

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

**ANDRÉ EMETERIO ROSARIO**

**GERAÇÃO DE ENERGIA A BORDO**

**RIO DE JANEIRO**

**2015**

**ANDRÉ EMETERIO ROSARIO**

**GERAÇÃO DE ENERGIA À BORDO**

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: Prof. Eng. José Barbosa da Silva Filho, ESP

**RIO DE JANEIRO**

**2015**

**ANDRÉ EMETERIO ROSARIO**

**GERAÇÃO DE ENERGIA À BORDO**

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: Prof. Eng. José Barbosa da Silva Filho, ESP

---

Assinatura do Orientador

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

## **AGRADECIMENTOS**

Todos aqui devem ser lembrados, pois de forma direta ou indireta contribuíram com o meu amadurecimento nesse tempo que passei aqui na Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante, são eles: Hélio, o meu coach; os meus amigos do X-313 de 2013 e o pessoal do X-214 de 2015; e claro meu pai e minha mãe. Pessoas importantes que merecem meus sinceros agradecimentos.



## RESUMO

Geração de energia elétrica a bordo é algo muito importante já que exerce influencia no frete, na habitabilidade da embarcação e também na operação dos sistemas contidos no navio. Portanto se faz necessária uma análise dos tipos de obtenção de energia, suas vantagens, desvantagens e funcionamento. Também não se deve desprezar o impacto ambiental dessas tecnologias já que a própria IMO estabeleceu uma convenção voltada para esse fim, a Marpol.

Palavras chave: geração, energia elétrica, navegação, eficiência, diesel gerador, energia nuclear, célula combustível

## **ABSTRACT**

The electrical energy generation on board is a really important issue because it influences the price of the transportation of goods, the living conditions of the vessel and the operation of the systems in general. With that in mind it is necessary to evaluate the type of power generation, advantages, disadvantages and how it works. Another thing to analyse is the environmental impact of the power generation, even IMO have a convention called Marpol to discuss the necessary actions to take on related to it.

Key words: power generation, navigation, efficiency, nuclear energy, fuel cell, diesel generator.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

- Figura 1 - Pistão no cilindro e os processos de um motor 4 tempos
- Figura 2 - Conversão de movimento alternativo para rotativo
- Figura 3 - Esquema de gerador mostrando excitatriz, ponte retificadora e motor.
- Figura 4 - Ciclo diesel real  $P \times V$  de um motor 4 tempos
- Figura 5 - Exemplo de perdas de potência no motor diesel
- Figura 6 - Fluxo de potência no gerador de indução
- Figura 7 - Princípio de ação e reação
- Figura 8 - Expansor e comparação dos parâmetros do vapor antes e depois
- Figura 9 - Reação de fissão de um núcleo de urânio
- Figura 10 - Fusão nuclear de dois átomos de hidrogênio formando hélio
- Figura 11 - Funcionamento de um reator nuclear
- Figura 12 - Perdas de energia de uma máquina térmica para geração de energia elétrica
- Figura 13 - Diagrama  $T \times S$  para o ciclo Rankine
- Figura 14 - Desenho esquemático de uma célula combustível
- Figura 15 - Motor de combustão interna
- Figura 16 - Representação de um átomo
- Figura 17 - Célula combustível

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - emissões de um motor utilizando HFO na queima

Tabela 2 - Tabela comparativa entre os tipos de geração de energia estudados

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VHF - *Very high frequency* (alta frequência)

GPS - *Global positioning system* (sistema de posicionamento global)

MCI - Motor de combustão interna

PMS - Ponto morto superior

PMI - Ponto morto inferior

HFO - *Heavy Fuel oil* (óleo combustível pesado)

MDO - *Marine diesel oil* (óleo diesel marítimo)

CA - Corrente alternada

CC - Corrente contínua

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>DIESEL GERADOR</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Funcionamento</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Eficiências e perdas</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Riscos ecológicos</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>ENERGIA NUCLEAR</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Funcionamento</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Eficiências e perdas</b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Riscos ecológicos</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>CÉLULA COMBUSTÍVEL</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Funcionamento</b>	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Eficiências e perdas</b>	<b>27</b>
<b>4.3</b>	<b>Riscos ecológicos</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>COMPARATIVO</b>	<b>29</b>
<b>5.1</b>	<b>Diesel gerador</b>	<b>29</b>
<b>5.2</b>	<b>Energia nuclear</b>	<b>30</b>
<b>5.3</b>	<b>Célula combustível</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das principais características de uma embarcação é sua autonomia, que consiste no tempo máximo em que ela pode se manter em operação com a quantidade de água potável, víveres e combustível. De certo modo o que justifica uma embarcação estar em pleno funcionamento na área mercante, é justamente sua capacidade de gerar lucro ao armador.

Dentro dessa definição de autonomia, podemos dizer que um fator de extrema importância é a energia elétrica gerada a bordo, pois ela influencia diretamente nas condições de habitabilidade e conseqüentemente na operação do navio.

Tendo isso em vista, é claro que conforme o surgimento de novas tecnologias a forma como se gera energia foi sofrendo modificações para que o navio obtivesse o maior desempenho em navegação, e também maior conforto para a tripulação. Só para destacar o quanto a energia elétrica é crucial para a melhora da navegação, sabemos que os equipamentos do passado como radar, VHF, GPS, agulha giroscópica precisam ser alimentados com este tipo de energia para funcionar, sem contar a iluminação.

Outro fato importante a ser mencionado é que atualmente o tipo de geração de energia elétrica mais utilizado é o diesel gerador, que “transforma” a energia mecânica em elétrica. Porém não é porque ela é a mais amplamente utilizada que é considerada a mais eficiente.

Em verdade existem algumas soluções que podem ser mais energeticamente mais eficientes e viáveis, uma vez que considerarmos certos fatores da geração pela queima de combustíveis fósseis como: eficiência do conjunto, instalação dos subsistemas necessários, manutenção (de compressores, cabos, purificadores etc) e também o ecológico.

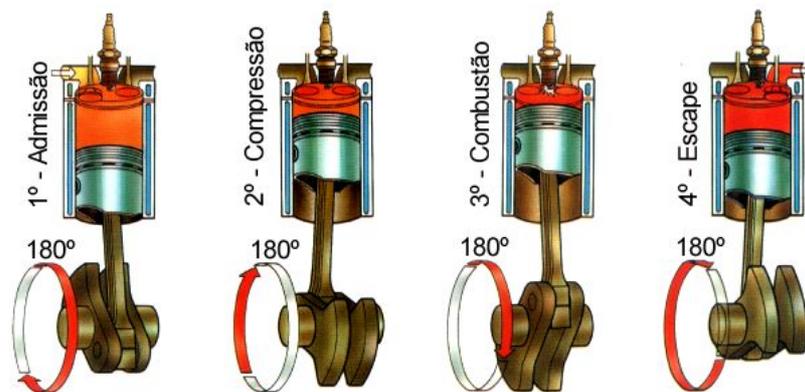
O objetivo desse trabalho é comparar a geração por motores de combustão interna com outras formas alternativas de geração, em específico, a nuclear e a geração com célula combustível, analisando como principais aspectos a eficiência, viabilidade econômica e adaptação do sistema para a navegação.

