

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

**GUILHERME CEZAR DOS SANTOS**  
**CAUÊ MONTORSE LELLIS**

**PROPULSÃO ELÉTRICA**

**RIO DE JANEIRO**  
**2018**

**GUILHERME CEZAR DOS SANTOS**  
**CAUÊ MONTORSE LELLIS**

**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 Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador(a): OSM Ramissés

**RIO DE JANEIRO**

**2018**

**GUILHERME CEZAR DOS SANTOS**  
**CAUÊ MONTORSE LELLIS**

**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 Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

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

Orientador(a): Ramissés Cesar da Silva Ramos

---

Assinatura do(a) Orientador(a)

---

Assinatura do(a) aluno(a)

---

Assinatura do(a) aluno (a)

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma breve historia dos meios de propulsão naval utilizados pela humanidade desde que esta iniciou sua conquista pelos mares, até os tempos modernos, com o objetivo principal de demonstrar as vantagens do meio de propulsão elétrica, como redução do consumo de combustível, redução da emissão de poluentes, redução da tripulação, segurança, redução dos custos de manutenção e no custo de operação geral da embarcação, assim como a necessidade de reduzir o consumo de combustível devido ao esgotamento de combustíveis fósseis no futuro.

Palavra Chave: Propulsão Elétrica. Redução de consumo de combustível fóssi.l

## **ABSTRACT**

This research paper presents a brief history of the means of naval propulsion used by mankind since it began its conquest by the seas, until modern times, with the main objective of demonstrating the advantages of the means of electric propulsion, such as reduction of fuel consumption, reduction emission of pollutants, reduction of crew, safety, reduction of maintenance costs and the cost of general operation of the vessel, as well as the need to reduce fuel consumption due to the exhaustion of fossil fuels in the future.

Key word: Electric Propulsion. Redution of fossil fuel consumption.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	Embarcações antigos	12
<b>Figura 2:</b>	Vela triangular	13
<b>Figura 3:</b>	Vela quadrada ou redonda	13
<b>Figura 4:</b>	Turbina à vapor	15
<b>Figura 5:</b>	Ciclo de Rankine	16
<b>Figura 6:</b>	Turbina à gás	17
<b>Figura 7:</b>	Ciclo de Brayton	17
<b>Figura 8:</b>	Motor de combustão interna	18
<b>Figura 9:</b>	Funcionamento do motor de 2 tempos	19
<b>Figura 10:</b>	Funcionamento do motor de 4 tempos	20
<b>Figura 11:</b>	Ciclo Otto	21
<b>Figura 12:</b>	Ciclo Diesel	22
<b>Figura 13:</b>	Diagrama do interior de um U-boatl	23
<b>Figura 14:</b>	Barco de alta velocidade	24
<b>Figura 15:</b>	Sistema de Acionamento Elétrico Integrado	26
<b>Figura 16:</b>	Disposição de distribuição em embarcações de propulsão elétrica e mecânica e embarcações de propulsão diesel elétrica tipo POD	29
<b>Figura 17:</b>	Distribuição de espaço de diferentes tipos de navios	30
<b>Figura 18:</b>	Arquitetura do sistema de controle com redundância	31
<b>Figura 19:</b>	Eficiência em Plantas Diesel Elétricas	35
<b>Figura 20:</b>	Embarcação de apoio com dois propulsores tipo Azipods	38
<b>Figura 21:</b>	Diesel gerador	39
<b>Figura 22:</b>	Quadro elétrico principal	30
<b>Figura 23:</b>	Inversor de frequência	42

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b>	diagrama de eficiência no consumo em relação a carga na propulsão	27
<b>Tabela 2:</b>	Consumo de combustível	28
<b>Tabela 3:</b>	Taxa de emissão de poluentes	34

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>EFOMM</b>	Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>NO</b>	Óxido de nitrogênio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>ANTIGOS MEIOS DE PROPULSÃO</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Embarcações à vela</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Vela triangular</b>	<b>13</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Vela quadrada ou redonda</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>PROPULSÃO À VAPOR</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>PROPULSÃO À GÁS</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>Motor de dois tempos</b>	<b>19</b>
<b>5.2</b>	<b>Motor de quatro tempos</b>	<b>20</b>
<b>5.3</b>	<b>Ciclos termodinâmicos</b>	<b>21</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Ciclo Otto</b>	<b>21</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Ciclo diesel</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>A HISTÓRIA DA PROPULSÃO ELÉTRICA</b>	<b>23</b>
<b>6.1</b>	<b>Em que consiste a propulsão elétrica</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>RAZÕES PARA A UTILIZAÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA</b>	<b>27</b>
<b>7.1</b>	<b>Redução do Consumo de Combustível</b>	<b>27</b>
<b>7.2</b>	<b>Redução da Tripulação</b>	<b>28</b>
<b>7.3</b>	<b>Flexibilidade do Projeto</b>	<b>29</b>
<b>7.4</b>	<b>Favorecimento das redundâncias dos sistemas</b>	<b>31</b>
<b>7.5</b>	<b>Maior Vida Útil das embarcações</b>	<b>31</b>
<b>7.6</b>	<b>Redução dos Custos de Manutenção</b>	<b>32</b>
<b>7.7</b>	<b>Redução da Emissão de Poluentes</b>	<b>33</b>
<b>7.8</b>	<b>Redução da Assinatura Acústica</b>	<b>35</b>

7.9	Rendimento total	35
8	<b>EQUIPAMENTOS USADOS EM UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA</b>	37
8.1	Azimutais POD e AZIPOD	37
9	<b>GERAÇÃO DE ENERGIA A BORDO</b>	39
9.1	Distribuição de energia a bordo	39
9.2	Inversor de frequência	42
9.2.1	Vantagens do Inversor de Frequência	43
10	<b>O FUTURO DA PROPULSÃO NAVAL</b>	44
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	45

## 1 INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos, o mundo tem sofrido profundas mudanças em sua tecnologia marítima. Desde os tempos de navegação à vela, a remo e mista (vela e remo), o ser humano busca alguma forma de ter um maior desempenho de transporte de cargas ou pessoas, ou seja, transportar um maior número possível de cargas ou pessoas em uma distância maior e com um custo tanto para a construção da embarcação quanto para os gastos devido as compras de combustível, para a alimentação dos motores diesel, reduzidas.

Nos tempos modernos estudam-se inúmeras formas de construir um navio leve, resistente, rápido, com capacidade de transporte de grandes pesos e, acima de tudo, como diminuir o uso de combustível a fim de reduzir custos e a poluição causada pelas embarcações.

O sucesso obtido pela fácil operacionalidade e estabilidade de operação dos navios que utilizam motores elétricos permitirá, em curto prazo, que navios beneficiem-se das vantagens da propulsão elétrica em suas viagens, deixando de usar sistemas de engrenagens, que acarretará no aumento da vida útil do motor, redução no consumo de combustível e diminuição do volume e peso utilizados pelo sistema de propulsão.

Contudo, hoje se procura meios de substituir a propulsão convencional mecânica, que está perdendo seu mercado nos últimos 30 anos, por meio da aplicação da propulsão elétrica.

## 2 ANTIGOS MEIOS DE PROPULSÃO

**Figura 1:** Embarcações antigas



Fonte: <https://marsemfirm.com.br/egipcios-e-a-navegacao/>

Há séculos o mar representa uma importante fonte econômica, seja para a pesca, o transporte ou o comércio. No início da conquista dos mares e das descobertas das rotas fluviais, os barcos eram movidos através da força do homem utilizando remos e depois embarcações com a vela ou mista (as que utilizam vela e remo como meio de propulsão).

Egito, por exemplo, foi um dos pioneiros da navegação antigamente. Eles foram um dos povos que mais progrediram, em seu tempo, na ideia da construção naval e da marinharia. Foi tão de suma importância naquela época, não só para transporte e comércio, mas também para a construção das pirâmides, templos e outras obras arquitetônicas que estão de pé até os dias atuais, que até registavam, em forma de imagens, nas paredes dessas construções.

