos a uma eficiência, na prática, inferior a 40% de toda a potência que ele pode conceder. Isso significa que ainda estamos conduzindo navios utilizando potência útil muito baixa e atrelados aos ciclos termonidâmicos diesel e otto, tradicionais.

A tecnologia LiquidPiston X Engine pode ser a solução do futuro para motores de combustão e, conseqüentemente, para geração de energia elétrica. Segundo o anexo A, LiquidPiston mantém uma relação de potência por peso alta (*power density*). Segundo o fabricante, essa relação fica por volta de 3.3 kW/kg (2 HP/Lb). A tecnologia também propõe uma redução de peso e tamanho por volta de 75% para motores a diesel e de 30% para motores a gasolina.

As reduções continuam quando se tratam de ruído e vibrações. Neste, a quantidade de vibração é quase zero por possuir apenas duas partes primárias que se movem, não possuir válvulas, ter uma turbulência de exaustão reduzida e não ter a necessidade de ter mufla.

A principal característica é a sua alta eficiência. A LiquidPiston reduz o consumo possível de combustível em 20% para motores Otto e de 50% para motores a diesel. Sem contar na possibilidade de utilizar outros tipos de combustíveis como gás natural e JP-8.

### 6.3 Ciclo Híbrido de Alta Eficiência

As máquinas de combustão interna sofrem com as limitações de ciclos termodinâmicos ideais e as perdas por calor e atrito. Como foi dito, no máximo 40% de toda energia química dos gases é convertida em potência útil.

Existem vários tipos de ciclos termodinâmicos que são aplicados em vários tipos de máquinas de combustão e cada um deles tem suas modificações.

O ciclo híbrido de alta eficiência (High Efficiency Hybrid Cycle) é um ciclo patenteado cujo o seu nome implica na mistura de características de vários outros ciclos como Otto, Diesel, Rankine e Atkinson para criar um processo cíclico de alta eficiência.

Abaixo é possível ver o gráfico que compara os ciclos Otto, Diesel e HEHC.