## 2 DIESEL GERADOR

### 2.1 FUNCIONAMENTO

Para entendermos o funcionamento básico do diesel gerador, primeiro devemos saber como um MCI (motor de combustão interna) opera. Como toda máquina térmica, o MCI transforma calor em trabalho. Esse calor é obtido pela queima de combustível, ou seja, a energia química é transformada em trabalho mecânico pelo movimento de vaivém de um pistão.

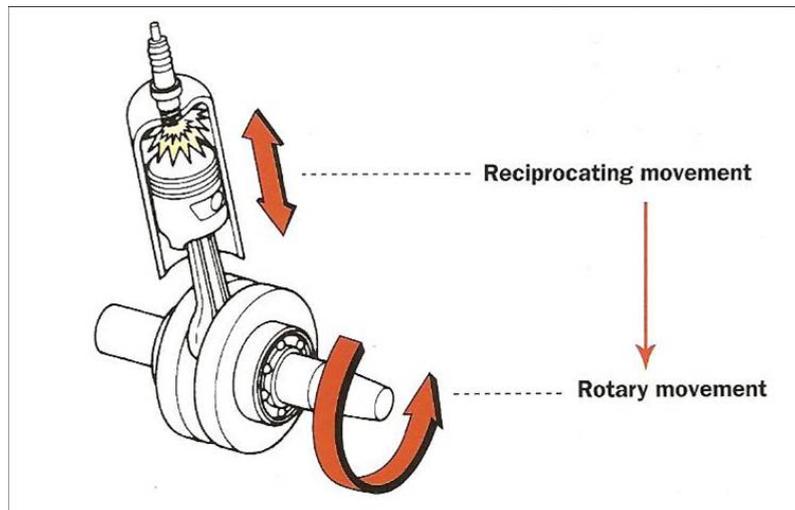
Figura 1 - Pistão no cilindro e os processos de um motor 4 tempos



Fonte: BRUNETTI, Franco. Motores de combustão interna. 3 ed. São Paulo, 2012. Pag.36

Geralmente as embarcações utilizam um motor de 4 tempos para geração, por isso analisaremos este ciclo de operação. O pistão se desloca do PMS (ponto morto superior) ao PMI (ponto morto inferior) o que gera uma depressão para que o fluxo de ar, provindos de um caixão de ar de lavagem, adentrem o cilindro. Depois o pistão se desloca do PMI para o PMS comprimindo o ar admitido e eleva sua temperatura. Após o ar estar devidamente comprimido, o combustível é injetado pelos bicos injetores ocasionando a ignição, pois aí teremos ar, combustível e temperatura o suficiente para que a combustão ocorra. A força da explosão faz com que o pistão se desloque para o PMI, e é justamente nesse momento que a máquina realiza trabalho. Seguindo, temos a descarga dos gases, quando a válvula de descarga é aberta e o pistão empurra os gases da combustão.

Figura 2 - Conversão de movimento alternativo para rotativo



Fonte: Arquivo pessoal

Com auxílio da figura 2, observamos que no momento em que o motor realiza trabalho, o movimento alternativo realizado pelo pistão impulsionado pela combustão é transformado em movimento rotativo por um sistema biela-manivela.

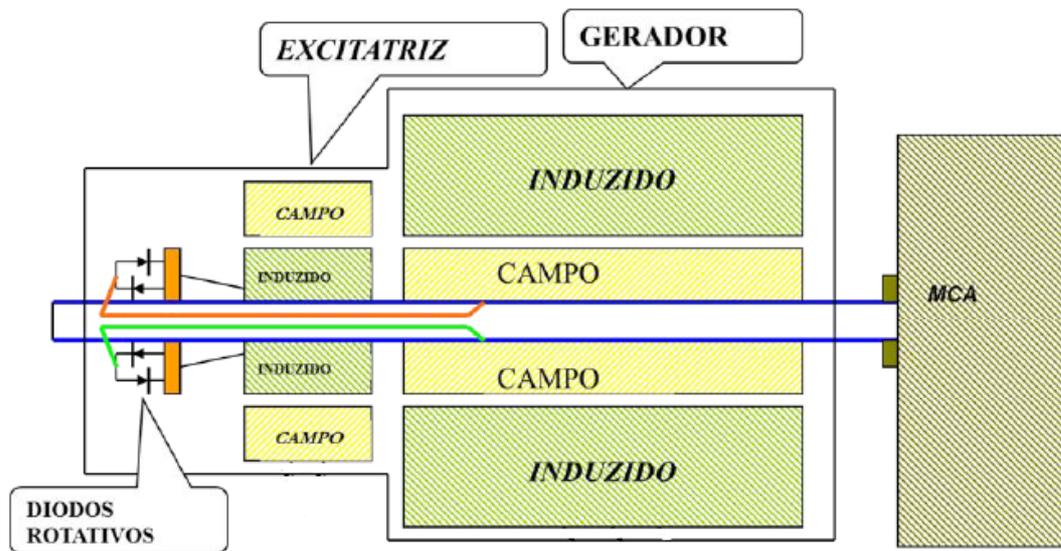
Uma vez entendendo a parte mecânica, partiremos para a compreensão da parte elétrica. Nela temos duas partes principais:

- Campo: responsável pelo campo magnético e por isso concentra os polos. São bobinas de condutores alimentadas com corrente contínua, dessa forma é possível controlar tensão e corrente.
- Induzido: é a parte onde aparece a força eletromotriz induzida.

Dependendo da posição dos polos, temos diferentes tipos de geradores: com o campo no estator temos a máquina de polos fixos, com o campo no rotor temos a máquina de polos girantes. Porém a primeira é menos utilizada devido a dificuldade de retirar a energia gerada, sendo necessário utilizar escovas.

Acoplado ao eixo do motor temos o induzido da excitatriz, que é como um minigerador, ela tem a função de fazer circular a corrente no campo principal do alternador. Como é gerada uma corrente de natureza alternada, é necessário que antes de ir para o campo do alternador ela seja retificada por uma ponte de diodos.

Figura 3 - Esquema de gerador mostrando excitatriz, ponte retificadora e motor.