## 2.1 Embarcações à vela

### 2.1.1 Vela triangular

**Figura 2:** Vela triangular



Fonte: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Aparell\\_Marconi](https://ca.wikipedia.org/wiki/Aparell_Marconi)

Surgida nos anos entre 2575 e 2134 a.C. no Reino Antigo e criada pelos árabes, ela é utilizada no navio na forma que a maior parte fique acima do mastro e a menor parte para baixo. O formato dela permitia que o homem possa não só navegar a favor do vento, mas também na direção contra o vento.

### 2.1.2 Vela quadrada ou redonda

**Figura 3:** Vela quadrada ou redonda



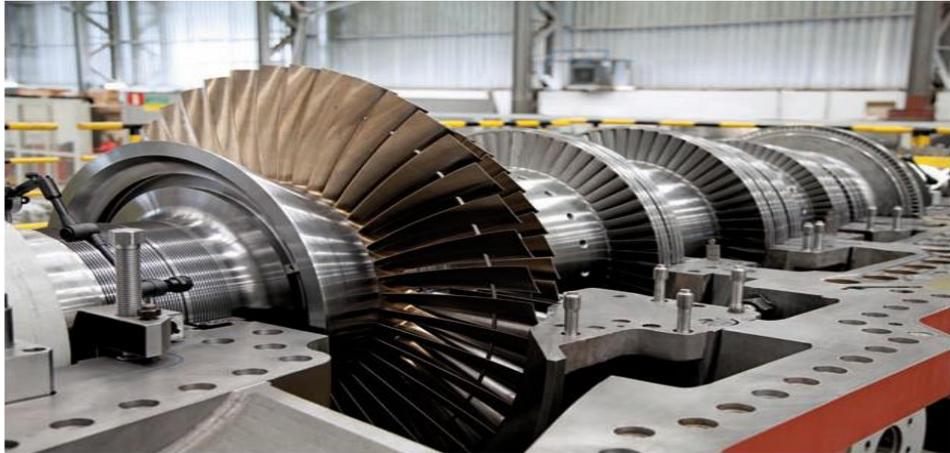
Fonte: <http://pt.nextews.com/63d51c78/>

É o tipo de vela mais antiga a qual era utilizada para fins mercantes e militares, no entanto, ela possuía um problema que era não poder navegar comum

inclinação superior a  $60^{\circ}$  em relação á direção do vento. A partir do século IX ela passou a ser substituída pela vela latina (triangular).

### 3 PROPULSÃO À VAPOR

**Figura 4:** Turbina à vapor

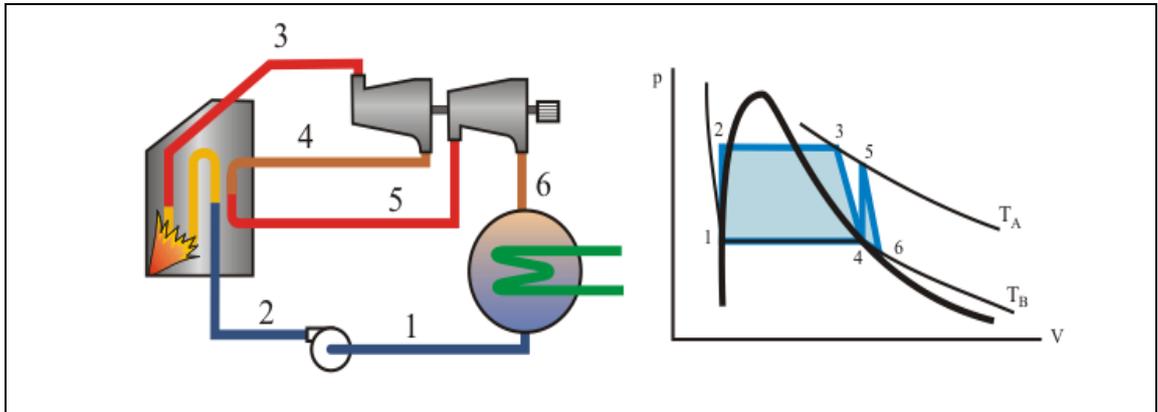


Fonte: <http://let-therebe-rock.blogspot.com/2013/05/turbinas-vapor.html>

Uma embarcação a vapor é propulsionada por uma turbina que utiliza a energia cinética do vapor (fluido de trabalho) para produzir energia mecânica que por sua vez ocasionará a movimentação do barco.

Esse tipo de máquina é chamada de máquina de combustão externa, a qual utiliza a caldeira para produzir vapor de água e será direcionado até a turbina por meio de dutos. Ao chegar nela, o vapor passará por diversos estágios onde sua energia interna diminuirá devido a sua expansão e aumento de velocidade. Após a passagem do vapor pela turbina, este será condensado em um trocador de calor, a água será redirecionada para um tanque de armazenamento de água de caldeira (tanque de expansão) e assim utilizada novamente na caldeira para produzir.

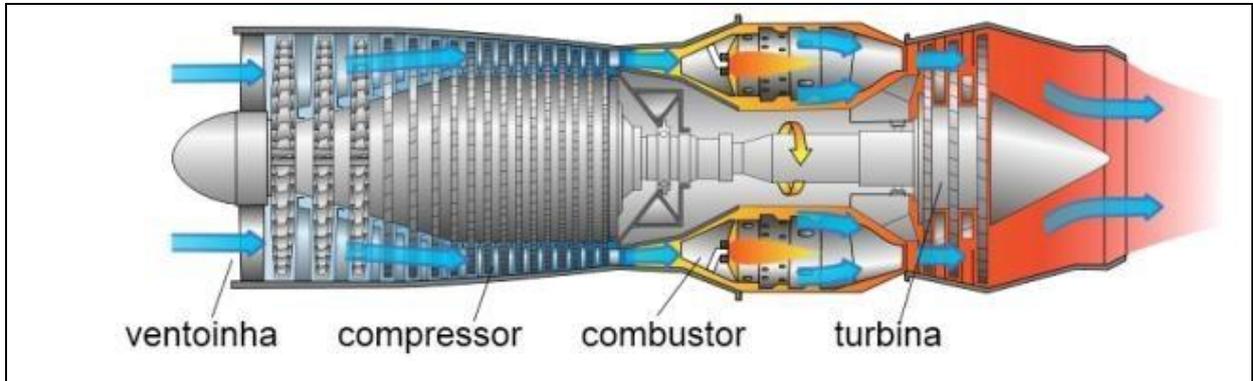
Esse ciclo respeita a ordem de outro chamado ciclo de rankine:

**Figura 5:** Ciclo de rankine

Fonte: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/44/html/rankine.html>

## 4 PROPULSÃO À GÁS

**Figura 6:** Turbina à gás



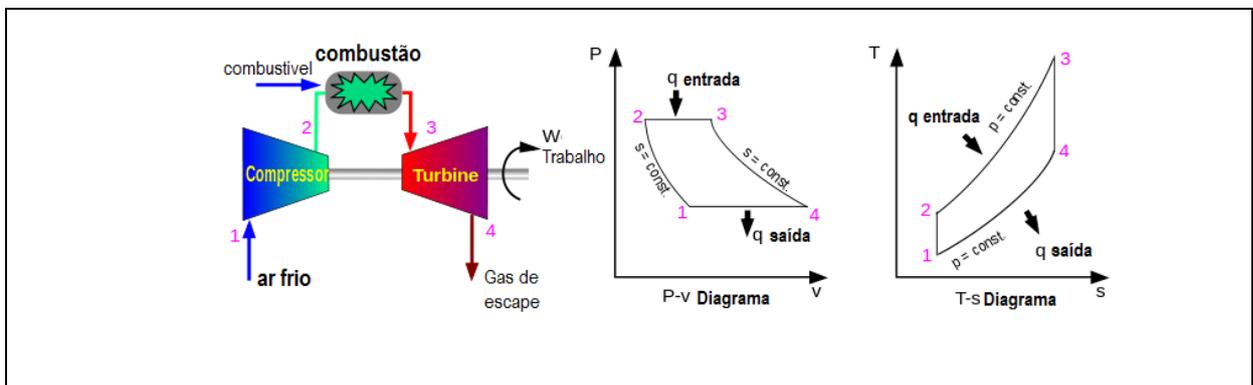
Fonte: <https://www.tecmundo.com.br/aviao/33110-como-funciona-um-motor-com-turbina-a-gas-de-um-aviao-infografico-.htm>

É uma máquina de combustão interna do tipo rotativo que utiliza princípios similares da turbina à vapor, no entanto, ao invés de vapor, utilizará gases resultantes da combustão da mistura do combustível com o ar.

