

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

HEBERTH PEREIRA DE OLIVEIRA

O USO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS A BORDO: geração de energia elétrica

RIO DE JANEIRO

2014

HEBERTH PEREIRA DE OLIVEIRA

O USO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS A BORDO: geração de energia elétrica

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

Msc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto
Msc OSM Osvaldo Pinheiro Souza e Silva

RIO DE JANEIRO

2014

HEBERTH PEREIRA DE OLIVEIRA

O USO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS A BORDO: geração de energia elétrica

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

Data da Aprovação: ____/____/____

Msc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

Msc OSM Osvaldo Pinheiro Souza e Silva

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

À minha família

AGRADECIMENTOS

À minha família, pois sem a ajuda deles eu não estaria concluindo mais essa etapa da minha vida.

Aos meus mestres que me deram todos os ensinamentos necessários para desenvolver esse trabalho.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.

(THEODORE ROOSEVELT)

RESUMO

O motor a diesel é a tecnologia mais usada para movimentar e produzir energia nos navios atualmente, mas existem dois motivos importantes que apontam para o fim da supremacia do motor diesel: o preço do óleo diesel e a preocupação com o meio ambiente. Uma das opções mais promissoras para substituir os motores diesel são as células combustíveis. Muitos tipos de células estão sendo desenvolvidas e três delas já foram usadas a bordo de navios: PEMFC, SOFC e MCFC.

Palavras-chave: Células combustíveis. PEMFC. SOFC. MCFC.

ABSTRACT

The diesel engine is the most used technology to power ships nowadays, but there are two important reasons that are pointing for the end of diesel supremacy: the price of diesel oil and the increasing concern with the environment. One of the most promising option to replace diesel engines is fuel cells. Several types of fuel cells are being developed and three of them have already been used onboard ships: PEMFC, SOFC e MCFC.

Key-words: Fuel Cells. PEMFC.SOFC. MCFC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Limites de emissão de NOx.....	12
Figura 2 -Limites de SOx no combustível.....	13
Figura 3 - Preço do combustível marítimo de 380 cSt.....	14
Figura 4 - Emissões por tipo de célula combustível.....	17
Figura 5 - Esquema de uma PEMFC.....	19
Figura 6 - Representação esquemática das reações no interior de uma SOFC.....	22
Figura 7 - Esquema de uma MCFC.....	24
Figura 8 - Esquema do FCS Alsterwasser.....	27
Figura 9 - FCS Alsterwasser	27
Figura 10 - MV Undine.....	28
Figura 11 - Viking Lady.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	MOTIVOS PARA MUDAR	11
2.1	EMISSÃO DE POLUENTES	11
2.2	PREÇO DO COMBUSTÍVEL	13
3	TIPOS DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS	15
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO GERAL	16
3.2	PEMFC (POLYMER EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL)	17
3.3	REFORMA CATALÍTICA	20
3.4	SOFC (SOLID OXIDE FUEL CELL)	20
3.5	MCFC (MOLTEN CARBONATE FUEL CELL)	23
4	APLICAÇÃO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS EM NAVIOS	25
4.1	PEMFC	25
4.1.1	FCS ALSTERWASSER	25
4.2	SOFC	26
4.2.1	MV UNDINE	26
4.3	MCFC	27
4.3.1	VIKING LADY	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

As células combustíveis são dispositivos de conversão eletroquímica bastante eficientes, mas que ainda não são amplamente utilizadas. Existem muitos tipos de células combustíveis e muita pesquisa sobre o uso dessa tecnologia para gerar energia para inúmeros tipos de cargas.

Esse trabalho irá focar nos tipos de células combustíveis que já são utilizados a bordo de navios mercantes e nos projetos em desenvolvimento nesse campo.

Além disso, serão discutidos os motivos que estão influenciando a pesquisa de fontes alternativas visando substituir o uso de motores diesel.

2 MOTIVOS PARA MUDAR

Atualmente, a propulsão a diesel é a mais utilizada em navios mercantes no mundo inteiro, pois além de ser a tecnologia mais desenvolvida entre as opções atualmente disponíveis, é a única que possui uma ampla rede de fabricantes e de manutenção com alcance global. Além de ser utilizada como o principal meio de propulsão, motores a diesel também são bastante utilizados para a geração de energia elétrica a bordo.

Apesar de amplamente difundida na indústria marítima, a utilização de motores diesel tem gerado muitos questionamentos recentemente. Os principais se relacionam principalmente com a poluição que o combustível gera ao meio ambiente e o impacto do seu preço no orçamento das companhias marítimas. A seguir tais fatores serão brevemente discutidos.