Fonte: Arquivo pessoal

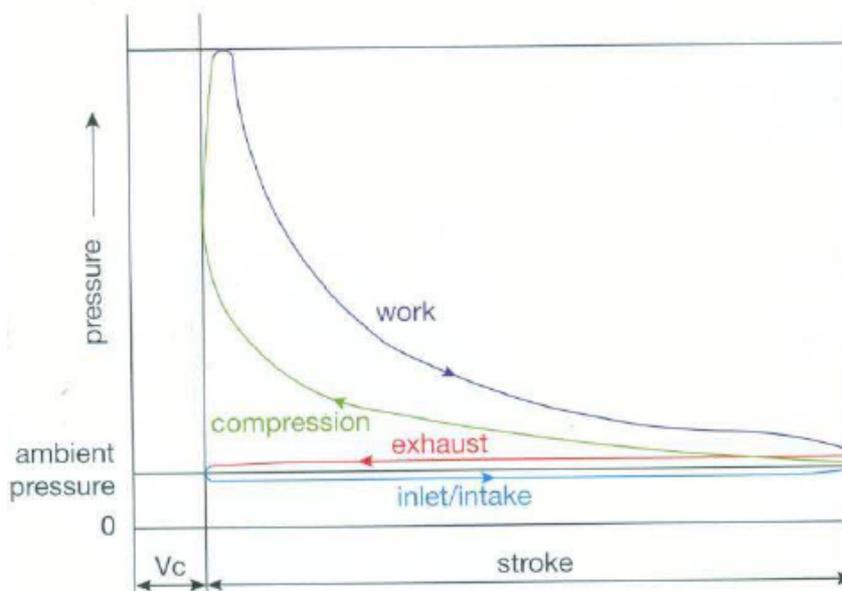
De forma geral a operação do diesel gerador é: um motor queima combustível e com a energia obtida da combustão o eixo realiza movimentos rotativos. Esse eixo transmite esse movimento para o rotor da parte elétrica do gerador que interage com o estator, assim induzindo uma força eletromotriz no induzido (que como já dito pode tanto estar em movimento, quanto na parte fixa). Dessa forma é gerada energia para a embarcação na forma de CA (corrente alternada).

## 2.2 EFICIENCIA E PERDAS

No diesel gerador temos dois tipos de perda a serem analisadas: perdas do motor de combustão e perdas no gerador.

### 2.2.1 Rendimento do motor

Figura 4 - Ciclo diesel real PxV de um motor 4 tempos



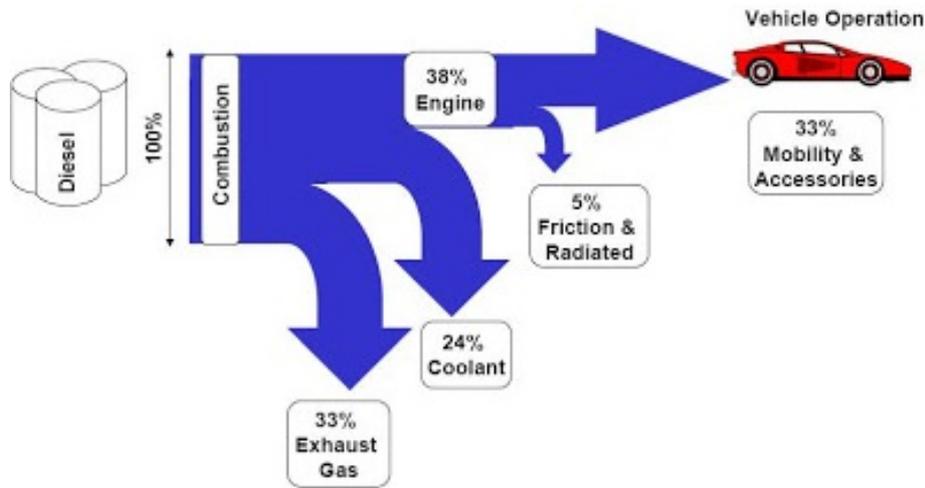
Fonte: KUIKEN, Kees. **Diesel engines: for ship propulsion and power plants**. Holanda, 2008. Pag.56

O MCI segue o ciclo diesel real como vemos na figura ??, onde se observa a evolução da pressão no cilindro de acordo com as etapas de funcionamento do motor.

É possível verificar no diagrama que as etapas não ocorrem de forma ideal, ou seja, há perdas de pressão. Isso se deve principalmente às perdas de calor (nos gases de descarga, na água de arrefecimento, no óleo lubrificante e por irradiação), queima incompleta, abertura da válvula de exaustão antecipada e perdas de bombeamento.

Não só analisando a pressão, mas também é fato que em todo tipo de transmissão ocorre perda de potência.

Figura 5 - Exemplo de perdas de potência no motor diesel



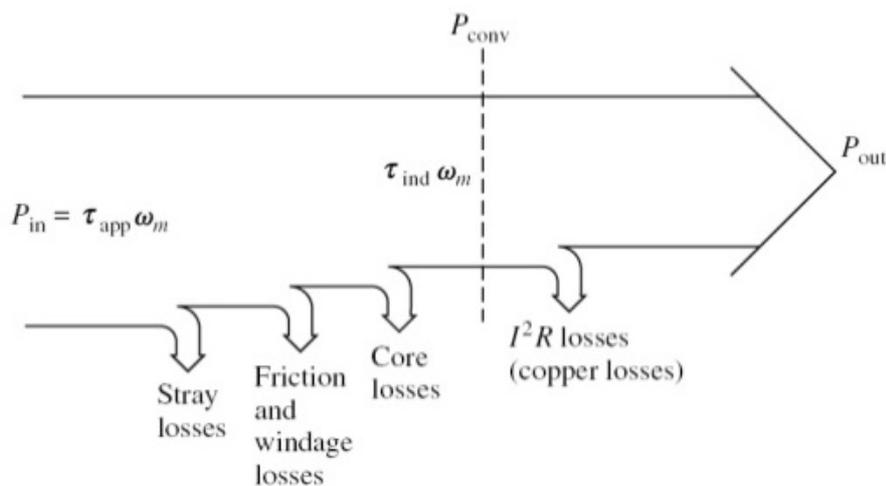
Fonte: nextbigfuture.com

Desse modo podemos concluir que a energia obtida na combustão não é totalmente convertida em trabalho, de fato o máximo de rendimento que podemos obter em um motor diesel marítimo é em torno de 50%.

### 2.2.2 Perdas no gerador

Figura 6 - Fluxo de potência no gerador de indução

#### Diagrama de fluxo de potência



Fonte: image.slidesharecdn.com

De acordo com o diagrama (figura 6) temos as seguintes perdas:

- diversas (*stray losses*, são as perdas sem categorias) que correspondem cerca de 1%;
- mecânicas (*friction and windage*) que são aquelas associadas ao atrito e ventilação;
- no núcleo (*core*) que são aquelas relacionadas a corrente de fuga e histerese; e
- no cobre (*copper*) que são associadas aos enrolamentos de campo e armadura.