Estes gases provenientes da queima geram um trabalho ao irem à atmosfera. O ar é comprimido pelos compressores de baixa pressão até o de alta pressão; chega à câmara de combustão; realiza a queima e o que resulta da queima gera um gás de alta pressão e temperatura. A expansão dele passará através das palhetas rotativas da turbina e assim acionará o eixo, produzindo potência.

Ciclo que a turbina à gás / ciclo de Brayton segue:

**Figura 7:** Ciclo de Brayton



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_Brayton](https://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Brayton)

## 5 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

**Figura 8:** Motor de combustão interna



Fonte: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao-interna.htm>

É uma máquina térmica que transforma a energia que é fornecida pela reação química da combustão em energia mecânica que será usada para rotacionar o propulsor. O processo obedece a um ciclo termodinâmico que envolve, como a turbina à vapor e a turbina à gás, como: admissão; compressão; combustão; expansão e descarga. Este tipo de máquina também utiliza como fluido do trabalho os gases provenientes da queima da mistura ar/combustível.



## 5.2 Motor de quatro tempos

**Figura 10:** Funcionamento do motor de quatro tempos



Fonte: <https://pt.slideshare.net/automobilisticafoz/principio-de-funcionamento-e-diferenas-entre-os-motores-de-combustao-ciclo-otto-e-ciclo-diesel-11805080>

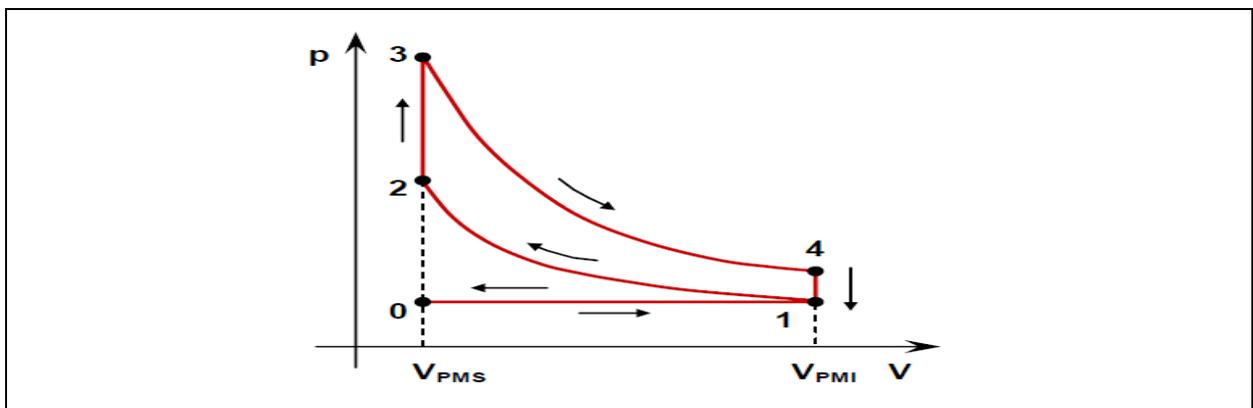
No motor de quatro tempos, um ciclo termodinâmico (podendo usar tanto o ciclo Otto quanto o ciclo diesel) é completado a cada duas voltas em torno do eixo, ocorrendo as etapas de admissão, compressão, expansão e exaustão. Esse tipo de motor necessitará do sistema de comando de válvulas para abrir e fechar as válvulas de admissão e descarga.

## 5.3 Ciclos termodinâmicos

### 5.3.1 Ciclo Otto

É um ciclo termodinâmico que descreve o funcionamento do motor de combustão interna com sistema de ignição por faísca. É o mais comumente usado em automóveis.

**Figura 11:** Ciclo Otto



Fonte: Próprio autor

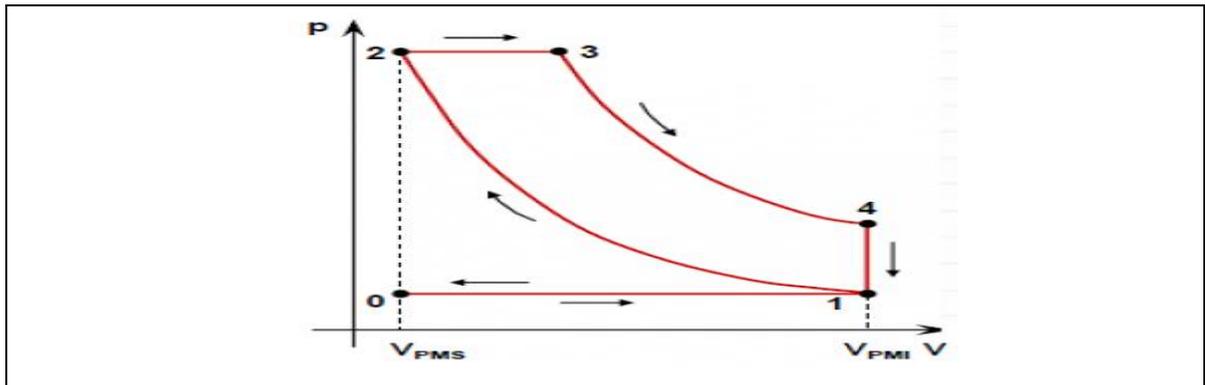
Na figura acima possui os seguintes processos ocorrendo:

- 0 – 1 Admissão do ar para a câmara de combustão;
- 1 – 2 Compressão do ar (processo adiabático);
- 2 – 3 Combustão (ignição por faísca);
- 3 – 4 Expansão dos gases (processo adiabático);
- 4 – 1 Exaustão dos gases.

### 5.3.2 Ciclo diesel

É um ciclo termodinâmico que descreve o funcionamento do motor de combustão interna sem o sistema de ignição por faísca. É o mais comumente usados em embarcações de grande porte.

**Figura 12:** Ciclo diesel



Fonte: Próprio autor

Na figura acima possui os seguintes processos ocorrendo:

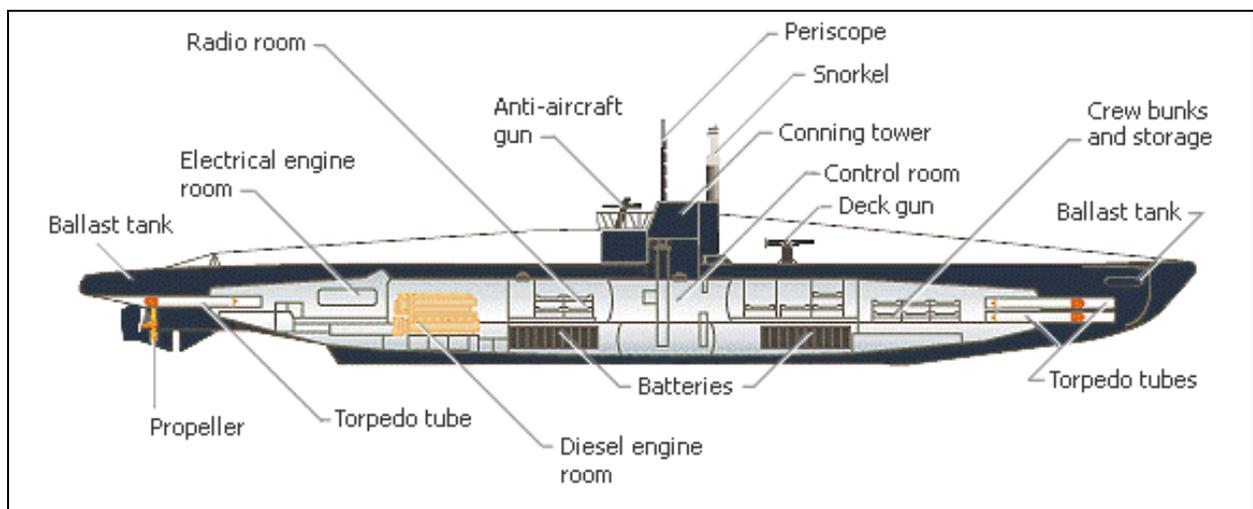
- 0 – 1 Admissão do ar;
- 1 – 2 Compressão adiabática;
- 2 – 3 Combustão isobárica;
- 3 – 4 Expansão adiabática;
- 4 – 1 Exaustão dos gases.