2.1) Emissão de poluentes

A maioria dos combustíveis utilizados na indústria marítima é fóssil e são produzidos a partir da destilação do óleo cru de petróleo. Tais combustíveis marítimos são comumente divididos em duas categorias:

- *Residual fueloil, Heavy FuelOil* ou *bunker*: é a parte do petróleo que permanece na torre de destilação após as partes mais leves e os combustíveis destilados serem retirados da torre de destilação. É o combustível marítimo mais usado, pois é o mais barato.
- *Marine Distillates*: São frações mais leves do que o *residual fueloil* e com menores teores de enxofre. São menos poluentes, porém mais caros.

Estima-se que a indústria marítima, mundialmente, é responsável pela emissão de 3% de todas as emissões de CO₂ (dióxido de carbono). Apesar de sua participação ser pequena, a indústria marítima é um dos poucos segmentos industriais que continua aumentando suas emissões de CO₂. Desde 1990 até 2013, suas emissões de CO₂ aumentaram 90%. A tendência em todos os outros segmentos tem sido investir em pesquisas para se encontrar novas fontes de energia, mais limpas.

Além das emissões de CO₂, a queima do *bunker* gera ainda SO₂ (dióxido de enxofre), NO_x (óxidos de nitrogênio), material particulado, dentre outras substâncias. Tais substâncias

além de serem associadas ao aquecimento global também possuem inúmeros efeitos danosos à saúde humana.

A emissão de grandes quantidades de SO_2 e NO_x estão relacionadas ao fenômeno conhecido como chuva ácida. Esse fenômeno é produto da reação de tais compostos com vapor d'água, oxigênio e outros compostos químicos na atmosfera, formando ácidos como o ácido sulfúrico. A chuva ácida é extremamente danosa para o meio ambiente, especialmente para florestas e para o solo. Além da chuva ácida, o SO_2 , o NO_x e o material particulado também estão relacionados ao aparecimento e/ou piora de doenças respiratórias em pessoas.

Visando diminuir as emissões gasosas provenientes de navios, o *Marine Environment Protection Committee* (MEPC), comitê da IMO que trata de poluição marinha, criou o Anexo VI da Convenção MARPOL. Esse anexo estabelece limites de concentração de óxidos de enxofre e nitrogênio nos gases de descarga dos navios, além de proibir a emissão deliberada de substâncias que degradem a camada de ozônio. Tal Anexo foi adotado em 26/09/1997 e entrou em vigor em 19/05/2005.

Em 2008, o Anexo VI da MARPOL recebeu novas emendas que estabeleceram novos requisitos para combustíveis e novos limites de emissão de NO_x nos gases de descarga de acordo com o ano de fabricação do motor. No gráfico a seguir, *tier 1* representa os limites de NO_x estabelecidos na versão do Anexo VI de 1997; *tier 2* representa os limites introduzidos nas emendas de 2008 e que entraram em vigor em 1 julho de 2010; e *tier 3* representa os limites que serão estabelecidos para motores diesel construídos a partir de 2021 e que operarão dentro de ECA's (Emission Control Areas).

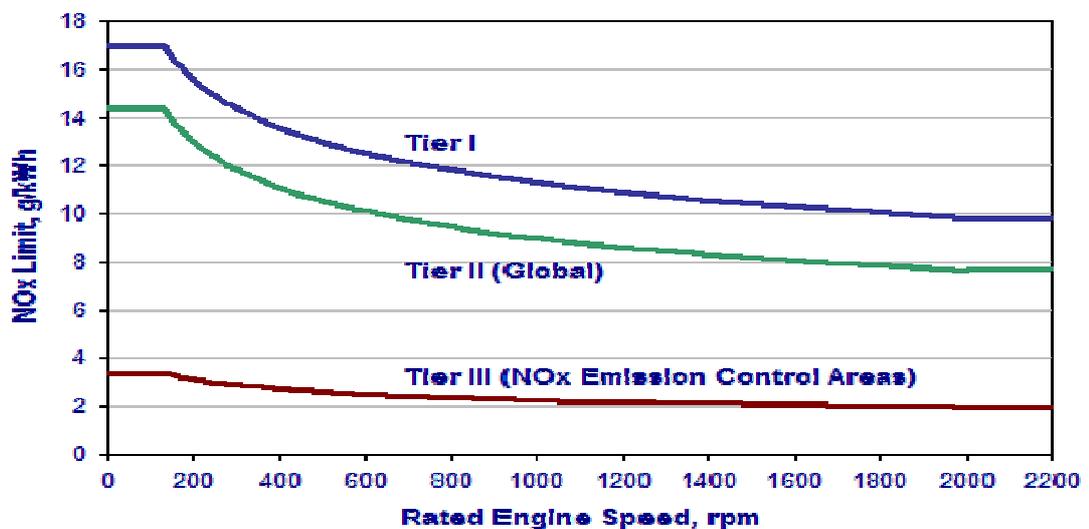


Figura 1 - Limites de emissão de NO_x

O próximo gráfico mostra os limites de concentração de enxofre permitidos nos combustíveis para cada ano a partir de 2000. Controlando-se a concentração de enxofre no combustível, controlam-se as emissões de SO₂ nos gases de descarga.