Ao contrário da parte mecânica, a maioria da potência do gerador se transforma em potência útil, assim a eficiência do gerador pode superar os 95%, porém não devemos esquecer que a eficiência da geração de energia elétrica é dependente da eficiência do motor onde o rotor é acoplado. Com dados aproximados podemos obter a eficiência da geração multiplicando essas duas eficiências analisadas, por exemplo: se o rendimento do motor é 0.5 e do gerador 0.95 temos um rendimento de geração de energia elétrica de 0.475 ou 47,5%.

## 2.3 RISCOS ECOLÓGICOS

Os motores de combustão interna marítimos utilizam geralmente dois tipos de combustível: HFO (*heavy fuel oil* ou bunker) e MDO (*marine diesel oil* ou diesel). De fato, durante a navegação é comum o uso dos dois combustíveis, sendo que o HFO é usado em alto-mar e o diesel em mares territoriais. A troca de combustível para a queima do motor é chamada de cambagem. Essa manobra é necessária justamente porque a emissão de poluentes do HFO são superiores às do diesel, logo para que não ocorra o impedimento da passagem do navio por aquele território devido às leis ambientais, troca-se para o MDO. A justificativa da utilização do bunker é que ele é bem mais barato que o diesel, assim é mais viável economicamente a sua utilização mesmo que o motor desenvolva uma menor potência.

Tabela 1 - emissões de um motor utilizando HFO na queima

Padrão de emissão dos MCI utilizando HFO	
SO <sub>2</sub>	700-900 ppmv
HC	20-50 ppmv
Partículas	50-100 mg/Nm <sub>3</sub>
CO	50-200 ppmv
NO <sub>3</sub>	900-1500 ppmv

Fonte: [www.itegam.org.br/upload/pdf/c1.17\\_wagner2.pdf](http://www.itegam.org.br/upload/pdf/c1.17_wagner2.pdf)

Não é difícil nós chegarmos a conclusão de que não só na propulsão são utilizados esses combustíveis, mas também nos diesel geradores. Então é certo afirmar que esse tipo de geração de energia elétrica contribui com a poluição atmosférica que causa problemas ambientais já conhecidos como chuvas ácidas, suspensão de partículas tóxicas no ar e aumento do efeito estufa.

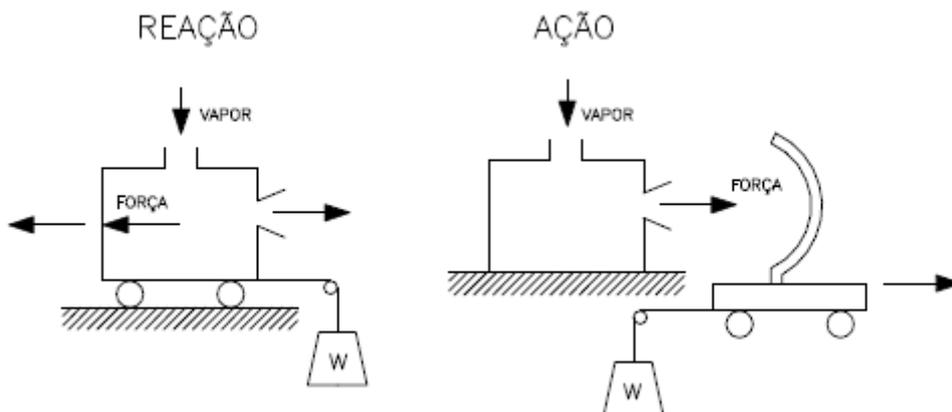
### 3 ENERGIA NUCLEAR

#### 3.1 FUNCIONAMENTO

O reator nuclear tem como funcionamento básico a obtenção de energia térmica para a produção de vapor, que por sua vez passa por uma turbina cujo eixo está acoplado a um gerador. Logo pode-se dizer que o reator nuclear gera energia elétrica como um turbogerador. Dessa forma é importante elucidar como funcionam as turbinas que são muito utilizadas a bordo. Também vale frisar que como o reator gera vapor, o foco será nas turbinas a vapor, porém existem as turbinas a gás que não abordaremos nesse estudo.

Turbinas a vapor são máquinas térmicas que transformam a energia cinética do vapor em energia mecânica e funcionam sobre dois princípios: ação e reação. As de ação utilizam a força do jato de vapor direcionada a parte móvel, assim a impulsionando na direção do jato; no caso das de reação se utiliza a força contrária ocasionada pelo fluxo do fluido, impulsionando a parte móvel na direção contrária a esse jato, como descrito fundamentalmente na terceira lei de Newton.

Figura 7 - Princípio de ação e reação

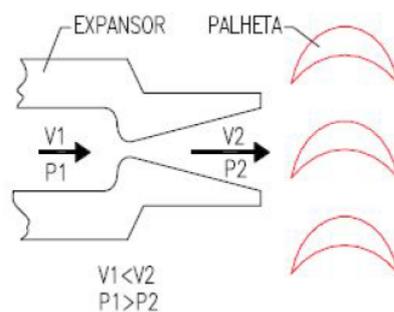


Fonte: <https://eletricistamazinho.files.wordpress.com/2011/08/turbinas-a-vapor.pdf>

As principais partes da turbina são basicamente estatores (parte fixa), rotores (parte móvel), palhetas (fixas e móveis) e expansores; os quais as funções serão descritas a seguir:

- Estatores: elemento fixo responsável por transformar a energia térmica do vapor em cinética usando os distribuidores, esta parte envolve o rotor.
- Rotores: elemento móvel que recebe o jato de vapor e transforma essa energia em trabalho.
- Palhetas fixas: responsáveis por orientar o vapor para as palhetas móveis, podem estar acopladas no estator ou na carcaça.
- Palhetas móveis: recebem o impacto do vapor para movimentar o rotor.
- Expansores: são pequenos orifícios que orientam o fluxo de vapor para as palhetas. É nesse momento quando o vapor passa pelos expansores que devido a pequena área, o fluido perde pressão e adquire velocidade bem como o aumento do seu volume específico. Essa parte é essencial para a turbina já que é aqui que o vapor ganha a energia necessária para mover as palhetas para gerar trabalho.