## 6 A HISTÓRIA DA PROPULSÃO ELÉTRICA

O conceito de propulsão elétrica não é nova, a ideia originou-se a mais de 100 anos. No entanto, com o desenvolvimento da eletrônica de potência nas décadas de 80 e 90, possibilitou-se o melhor controle de motores elétricos com velocidade variável em uma grande faixa de potência, além de ser um sistema compacto, confiável e competitivo.

A primeira aplicação de propulsão elétrica em uma embarcação ocorreu em uma pequena lancha movida a baterias para o transporte de passageiros na Rússia, no século XIX, durante essa época a propulsão elétrica era utilizada em barcos pequenos que navegavam em rios e lagos, estas pequenas embarcações utilizavam baterias de chumbo-ácido para gerar corrente e mover seus propulsores. No início do século XX, a propulsão elétrica foi adaptada para o uso em submarinos, que eram recarregadas pelo motor diesel quando este estava na superfície, e atendiam as necessidades energéticas e de propulsão enquanto o submarino estivesse submerso.

**Figura 13:** Diagrama do interior de um U-boat



Fonte: Próprio autor

Elco (Electric Launch Company) tornou-se líder da indústria, expandindo a tecnologia para outros tipos de embarcação, inclusive no famoso PT boat, uma lancha de ataque armada com torpedos largamente utilizada durante a 2ª guerra mundial.

**Figura 14:** Barco de alta velocidade



**Fonte:** [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

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 Guerra Mundial.

Durante a Segunda Guerra Mundial, mais de 160 navios de escolta dotados de propulsão elétrica foram construídos para a Marinha Americana. Aproximadamente 500 navios de pequeno porte foram também equipados com sistemas de propulsão elétrica em corrente contínua. A falta de capacitação técnica para a produção em larga escala de engrenagens foi um dos motivos que também contribuíram para o significativo aumento do número de navios com propulsão elétrica durante o período bélico.

Entretanto, por volta de 1940, os desenvolvimentos na tecnologia dos sistemas de engrenagens de dupla redução, com alto rendimento na transferência de potência, 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, causados pela utilização de simples baterias de chumbo-ácido, fez com que a expansão do uso da propulsão elétrica em larga escala não ocorresse, em detrimento da propulsão mecânica convencional.

A mudança da preferência do tipo de propulsão a ser empregada em larga escala também foi influenciada pelas melhorias tecnológicas obtidas no setor de metalurgia e na manufatura de engrenagens redutoras 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 1990, 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.

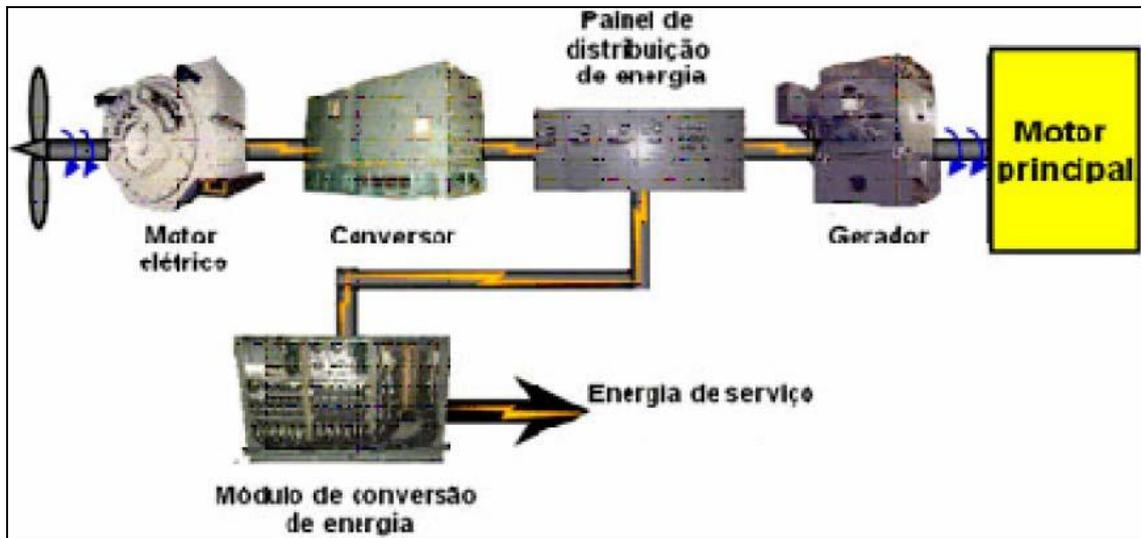
## **6.1 Em que consiste a propulsão elétrica**

Entende-se por Propulsão Elétrica um sistema constituído por um gerador elétrico, acionado por um dispositivo de acionamento principal, que fornece energia para um motor elétrico que aciona o hélice do navio. A principal característica deste sistema é o controle da propulsão da embarcação pelo motor elétrico.

No Sistema de Propulsão Elétrica ao invés de dois sistemas de potência separados, cada um com sua limitação de carga específica, passa-se a dispor de uma capacidade de geração única que pode ser distribuída com maior flexibilidade entre as diversas áreas e sistemas de bordo, de acordo com as alterações de demanda.

A Propulsão Elétrica pode ser descrita de forma mais precisa como a transmissão elétrica de potência entre o dispositivo de acionamento 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.

**Figura 15:** Sistema de Acionamento Elétrico Integrado



Fonte: [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

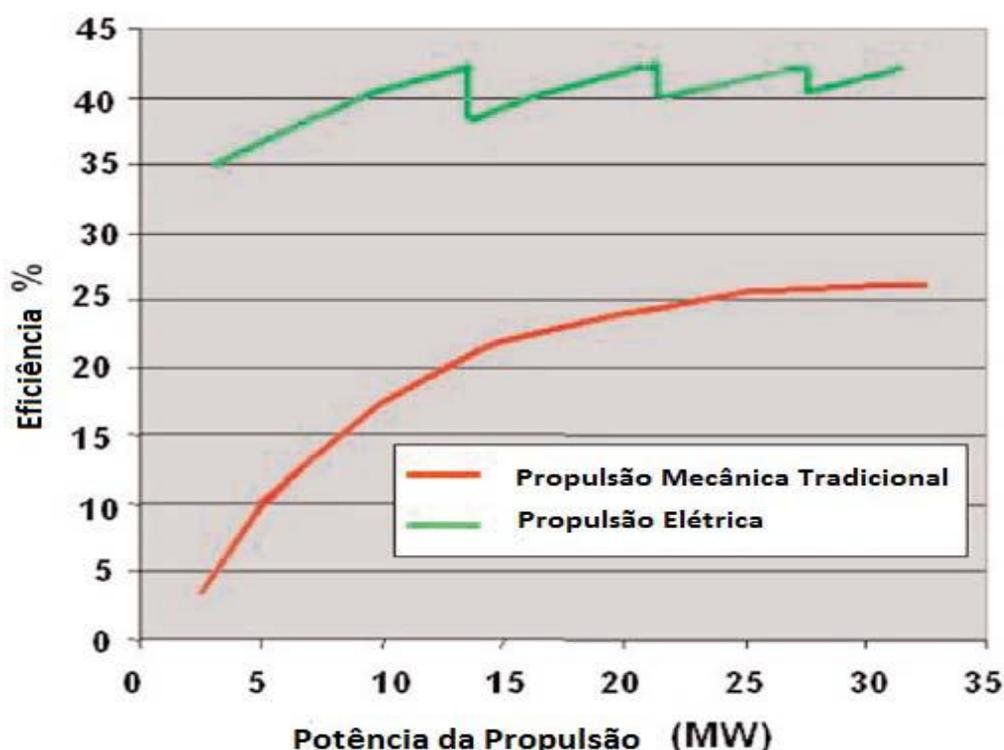
## 7 RAZÕES PARA A UTILIZAÇÃO DA PROPULSÃO ELÉTRICA

A utilização da propulsão elétrica oferece diversas vantagens em relação a propulsão mecânica, dentre elas estão:

### 7.1 Redução do Consumo de Combustível

Em embarcações de apoio marítimo com propulsão mecânica tradicional, a velocidade do motor é que define a rotação do hélice; conseqüentemente, dependendo do perfil de operação da embarcação, o motor pode não operar na faixa de rendimento ótimo, associado às altas velocidades. Isto significa desperdício de combustível e excessivo desgaste mecânico de acordo com Freire (2004).