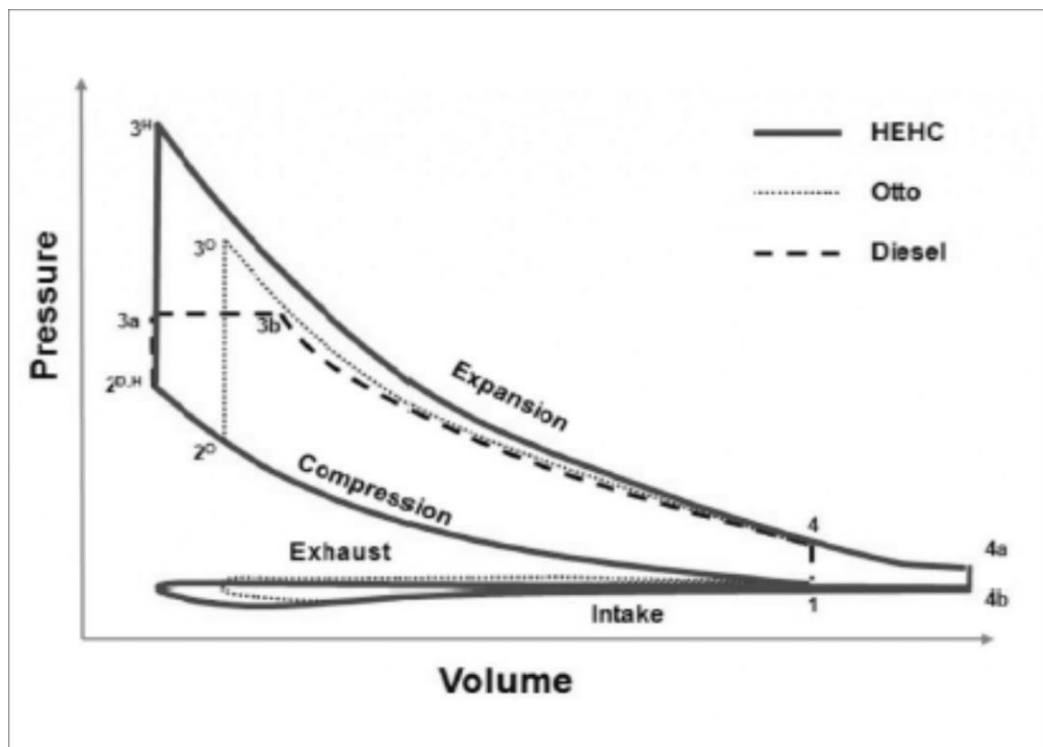


Figura 27: Diagrama qualitativo P x V de comparação dos ciclos termodinâmicos [20]

O motor X Engine vem para revolucionar a forma tradicional de motores de combustão. Evolução do motor wankel, o estudo promete uma eficiência 35% maior que nos motores Otto. Diferentemente daquele, ele possui uma taxa de compressão alta, uma combustão isocórica e uma sobre-expansão. Isso tudo funcionando com operação diferente e tendo como base o ciclo termodinâmico HEHC.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível perceber uma análise teórica do sistema de propulsão elétrica e suas vantagens com relação ao tipo de propulsão tradicional. Mais do que isso, pudemos ter uma ideia mais física do funcionamento dos principais componentes de um sistema de propulsão elétrica.

É fácil perceber que a busca por novas alternativas visam principalmente a eficiência energética e a diminuição da emissão de poluentes. Este, nos dias de hoje, tem sido pensado paralelamente àquele.

Entretante, analisar um sistema elétrico é difícil e complicado. Mais ainda analisá-lo e buscar novas ferramentas que aumentem a produção energética do sistema sem comprometer a operação e o trabalho.

Este trabalho teve como objetivo mostrar as principais vantagens do sistema de propulsão elétrica sobre o sistema de propulsão tradicional visando mostrar que o primeiro tem grande potencial no mercado.

O sistema diesel-elétrico já aplicado ao mercado atual pode ser expandido e melhor trabalhado com as novas pesquisas que estão acontecendo. As novas tecnologias como Liquid Piston X Engine tem aparecido e dando ideias para melhorar a eficiência do sistema elétrico de propulsão. Como continuação deste trabalho, um estudo mais focado na tecnologia Liquid Piston X Engine estará sendo feito e aplicado para a geração de energia elétrica. A tecnologia se mostra promissora e será testada com foco no sistema propulsivo elétrico, principalmente, em relação a operação de navios de apoio e a perspectiva de longas viagens com sistema propulsivo tipicamente elétrico.

O estudo futuro desta tecnologia será bem trabalhada e visará a evolução do uso de combustível para gerar maior potência e, com isso, aumentar a produtividade dos navios, onde a análise de funcionamento desse motor atrelado a sua eficiência e as possíveis ligações com geração de potência elétrica para navios tem grande possibilidade de abrir um novo caminho para a marinha mercante.

Novos rumos estão sendo tomados e estão sendo focados na eficiência energética. Em um mundo globalizado onde as empresas visam lucro, todo estudo minucioso é válido e podem nos levar a mares não navegados, só resta a nós descobrirmos novas rotas.



## REFERÊNCIAS

- [1] ALVES, Renata Nunes. **Propulsão Elétrica de Navios**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro
- [2] BASSHAM, Bobby A. **An Evaluation of Electric Motors for Ship Propulsion**. 2003. 97f. Thesis (Master of Science in Electrical Engineering) – Naval Postgraduate School, Auburn University.
- [3] BALASHOV, Sergey. **Design of marine generators for alternative diesel-electric power system**. 2011. 59 f. Thesis (Master of Science in Technology) – Department of Electrical Engineering, Lappeenranta University of Technology.
- [4] GOEBE, Dan M; KATZ, Ira. **Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters**. NASA, 2008. 486 p.
- [5] ÅDNANES, Alf Kåre. **Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion**. 2003. ABB AS. Marine.
- [6] BARCELLOS, Renato, 2012, “O sistema híbrido de propulsão como uma alternativa viável aos sistemas diesel-elétrico e diesel-mecânico”, *24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore*, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.
- [7] WERNECK, Daniel Santos; TROVOADO, Leandro Cerqueira; Projeto de um navio *Multi Purpose Supply Vessel*. 2007. Disponível em: <[http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod\\_academic/relatorios/atuais/DanielW+LeandroTrov/Relat1/](http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/atuais/DanielW+LeandroTrov/Relat1/)>. Acesso em: 20 de abr. 2015.
- [8] VALLE FILHO, Gilberto Dória do. **Avaliação das instalações de máquinas em navios visando redução do uso de combustível fóssil**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [9] FEIJÓO, Gabriel Coelho. **Estudo do sistema elétrico em embarcações marítimas com propulsão elétrica**. 2012. 70 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