Figura 8 - Expansor e comparação dos parâmetros do vapor antes e depois



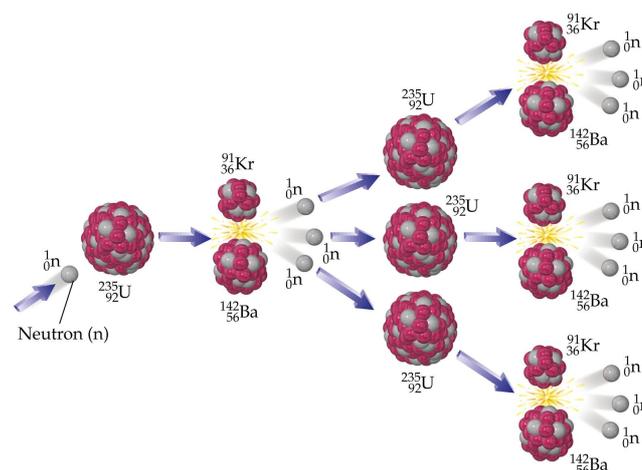
Fonte: <https://eletricistamazinho.files.wordpress.com/2011/08/turbinas-a-vapor.pdf>

Para gerar energia elétrica o eixo da turbina, que tem o movimento rotativo pelo impacto do vapor nas palhetas, é acoplado a um gerador, de forma semelhante ao diesel gerador. Como o gerador da turbina trabalha é idêntico ao já descrito no item 1.1.

Agora que foi elucidado como uma turbina opera, um equipamento comum em navios, podemos partir para o funcionamento do reator nuclear. Sua função básica é simplesmente gerar energia térmica para a vaporização da água e conseqüentemente gerar o vapor que será guiado até a turbina. A energia para a vaporização da água é obtida através de processos químicos nucleares denominados fusão e fissão nuclear.

Fissão nuclear é a quebra de um núcleo de átomo utilizando um nêutron, esse procedimento gera dois núcleos menores de outros elementos químicos e uma energia liberada muito grande. Também se formam novas partículas de nêutron que se chocam com outros núcleos que se dividem, assim ocorrendo uma reação em cadeia.

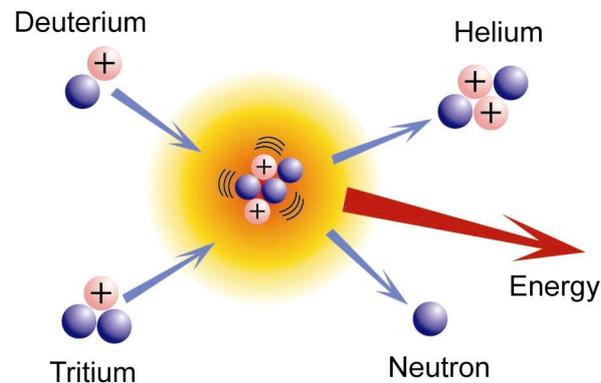
Figura 9 - Reação de fissão de um núcleo de urânio



Fonte: <http://parquedaciencia.blogspot.com.br/2013/09/fissao-ou-fusao-nuclear-qual-diferenca.html>

Fusão nuclear é o processo onde dois átomos menores se chocam formando um núcleo só de outro elemento, liberando uma quantidade grande de energia e um nêutron. Porém para que essa reação aconteça é necessário muita energia para que os núcleos que são de cargas positivas se aproximem o suficiente, essa força de repulsão é proporcional ao número de prótons presentes nos núcleos envolvidos no processo, por isso é mais fácil de realizar com elementos com poucos prótons como o hidrogênio.

Figura 10 - Fusão nuclear de dois átomos de hidrogênio formando hélio



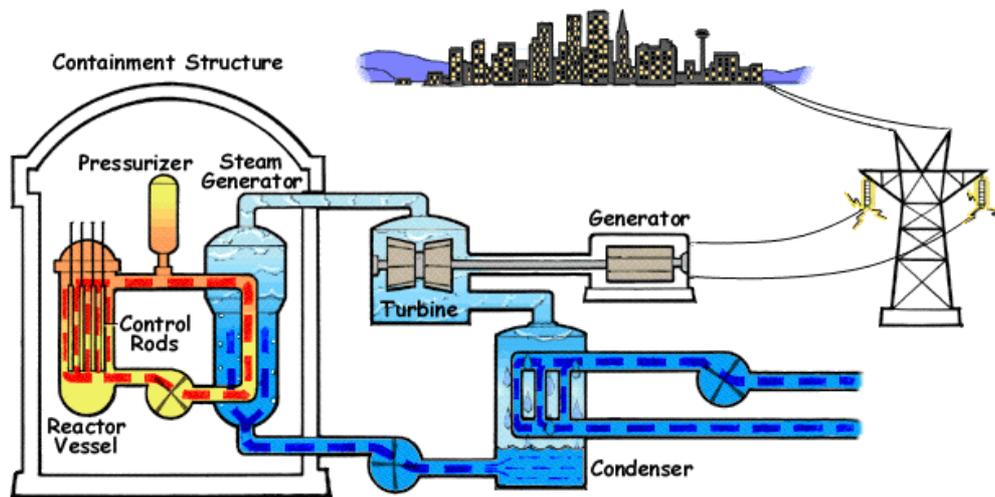
Fonte: [bradleystockwell.com](http://bradleystockwell.com)

Apesar de existirem reatores nucleares a fusão em laboratórios, a energia usada para controlar a fusão é maior do que a energia gerada, logo ela ainda é inviável economicamente e por isso na geração de energia elétrica são empregados os reatores de fissão, inclusive nos geradores de navios.

No reator nuclear para que ocorra a fissão é usado um combustível radioativo, geralmente urânio ou plutônio dispostos em barras chamadas de barras de combustível físsil. O processo de fissão nuclear deve ser uma reação em cadeia controlada, logo são necessários dispositivos de segurança denominados barras de controle, que são feitas de um material que diminui a velocidade ou absorve os nêutrons liberados no processo, assim não permitindo que a energia liberada cresça progressivamente e chegue a níveis perigosos.

Uma vez que a reação está controlada a energia térmica liberada pode aquecer a água de um tanque no gerador de vapor. Essa água fica em um sistema fechado, e é recirculada. Durante seu ciclo ela sofre transformações: ela se vaporiza quando recebe a energia liberada pelas barras de combustível, assim, em forma de vapor, ela é conduzida para a turbina a qual o eixo do rotor está conectado um gerador elétrico. Em seguida o vapor é conduzido para um condensador onde ocorre troca de calor e o vapor retorna ao seu estado líquido, sendo assim a água é bombeada novamente para o tanque onde receberá a energia provinda das fissões do reator.