**Tabela 1:** diagrama de eficiência no consumo em relação a carga na propulsão

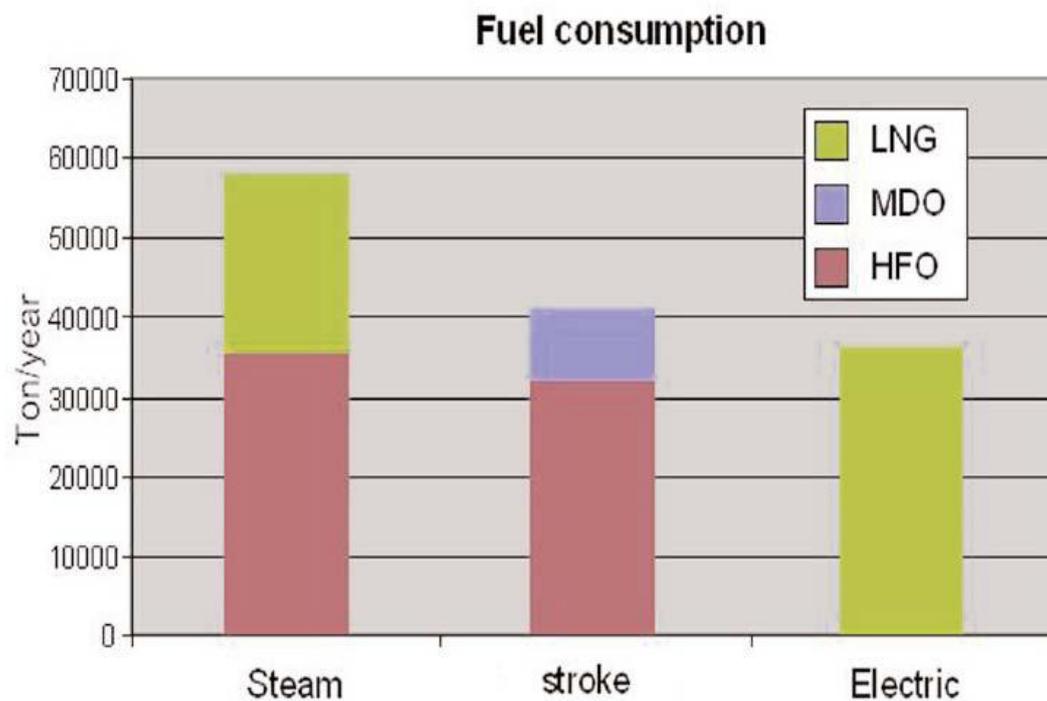


Com o uso da propulsão elétrica, este problema é eliminado, e o motor primário pode operar no ponto de melhor rendimento independente da velocidade de rotação do hélice. Em virtude da extinção da conexão mecânica entre motor primário (que gera potência através da queima de combustível) e o eixo propulsor, não existe mais relação direta entre a velocidade do eixo do motor primário e a rotação do hélice. Segundo Whitman (2001), estimou-se a eficiência energética em

aproximadamente 17% melhor que em relação à propulsão convencional mecânica de acordo com Newell (2000, p.67-85).

De acordo com a linha de pesquisa apresentada por Pereira (2006, p.12-27), 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.

**Tabela 2:** Consumo de combustível



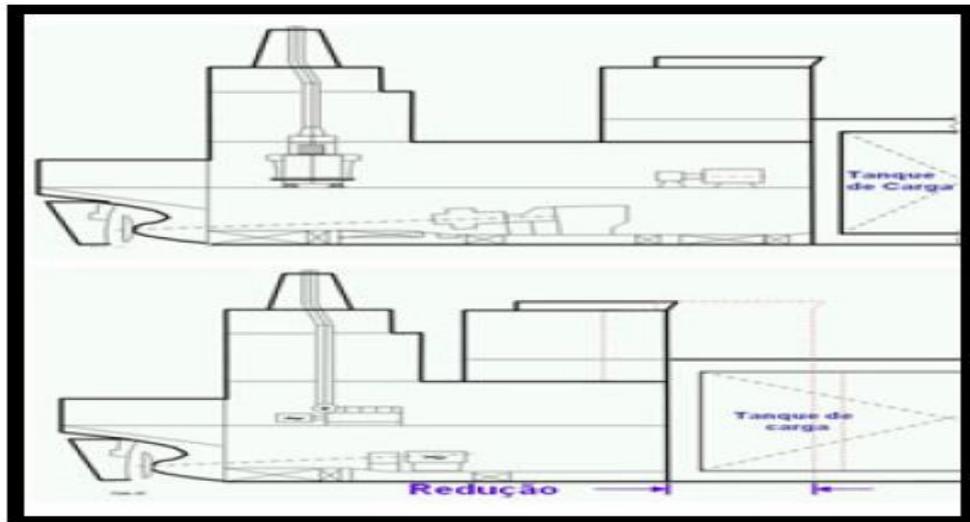
## 7.2 Redução da Tripulação

A tendência para das futuras embarcações de Propulsão Elétrica 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. Esta tendência possibilita o incremento de automação, fator este considerado na elaboração do cartão de tripulação de segurança, como conseqüente deste temos a redução de tripulação, proporcionando adicional benefício através da redução de custo operacional.

### 7.3 Flexibilidade do Projeto

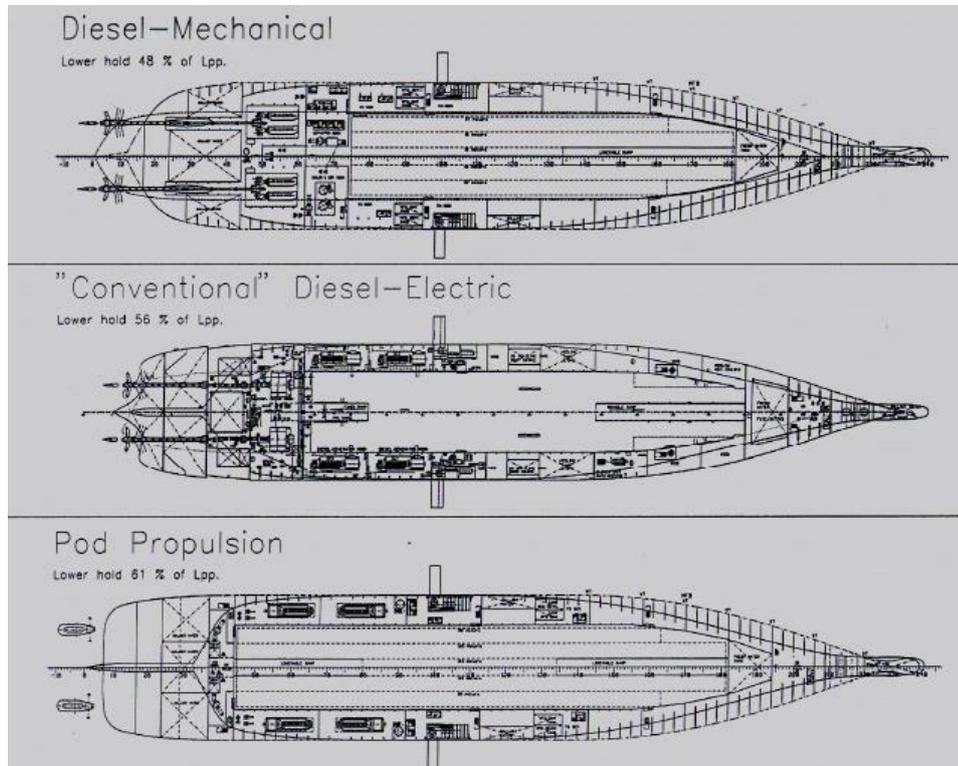
Os equipamentos da propulsão elétrica são modulares e não precisam ser posicionados próximos uns aos outros (podem inclusive ser instalados em compartimentos diferentes). Dependendo do tamanho das máquinas, elas podem ser instaladas nas partes mais altas do casco, deixando apenas o motor elétrico junto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