- [10] “Bollard Pull Standard”, *Joint Industry Project, Marin*. Disponível em: < <http://www.marin.nl/web/file?uuid=2d31c060-c4b9-4fd0-a56e-8761d8fd277a&owner=9576a250-bd4c-49f0-9415-cb7fc10158de>>. Acesso em: 30 Abr. 2015.
- [11] “Dynamic Positioning”, *International Marine Contractors Association*. Disponível em: < <http://www.imca-int.com/marine-division/dynamic-positioning.aspx>>. Acesso em: 4 mai. 2015
- [12] SOUZA, Arcoverde Coelho de. **Avaliação de Sistemas Diesel Elétrico, Mecânico e Híbrido para embarcações de Apoio a Plataformas**. 2013. 87 f. Projeto de Graduação em Engenharia Naval e Oceânica – Departamento de Engenharia Naval, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [13] “Motor Fundamentals”, disponível em: <[www.ab.com/support/abdrives/documentation/fb/1019.pdf](http://www.ab.com/support/abdrives/documentation/fb/1019.pdf)>, acesso em: 11 Jun. 2015.
- [14] HALLIDAY, D.; RESNICK, R., WALKER, J., *Fundamentos da Física*. 8ª ed. Vol 3. Rio de Janeiro, 2009.
- [15] MOYJER, EJ., **Basic on Electric Motors**. 2010. University of Chicago.
- [16] PINTO, Paulo Roberto Batista. *Aplicação de uma das leis de Maxwell*. Doutorado em Geofísica – Observatório Nacional, 2014.
- [17] MORATELLI JUNIOR, Lázaro. **Principais fatores do projeto de navios aliviadores com sistema de posicionamento dinâmico**. 2010. 245 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [18] SHKOLNIK, Nikolay; SHKOLNIK, Alexander C., *High Efficiency Hybrid Cycle*, Proceedings of ICEF2005, **ASME Internal Combustion Engine Division**. Ottawa, 11-14 Set. 2005.
- [19] LIQUIDPISTON. *LiquidPiston’s X Engine*. Disponível em: <<http://www.liquidpiston.com/>>, acesso em: 20 Jul. 2015.

## ANEXO A

## LiquidPiston's X Engines

Compact, Quiet, Low-Vibration, High-Efficiency



X Mini 70cc 4-stroke gasoline engine

LiquidPiston develops advanced rotary engines based on the company's patented HEHC thermodynamic cycle and engine architecture. LiquidPiston engines are designed to be:

#### Lightweight and Compact

- High power density - up to 2 HP/Lb (3.3 kW/kg)
- 30% smaller and lighter for spark-ignition (SI) gasoline engines
- Up to 75% smaller and lighter for compression-ignition (CI) diesel engines

#### Quiet

- No poppet valves
- Exhaust turbulence minimized by over-expansion; no muffler required

#### Low-Vibration

- Only two primary moving parts, optimally balanced, resulting in near-zero vibration

#### High-Efficiency

- 20% decrease in fuel consumption possible for SI gasoline engines
- 50% decrease in fuel consumption possible for CI diesel engines

#### Multi-Fuel Capable

- Diesel, gasoline, natural gas, JP-8

#### Scalable

- From 1 HP to over 1000 HP