Figura 11 - Funcionamento de um reator nuclear



Fonte: [www.brasilecola.com.br](http://www.brasilecola.com.br)

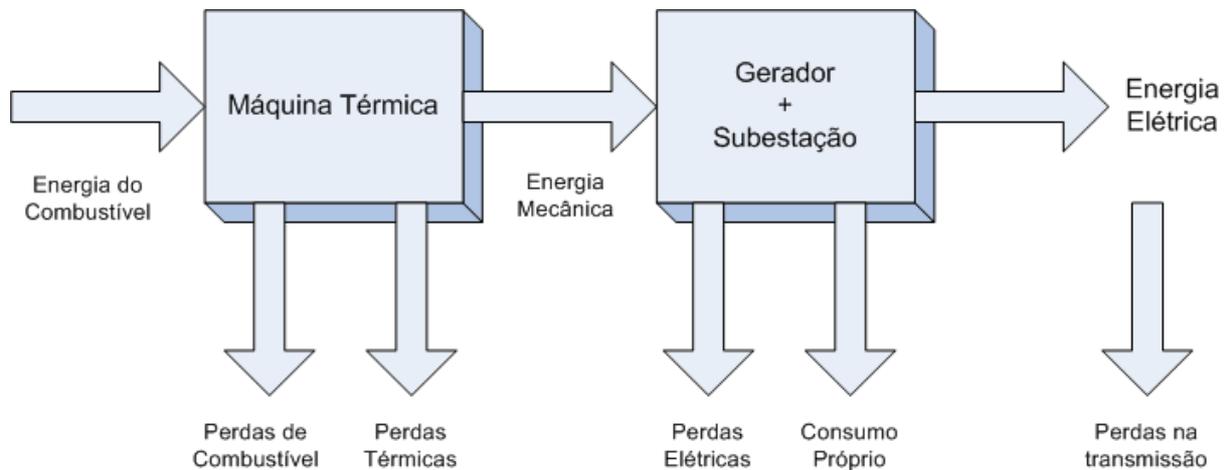
É fácil perceber que em um navio o gerador de vapor alimenta o turbogerador com o fluido necessário e o condensador recebe água de arrefecimento dos sistemas de resfriamento conectados às caixas de mar.

Em resumo temos que: o reator produz calor com combustível radioativo que vaporiza água num circuito fechado para girar o turbogerador e assim produzir energia elétrica.

### 3.2 EFICIENCIA E PERDAS

Para analisar as perdas da geração através de um reator nuclear, devemos ter em mente que ele é ainda uma máquina térmica, em verdade pode-se afirmar que a principal diferença entre uma usina termelétrica e uma usina nuclear é simplesmente a forma como se obtém o calor para a troca de energia com a água. Logo as perdas e o rendimento nesse tipo de geração são verdadeiros quando a observamos como uma máquina térmica.

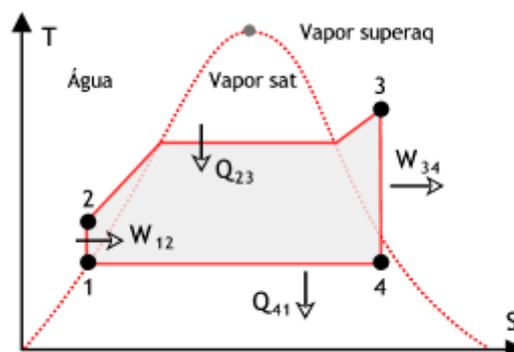
Figura 12. Perdas de energia de uma máquina térmica para geração de energia elétrica



Fonte: [www.antonioguilherme.web.br.com/Images/rendimento.gif](http://www.antonioguilherme.web.br.com/Images/rendimento.gif)

As perdas térmicas e o trabalho mecânico realizado pode ser estudado de acordo com o ciclo de Rankine, pois trata-se de uma turbina a vapor.

Figura 13. Diagrama TxS para o ciclo Rankine



Fonte: [www.mspc.eng.br](http://www.mspc.eng.br)

De acordo com diagrama pode-se observar que:

- 1 a 2 é a compressão adiabática da bomba realizada na água para a chegada no gerador de vapor
- 2 a 3 é a troca de calor da água e sua consequente vaporização, ou seja, quando ela recebe calor do reator

- 3 a 4 é a realização de trabalho feita pela turbina
- 4 a 1 é a rejeição de calor no condensador

De forma geral sabe-se que o rendimento de uma usina térmica é na faixa de 35%, ou seja, analogamente o reator nuclear terá também o rendimento nessa faixa. O que justifica sua utilização como fonte de energia elétrica a bordo é o fato de que o combustível nuclear ocupa menos volume e influencia pouco no KG da embarcação e no efeito de superfície livre, assim a estabilidade do navio é mantida mais facilmente. Só para efeitos de proporção, 30t de urânio é equivalente a 1.400.000t de óleo combustível em termos energéticos.

### **3.3 RISCOS ECOLÓGICOS**

Apesar de a energia nuclear ser considerada limpa, ou seja, livre de emissões de poluentes, não se pode ignorar o fato de que ela gera resíduos radioativos. Até hoje não se sabe uma forma segura de descarte desse lixo nuclear uma vez que podem gerar contaminações com sua radioatividade. Os efeitos nos seres vivos expostos a materiais com alta radiação vão desde queimaduras até mutações genéticas (podendo causar até câncer).

Por conta de acidentes do passado que causaram catástrofes relacionados a energia nuclear, como em Chernobyl e mais recentemente no Japão, percebe-se uma cautela extrema dos países com a entrada de material radioativo em seus mares territoriais, dessa forma a utilização desse tipo de combustível pode dificultar a entrada de navios mercantes em vários portos do mundo.

## 4 CÉLULA COMBUSTÍVEL

### 4.1 FUNCIONAMENTO

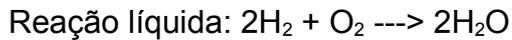
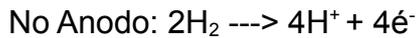
Células combustível possuem operação similar as pilhas (ou baterias) que já conhecemos, ambos utilizam energia química para transformarem em energia elétrica. Para entender como essas fontes produzem energia é importante estar ciente sobre o que é uma eletrólise.

Existe um tipo de reação que ocorre quando um elemento tende a ceder elétrons e um outro tende a recebê-los, estes elementos reagem entre si e formam um composto. Um exemplo disso é o cloreto de sódio (ou sal de cozinha como é conhecido mais popularmente) onde o metal Na (sódio) cede elétrons e o ametal Cl (cloro) os recebe. Esta é uma reação de oxi-redução e ocorre de forma espontânea, ou seja, não necessita de uma interferência externa para acontecer. Porém se desejamos que ocorra o contrário, no caso o Na receber elétrons e o Cl perder, será necessário uma passagem de corrente elétrica para forçar o processo. Em outras palavras submeteremos o sal a uma eletrólise.