**Figura 16:** Disposição de distribuição em embarcações de propulsão elétrica e mecânica e embarcações de propulsão diesel elétrica tipo POD



Fonte: [www.google.com](http://www.google.com)

**Figura 17:** Distribuição de espaço de diferentes tipos de navios



Fonte: [www.google.com](http://www.google.com)

Observa-se nas Fig. 19 e Fig. 20 um ganho no espaço destinado ao 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 pela embarcação, em áreas menos críticas, com um aproveitamento otimizado do espaço disponível a bordo.

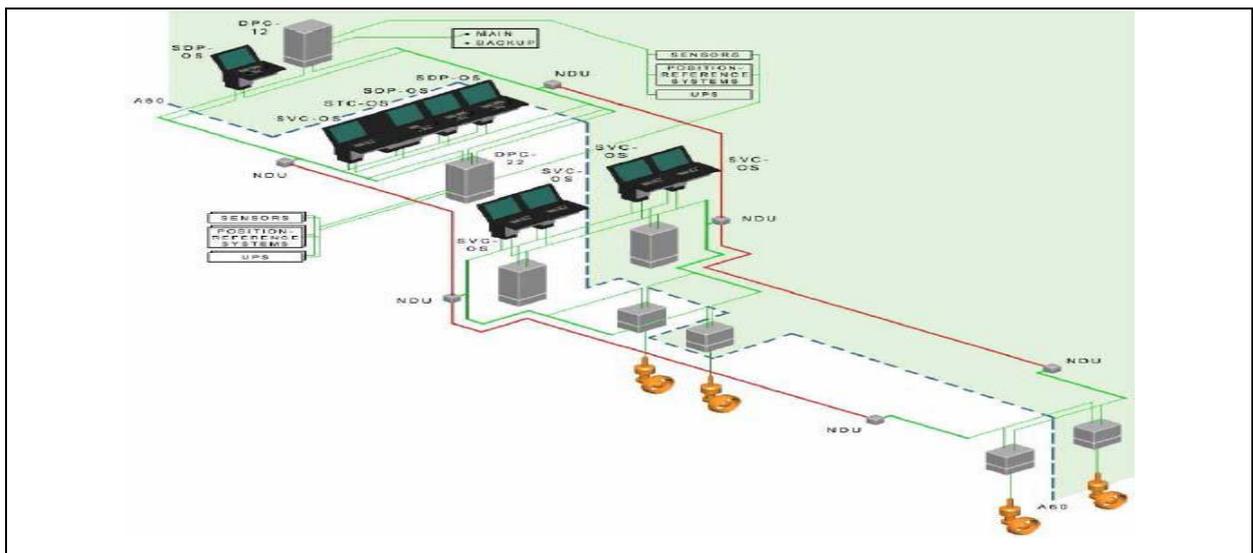
Nas embarcações com propulsão elétrica não são necessários motores auxiliares. Toda energia demandada pela embarcação será gerada pelos motores diesel. Esta diminuição na quantidade de motores também provoca redução de custos e economia de espaço.

A modularidade do sistema permite também que em altas velocidades sejam utilizados todos os dispositivos de acionamento principal e, nas velocidades econômicas sejam desligados os que não forem necessários.

## 7.4 Favorecimento das redundâncias dos sistemas

A modularidade e a flexibilidade proporcionam um sistema de geração de energia e de sistemas redundantes, distribuídos e reconfiguráveis. Conseqüentemente os danos em um compartimento de máquinas sejam provocados por incêndio, alagamento, colisão ou simples mau funcionamento, podem facilmente ser detectados e “by-passados”, mantendo-se o funcionamento do sistema para o afastamento de uma unidade, por exemplo. A facilidade para o redirecionamento da energia elétrica a bordo, possibilita uma gama de possibilidades de ações para minimizar os efeitos decorrentes de múltiplas falhas simultâneas, propiciando redundâncias.

**Figura 18:** Arquitetura do sistema de controle com redundância



Equação 1: [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

## 7.5 Maior Vida Útil das embarcações

As embarcações modernas incorporam cada vez mais sensores e equipamentos auxiliares de razoável complexidade tecnológica, que os tornam muito mais versáteis do que as embarcações 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 das embarcações tradicionais para Arrington (1998, p.23-28).

Com o evento do incremento da automação dos sistemas, nas décadas de 80 e 90, mais equipamentos elétricos e eletrônicos estão sendo incorporados nas embarcações, 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, como por exemplo, o ROV.

Com a propulsão elétrica, o cenário muda radicalmente. Os geradores de bordo alimentam simultaneamente a propulsão e os sistemas auxiliares, através de um sistema de distribuição redundante e reconfigurável. Os motores são dimensionados para atender a embarcação em carga máxima, com todos os sistemas vitais em operação. Com isto, em velocidade normal, a embarcação 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.

As embarcações projetadas com propulsão elétrica podem ter vida útil maior, da ordem de 50 anos, contra 25 ou 40 anos dos navios com propulsões tradicionais.

## **7.6 Redução dos Custos de Manutenção**

A viabilidade da existência de uma tecnologia comum dentre as diversas plataformas navais, 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 de manutenção. Associado a este fato, sabe-se que os equipamentos elétricos apresentam custos e períodos menores 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.

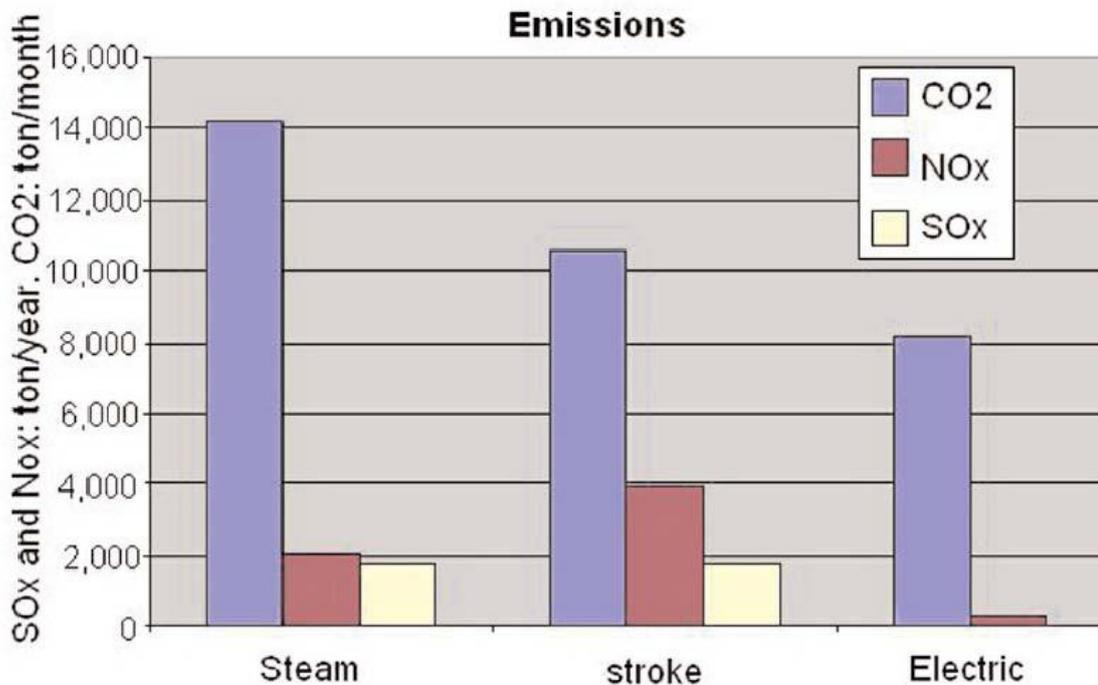
## 7.7 Redução da Emissão de Poluentes

Atualmente existe no mundo uma pressão, pelos órgãos ambientais, para que as mesmas em seus projetos de futuras embarcações, e também em relação aquelas já em funcionamento, apresentem uma redução na quantidade de poluentes emitidos durante a realização das operações. 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.

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. Neste contexto, a propulsão elétrica está sendo fortemente indicada para embarcações de apoio marítimo.

Durante a operação com embarcações, deve-se sempre levar em conta os aspectos ambientais do transporte. Neste sentido, a utilização da propulsão elétrica apresenta 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.

**Tabela 3:** Taxa de emissão de poluentes

De acordo com a linha de pesquisa apresentada em Pereira (2006) a Fig.17, apresenta claramente que 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 uma redução no consumo de combustível 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 considerou também a geração de gases durante a operação portuária e tempos com a embarcação parada e durante as viagens.

No futuro a tendência seria, não somente os poluentes emitidos durante a vida operativa da embarcação serão controlados, mas também todos aqueles produzidos durante a sua construção até o encerramento do período operativo do meio (desativação do meio naval). É uma nova filosofia, ainda de difícil aplicação prática, mas que está ganhando muita força nos dias atuais, devido à atitudes políticas de interesse mundial .

## 7.8 Redução da Assinatura Acústica

Na Propulsão Elétrica não é necessário haver o alinhamento das máquinas acionadoras principais com as linhas de eixo, tornando, portanto desnecessária a utilização de engrenagens redutoras. A eliminação desta engrenagem contribui significativamente para a redução nos níveis de ruído e vibração, garantindo desta forma uma significativa diminuição da assinatura acústica do meio, reduzindo também o custo de construção com a eliminação das linhas de eixo e redutora.

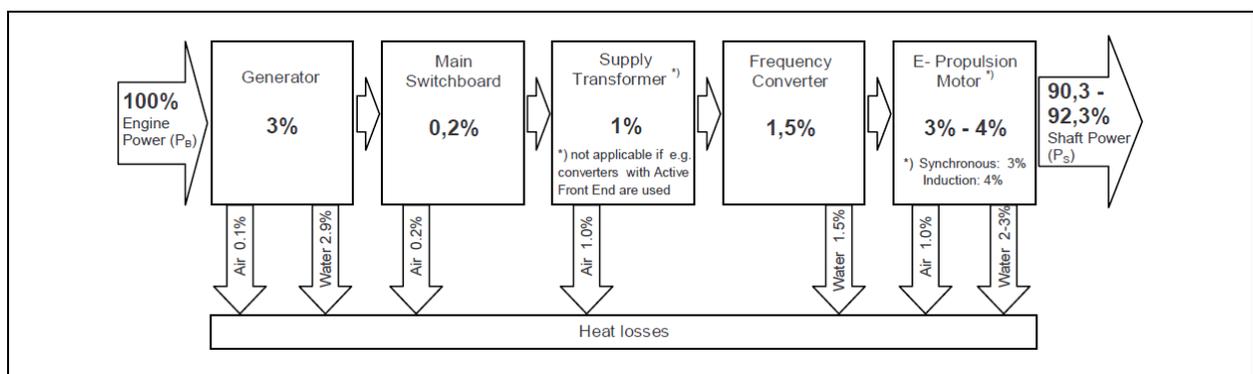
Além disto, os motores elétricos apresentam menor nível de ruído irradiado, devido às suas características construtivas e, portanto, não produzem tanta vibração e ruído quanto os equipamentos mecânicos.

E à medida que os sistemas e equipamentos que atualmente são mecânicos forem substituídos pelos elétricos, ocorrerá à diminuição da assinatura acústica emitida, podendo aumentar assim, o conforto acústico da tripulação.

## 7.9 Rendimento total

Um dos principais fatores a ser levado em consideração na escolha do sistema propulsivo e, conseqüentemente, na geração de energia de uma embarcação é o seu rendimento, desde a potência gerada pela queima de combustível no motor até a potência gerada no hélice. O diagrama a seguir mostra o rendimento total em uma planta de propulsão elétrica, assim como as perdas sofridas em cada estágio:

**Figura 19: Eficiência em Plantas Diesel Elétricas**



Fonte: [www.google.com](http://www.google.com)

Como mostra o diagrama um sistema de propulsão elétrica é capaz de entregar até 92% da potência gerada no motor para o propulsor, mostrando mais eficiência em relação à propulsão mecânica convencional, onde ocorrem perdas térmica e mecânicas em caixas redutoras de simples e dupla redução. No caso da propulsão elétrica que utilizam pods estes podem ser colocados em lugares com menor resistência e geração de atrito com o meio, diferente da propulsão mecânica onde os propulsores devem ser acoplados ao eixo.

## **8 EQUIPAMENTOS USADOS EM UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA**

### **8.1 Azimutais POD e AZIPOD**

Propulsor azimutal é um sistema de propulsão capaz de girar 360° dispensando o uso de leme e dando maior manobrabilidade a embarcação. Além dessa principal vantagem, a propulsão azimutal também é mais eficiente que a convencional graças ao uso de motores elétricos, ela faz melhor uso das dimensões da embarcação conferindo mais espaço para outras instalações, os custos de manutenção também são menores. Os propulsores azimutais podem apresentar transmissão mecânica ou elétrica, sendo que na segunda o motor fica localizado fora do casco da embarcação eliminando a necessidade de caixa de transmissão, já nos modelos tradicionais de transmissão mecânica onde o motor fica localizado no interior da embarcação o torque chega até a embarcação graças ao sistema de transmissão que pode ser do tipo Z-drive ou L-drive.

De acordo com Harrington (1970) o conjunto gerador-motor elétrico pode ser tratado como um sistema de transmissão elétrico. O primeiro projeto de Pod propulsor foi concebido em 1955, quando Pleuger e Busmann projetaram o sistema e o patentearam nos Estados Unidos (PÊGO, 2005). Em 1990, a ABB lançou no mercado o mesmo conceito de propulsão aprimorado para aplicações comerciais, denominado Azipod. Basicamente, o sistema consiste de um motor elétrico, alojado dentro de um Pod adequado para fornecer melhor escoamento do fluido, conectado a um hélice. Este conjunto é instalado na parte externa do casco e possui capacidade de girar 360° em torno do seu próprio eixo.

**Figura 20:** Embarcação de apoio com dois propulsores tipo Azipods



Fonte: [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

## 9 GERAÇÃO DE ENERGIA A BORDO

A energia de bordo é gerada usando um motor principal e um alternador trabalhando juntos. Para isso, um gerador de corrente alternada é usado a bordo. O gerador trabalha com o princípio de que quando um campo magnético em torno de um condutor varia, uma corrente é induzida no condutor.

**Figura 21:** Diesel gerador



Fonte: <http://www.nauticexpo.com/pt/fabricante-embarcacao/grupo-gerador-energia-navio-36963.html>

### 9.1 Distribuição de energia a bordo

O poder distribuído a bordo de um navio precisa ser fornecido de forma eficiente em todo o navio. Para isso, o sistema de distribuição de energia do navio é usado.

**Figura 22:** Quadro elétrico principal



Fonte: <https://www.naval.com.br/ngb/M/M079/M079.html>

O gerador consiste em um conjunto estacionário de condutores enrolados em bobinas em um núcleo de ferro. Isso é conhecido como o estator. Um magneto rotativo chamado rotor gira dentro deste estator produzindo campo magnético. Este campo atravessa o condutor, gerando uma força eletromagnética induzida, pois a entrada mecânica faz com que o rotor gire.