Para que ocorra a eletrólise precisamos de dois eletrodos: o ânodo, onde ocorre as semi reações de perda de elétrons (oxidação); e o catodo, onde ocorre as semi reações de recebimento de elétrons (redução). Estes itens são postos em um meio condutor para que a corrente elétrica passe do ânodo para o catodo, chamado eletrólito.

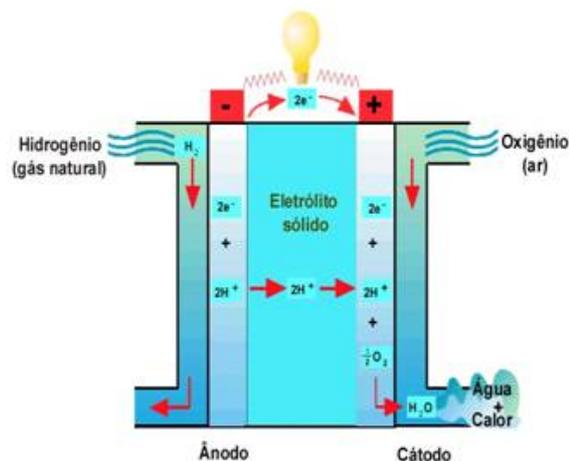
Agora que a eletrólise foi elucidada, podemos partir para o funcionamento da célula combustível propriamente dita, uma vez que ela se utiliza da eletrólise reversa, então o que ocorre é uma reação química onde se obtém a passagem de uma corrente elétrica, exatamente como uma pilha/bateria. A reação química depende de qual é o combustível usado para alimentar a célula, portanto para efeito de exemplo utilizaremos as células a hidrogênio.

Química da célula:



De acordo com a reação apresentada podemos verificar a formação de água e elétrons livres que podem ser usados para alimentar uma carga. Como a corrente elétrica provém de uma reação química a energia gerada é de natureza contínua, a já conhecida CC (corrente contínua).

Figura 14. Desenho esquemático de uma célula combustível



Fonte: [www.electrocell.com.br/oqueeacc\\_pt.htm](http://www.electrocell.com.br/oqueeacc_pt.htm)

O principal fator que diferencia uma célula combustível de uma pilha, é que a última deve ser descartada quando todos os elementos químicos contidos nela perdem a capacidade de gerar tensão elétrica, no caso da célula, enquanto houver combustível disponível, ela continuará em funcionamento.

#### 4.2 EFICIENCIA E PERDAS

A célula tem a capacidade de transformar a energia química da reação em energia elétrica com cerca de 80% de eficiência, parte dessa energia não convertida é perdida em forma de calor que ainda pode ser usado para gerar vapor no navio, logo a energia

aproveitada pode chegar perto de 90%. Porém existe um grande desafio que é a obtenção do combustível para o equipamento; o oxigênio usado no catodo é bombeado da atmosfera, mas o hidrogênio puro não é facilmente obtido. Ciente desse fato, uma das formas para contornar este problema é a extração de hidrogênio de outros combustíveis tal como o metanol, para que isso seja possível é preciso a instalação de um reformador. Com a utilização do reformador para converter em outro combustível utilizável pela célula, a eficiência da geração cai. Em suma temos que a conversão da energia do metanol gira em torno de 40% e a eficiência da célula é cerca de 80%, então sua eficiência global girará em torno de 32%.

### **4.3 RISCO ECOLÓGICOS**

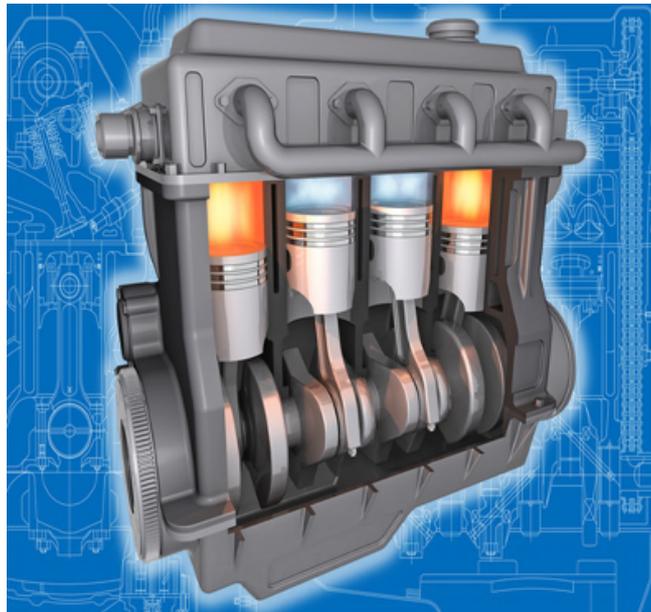
Essa forma de gerar energia é muito limpa e é uma das que menos agridem o meio ambiente, a única forma efetivamente da célula causar algum impacto negativo é no caso de quando se usa os reformadores, pois aí a geração de energia está atrelada a outro combustível, mesmo que estes sejam de origem vegetal e não fóssil, ainda sim produzem poluição.

## 5 COMPARATIVO

Não somente existem essas três formas de se gerar energia elétrica a bordo, porém para efeito de estudo foram estas as escolhidas para a comparação entre tecnologias. Tendo em vista o que já foi apresentado em relação ao tema discutido, a seguir serão citadas de forma mais objetiva as vantagens e desvantagens desses meios de geração.

### 5.1 DIESEL GERADOR

Figura 15 - Motor de combustão interna



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

#### 5.1.1 Vantagens

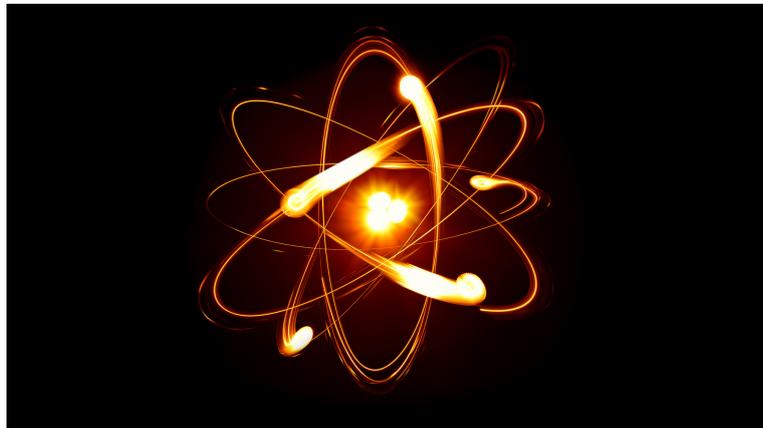
- combustível de fácil obtenção e barato (no caso do HFO)
- Tecnologia amplamente utilizada a bordo o que acarreta no barateamento de sua instalação
- Manutenção facilitada pela popularização do uso
- Trabalho em baixas rotações