Um sistema de distribuição de bordo consiste em componentes diferentes para distribuição e operação segura do sistema. Eles são:

- Gerador de Navios composto por motor principal e alternador

Placa do interruptor principal, que é um invólucro de metal, recebendo energia do gerador a diesel e fornecendo-o a diferentes máquinas.

- Barramentos que atuam como transportadores e permitem a transferência de carga de um ponto para outro. Os disjuntores que atuam como interruptor e em condições inseguras podem ser acionados para evitar avarias e acidentes. Fusíveis como dispositivo de segurança para máquinas.
- Transformadores para aumentar ou diminuir a tensão. Quando o fornecimento é dado ao sistema de iluminação, é utilizado um transformador redutor no sistema de distribuição.
- Em um sistema de distribuição de energia, a tensão na qual o sistema funciona normalmente é de 440 v.

- Existem algumas grandes instalações onde a tensão é tão alta quanto 6600 v.
- A energia é fornecida através de disjuntores para grandes máquinas auxiliares em alta tensão.
- Para fusíveis de alimentação menores e disjuntores miniatura são usados.
- O sistema de distribuição é de três fios e pode ser isolado de forma neutra ou aterrado.
- O sistema isolado é mais preferido em comparação com o sistema de aterramento, porque durante uma falha de aterramento, máquinas essenciais, como o mecanismo de direção, podem ser perdidas.

## 9.2 Inversor de frequência

**Figura 23:** Inversor de frequência



Fonte: <https://projetos.habitissimo.com.br/projeto/inversores-de-frequencia>

Inversor de frequência também chamado de conversor de frequência, é um dispositivo de conversão de controle de energia para converter fonte de alimentação normal para outra frequência de energia por semicondutores de potência interna de ligar / desligar comportamentos, para controlar motores elétricos em operações de velocidade variável. O controle de frequência variável está mudando a alimentação de frequência para os enrolamentos do estator do motor para alcançar a finalidade de controle de velocidade variável.

O inversor de frequência é composto principalmente de retificador (CA a CC), filtro, inversor (CC para CA), unidade de frenagem, unidade de acionamento, unidade de detecção e micro unidade de processamento etc. O circuito de controle controla o circuito principal, o circuito retificador converte energia CA em corrente contínua, circuito intermediário CC suavizando a saída do circuito retificador, então o inversor do circuito inverte a corrente contínua em corrente alternada novamente.

### 9.2.1 Vantagens do Inversor de Frequência

Resumidamente, um inversor de frequência tem as seguintes vantagens importantes:

- Proteção contra sobrecorrente, especialmente útil ao controlar motores com alta inércia.
- O torque constante garante maior alcance do controle de velocidade, permitindo um controle eficiente de energia em toda a faixa.
- O inversor de frequência atua como uma barreira entre todos os distúrbios de tensão de entrada, como harmônicos, ondulações, quedas, surtos, etc., e impede que eles entrem no motor.
- Uma carga resistiva pode ser simplesmente controlada variando a tensão aplicada. Mas o controle de cargas indutivas como um motor AC definitivamente não é tão simples e pode ser feito somente através de inversores de frequência.

## 10 O FUTURO DA PROPULSÃO NAVAL

Esta é uma das mais importantes questões da atualidade, o tipo de energia e o meio de propulsão a ser utilizado no transporte naval. Hoje os tipos de combustível mais utilizados são o óleo pesado, ou bunker e o diesel marítimo, ambos derivados do petróleo, que é um recurso não renovável.

O petróleo é formado através da sedimentação de matéria orgânica por um período de centenas de milhões de anos, por esta razão é certo de que quando suas reservas chegarem ao fim será impossível utilizá-lo como meio de geração de energia. Não se sabe exatamente quando isto irá ocorrer, há projeções que indicam que isto ocorrerá daqui a 50, 60, 70 ou até 100 anos, já que nem todas as reservas e poções foram encontrados, mas o que se sabe é que isso irá ocorrer.

Várias alternativas estão sendo pensadas quanto a este problema, como a substituição do petróleo pelo gás natural, ou GNL, como principal fonte de energia, ou pela utilização de hidrogênio como combustível, a utilização de biocombustíveis, baterias carregadas por painéis solares ou energia eólica, mas a maioria destes meios são muito caros ou inviáveis atualmente, ou gerarão problemas em outros setores.

O GNL seria uma boa alternativa, mas traz grandes riscos na questão de armazenamento, já que serão necessários grandes quantidades de gás para abastecer um navio, o mesmo ocorre com o hidrogênio, que é caro de produzir e teria que ser armazenado em sua forma líquida, gerando grandes problemas logísticos.

O que é certo é que o petróleo continuará sendo o principal meio de geração de energia no meio naval, e o consumo de óleo mundial continuará aumentando devido às necessidades energéticas populacionais, a propulsão elétrica é a melhor alternativa a curto e médio prazo para atender as demandas na redução do consumo e poluição exigidos atualmente.

## Referências

ADNANES, Alf Kåre. **Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion**. 2012. Disponível em: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c348ae87dd99ce5cc12574e30023fede/\\$file/maritime%20el%20installations%20and%20de%20propulsion.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c348ae87dd99ce5cc12574e30023fede/$file/maritime%20el%20installations%20and%20de%20propulsion.pdf)> Acesso em: 05 jul. 2018.

ALVES, Renata Nunes. **PROPULSÃO ELÉTRICA DE NAVIOS** . 2007. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- UFRJ, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2007102901.pdf>>. Acesso em: 03 jul. 2018.

ARRINGTON, J., W. **The Analysis of Components, Designs, and Operation for Electric Propulsion and Integrated Electrical System, Master of Science in Electrical Engineering**, Naval Postgraduate Sch.ool (NPS). Monterey. California, USA, 1998.

BOSCH, Robert. Manual de Tecnologia Automotiva. 25. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2005.

CHRISTENSEN, Stanley G. Lamb's Questions and Answers on the Marine Diesel CORBUSIER, Marcelly. Propulsão elétrica nos navios mercantes. Escola de Formação de Oficiais da Marinhas Mercante. Monografia, 2007. 41 fl.

CUVRU, P. Magot. Motores Diesel. 4. ed., HEMUS-Livraria Editora Ltda., 1978. Engine. Second Impression. London: Eighth Edition, 1992.

FREIRE, P., R., M., FERREIRA, C., L.. **Propulsão Elétrica – Histórico e Perspectivas Futuras**. 20º Congresso Nacional de Transporte Marítimos. Construção Naval e Offshore – EXPONAVAL 2004, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.

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.

MCCOY, T., J. **Trends in Ship Electric Propulsion Power Engineering Society Summer Meeting**. Vol. 1, pp. 343-346, IEEE, 2002.

MESQUITA, João Lara. **Egípcios e a Navegação** : Potência marítima aos faraós. 2017. Disponível em: <<https://marsemfim.com.br/egipcios-e-a-navegacao/>>. Acesso em: 03 jul. 2018.

NEWELL, J., M., YOUNG, S., S. **Beyond Electric Ship**. Transactions IMarE, Vol. 112, 2000.

NORRIS, A. C. Eng., F. I. Mar. E. Marine Engineering Practice. Institute of Marine Engineers.

PÊGO, J., LIENHART, H., DURST, F. BRADRAN, O., **Construction of a test facility for the research of ship propulsion systems.** Emirates Journal for Engineering Research, 10 (2), 1-8. 2005.

PEREIRA, N., N., BRINATI, H., L. **Estudo do Impacto da Propulsão Diesel-Elétrica Na Emissão de Gases Poluentes.** 22º Congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção Naval e Offshore – EXPONAVAL 2006, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.

SMITH, S., WILLIAMSON, S., HODGE, C. **Direct Drive Marine Propulsion Motors.** ICEM Conference, Brugge. 2002

ROY, G. J. C. Eng., FIMarE, MRINA Steam Turbines and Gearing Questions and Answers.

SCHEGLIÁIEV, A. V.. Turbinas de Vapor. Parte 1 e 2.