### 5.1.2 Desvantagens

- Instalação necessária de vários sistemas auxiliares (arrefecimento, injeção de combustível, purificadores etc)
- Baixa eficiência
- Peso elevado para a potência
- grande emissão de poluentes

## 5.2 ENERGIA NUCLEAR

Figura 16 - Representação de um átomo



Fonte: <http://www.abc.net.au/science/articles/2014/02/20/3948666.htm>

### 5.2.1 Vantagens

- Peso e espaço reduzido
- Pouco ruído
- Operação mais suave
- Instalação de poucos sistemas auxiliares
- Considerada energia limpa
- Volume de combustível muito menor que os geradores que necessitam de combustível líquido

### 5.2.2 Desvantagens

- Preocupação constante com a segurança inclusive fazendo com que o navio seja impedido de adentrar em vários portos
- Utilização de material radioativo
- Produção de dejetos tóxicos com descarte dificultado
- Por não ser uma tecnologia muito difundida, demanda uma instalação e equipamentos específicos, o que a torna cara

### 5.3 CÉLULA COMBUSTÍVEL

Figura 17 - Célula combustível



Fonte: [brasilh2store.com.br](http://brasilh2store.com.br)

#### 5.3.1 Vantagens

- Energia limpa (sem uso de reformadores)
- Alta eficiência
- Não possuem partes móveis o que a torna mais confiável e não afetada por desgaste por atrito
- Ausência de ruídos

### 5.3.2 Desvantagens

- Alto custo com relação a outras fontes de energia
- Dificuldade na obtenção e armazenamento do combustível ideal, por isso em alguns casos se faz necessário o uso dos reformadores

Tabela 2 - Tabela comparativa entre os tipos de geração de energia estudados

<b>Geração</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Poluição</b>	<b>Natureza da energia</b>	<b>Principal vantagem</b>	<b>Principal desvantagem</b>
Diesel gerador	50%	Emissão de nox	CA	Manutenção simples	Baixo rendimento
Energia nuclear	35%	Produção de dejetos tóxicos	CA	Produção de grande quantidade de energia com pouco combustível	Preço das instalações e aversão dos países quanto ao uso de energia nuclear
Célula combustível (sem reformador)	80%	Nenhuma	CC	Energia limpa e eficiente	Dificuldade na obtenção de combustível e preço

Fonte: Arquivo pessoal

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de energia elétrica a bordo é essencial, logo a forma como a obtemos surte uma grande influencia na navegação, não só no custo do transporte mas também nas condições de habitabilidade do navio. Assim se faz necessário uma análise de como será a melhor forma de gerar energia dentre as tecnologias disponíveis atualmente.

Verificando as três apresentadas nesse trabalho, percebemos que todas tem suas vantagens e onde são melhores aplicadas, bem como o que dificulta sua utilização. A bordo como devemos considerar a estabilidade do navio, a confiabilidade dos equipamentos e o gasto com combustível, o mais indicado seria a geração com células de combustível, uma vez que suas unidades são compactas e possuem grande eficiência. Porém, devido aos altos custos não devemos negar que a viabilidade econômica interfere na não popularização do uso dessas fontes de energia na navegação.

Sendo assim, o uso dos diesel geradores ainda sim é uma melhor solução do que temos a disposição, já que energia nuclear causa uma certa ojeriza entre os países dos portos onde o navio deve atracar, portanto isso foge de um dos objetivos da marinha mercante que é justamente integrar países comercialmente. Enquanto as células combustíveis não se desenvolverem a ponto de torná-las viáveis, os MCIs ainda sim dominarão a geração de energia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. 3 ed. São Paulo, 2012.

KUIKEN, Kees. **Diesel engines: for ship propulsion and power plants**. Holanda, 2008.

CLAUDIO, José. **GRUPOS GERADORES: PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO, INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE GRUPOS GERADORES**

**PARTE I - MOTORES DIESEL**. Disponível em:

<[http://www.joseclaudio.eng.br/grupos\\_geradores\\_6.html](http://www.joseclaudio.eng.br/grupos_geradores_6.html)>. Acesso em: 4 AGOSTO. 2015

**Geradores síncronos – Princípio de funcionamento**. Disponível em:

<<http://excitatrizestatica.com.br/gruposgeradores.htm>>. Acesso em: 4 AGOSTO. 2015

SILVA, Wagner Ferreira; CAMPOS, Lucila Maria; MIGUEL, Paulo Augusto; RODRIGUEZ, Jorge Laureano; LEITE, Jandecy Cabral. **COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DUMA USINA ELÉTRICA QUANDO UTILIZA MOTORES DE OLEO COMBUSTIVEL PESADO E QUANDO UTILIZA MOTORES A GÁS**. Disponível em:

<[http://www.itegam.org.br/upload/pdf/c1.17\\_wagner2.pdf](http://www.itegam.org.br/upload/pdf/c1.17_wagner2.pdf)> Acesso em: 5 AGOSTO. 2015.

CAMPAGNER, Carlos Alberto. **BOMBAS NUCLEARES: A diferença entre fissão e fusão nuclear**. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/bombas-nucleares-a-diferenca-entre-fissao-e-fusao-nuclear.htm>>. Acesso em: 14 AGOSTO. 2015

PETRIN, Natália. **Fissão e fusão nuclear**. Disponível em:

<<http://www.estudopratico.com.br/fissao-e-fusao-nuclear-o-que-sao-e-aplicacoes/>> Acesso em: 14 AGOSTO. 2015

**Máquinas térmicas: Apostila de motores de combustão interna**. Disponível em:

<[http://mecanica.scire.coppe.ufrj.br/utl/b2evolution/media/silvio/apmotoresMCI05\\_01.pdf](http://mecanica.scire.coppe.ufrj.br/utl/b2evolution/media/silvio/apmotoresMCI05_01.pdf)>

Acesso em: 15 AGOSTO. 2015

MARTINHO, Eduardo. **Constituição e funcionamento de uma central nuclear.** Disponível em: <<http://energianuclear-bases.blogspot.com.br/2011/11/constituicao-e-funcionamento-de-uma.html>> Acesso em: 16 AGOSTO. 2015

**O que é célula combustível.** Disponível em: <[http://www.electrocell.com.br/oqueeacc\\_pt.htm](http://www.electrocell.com.br/oqueeacc_pt.htm)> Acesso em: 18 AGOSTO. 2015

NICE, Karim. **Como funciona a célula a combustível.** Disponível em: <<http://carros.hsw.uol.com.br/celula-combustivel.htm>> Acesso em: 18 AGOSTO. 2015

**Vantagens e desvantagens das células combustível.** Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-vantagens-e-desvantagens/>> Acesso em: 19 AGOSTO. 2015