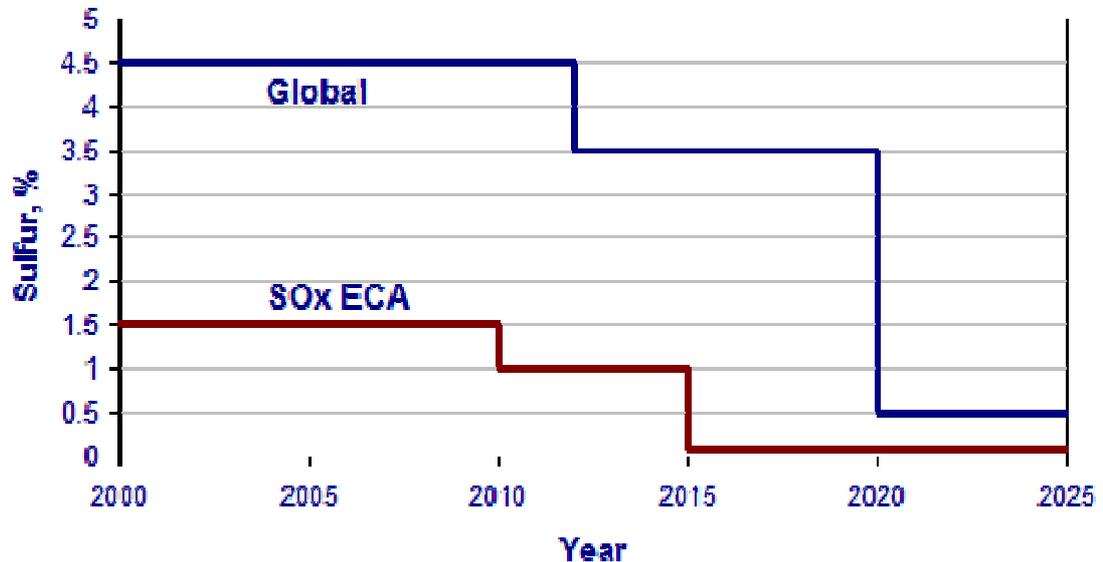


Figura 2-Limites de SOx no combustível

Espera-se atingir os requisitos mais “leves” das novas emendas (navegação fora de ECA’s) apenas com a otimização da combustão (melhor controle da pressão, tempo exato da injeção, etc). Os requisitos mais restritivos, porém, só serão atingidos com a utilização de um *Heavy fueloil* com uma concentração muito baixa de SO₂ ou então com o uso de *marine distillates* durante toda a navegação. Qualquer uma das opções acima apresenta um aumento de custos bastante elevados para as empresas de navegação.

2.2) Preço do combustível

Observe o gráfico a seguir que demonstra a variação do preço do combustível marítimo de 380 cSt, uma categoria amplamente utilizada, em quatro portos diferentes desde 1990:

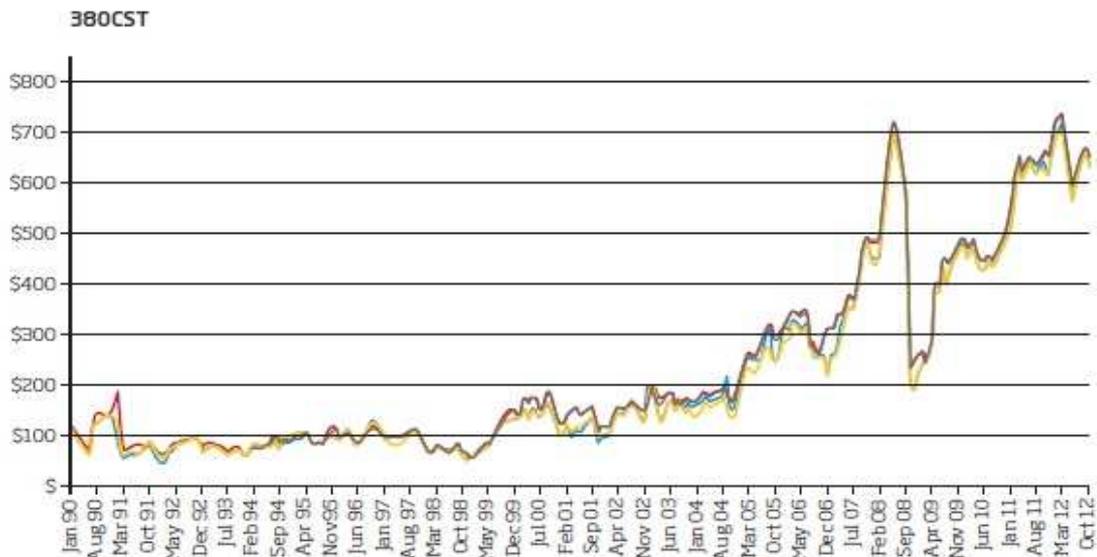


Figura 3 - Preço do combustível marítimo de 380 cSt

Como pode ser observado pelo gráfico, a tendência do preço do combustível foi de encarecimento nos últimos 20 anos. E poucos são os que apostam na inversão dessa tendência.

As refinarias de petróleo estão produzindo cada vez mais destilados em detrimento do *bunker*. Isso ocorre porque os destilados de petróleo apresentam mais consumidores e sua margem de lucro é maior quando comparado ao *bunker*.

Apesar da oferta de *bunker* estar diminuindo, sua demanda só aumenta, pois muitos navios novos são colocados no mercado anualmente. Essa combinação de baixa oferta e alta demanda se traduz em aumento de preços.

Além dessa conjuntura desfavorável, a legislação cada vez mais restritiva no que concerne a emissão de poluentes também tem papel chave no aumento dos preços. Como já foi mencionado anteriormente, as novas emendas ao Anexo VI da MARPOL exigem combustíveis mais limpos e, conseqüentemente, mais caros.

Como o combustível responde por cerca de 50 a 60% dos custos de operação de um navio, qualquer aumento no preço do combustível tem um grande impacto no orçamento de companhias marítimas.

3 TIPOS DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS

As células combustíveis foram inventadas em 1838, mas permaneceram por muito tempo como apenas uma curiosidade científica. O interesse por essa tecnologia, porém, aumentou bastante a partir da década de 1960 com o desenvolvimento de veículos especiais, como foguetes. Os três principais motivos que reacenderam as pesquisas no campo de células combustíveis foram: elas são leves (o hidrogênio é a molécula mais leve); a única substância emitida durante o funcionamento da célula é água (dependendo do combustível usado pela célula); e a tecnologia já havia sido bem desenvolvida quando comparada com a sua origem.

Células combustíveis são basicamente dispositivos de conversão eletroquímica, assim como as baterias. Isso significa que esses dispositivos produzem energia elétrica (do tipo DC) através de reações químicas. Os dois reagentes tipicamente usados são oxigênio (geralmente proveniente do ar) e hidrogênio (que pode provir de diferentes fontes, dependendo do tipo de célula combustível).

O que difere as células combustíveis das baterias é o armazenamento tanto dos reagentes quanto dos produtos da reação eletroquímica. Nas baterias, tanto os reagentes quanto os produtos são armazenados no interior da mesma. A reação eletroquímica ocorrerá dentro da bateria, produzirá eletricidade, mas os produtos não serão descartados para fora da bateria. Isso significa que uma hora a bateria irá descarregar, ou seja, quase todos os reagentes terão sido utilizados e a bateria conterá majoritariamente produtos. Nessa situação, ou a bateria deverá ser trocada ou então recarregada (se for o caso).

As células combustíveis por sua vez não armazenam nem reagentes nem produtos em seu interior. Os reagentes, que ficam armazenados em tanques, irão entrar no “corpo” da célula, reagirão produzindo eletricidade e seus produtos serão descartados para um outro tanque. Isso significa que enquanto houver fornecimento de reagentes, a célula irá produzir energia. Desse ponto de vista, as células combustíveis se assemelham mais aos motores diesel convencionais que a baterias.

Assim como os motores diesel, as células combustíveis precisam de máquinas auxiliares para funcionarem. Bombas, ventiladores, umidificadores e outras máquinas são partes indispensáveis de um sistema de uma célula combustível. Ao contrário do motores diesel, porém, as células combustíveis não possuem partes móveis e, por isso, funcionam muito mais silenciosamente.

3.1) Princípio de funcionamento geral

Todas as células combustíveis são basicamente formadas por um anodo, um catodo, eletrólito e um circuito externo. Para funcionar, é necessário que haja fornecimento de ar e de combustível para a célula.

O ar, que fornece o oxigênio (O_2) para a reação, irá penetrar para o catodo, enquanto que o combustível penetrará em direção ao anodo. Nos eletrodos ocorrerão reações que produzirão íons e elétrons. Os íons irão atravessar a célula passando pelo eletrólito em direção ao outro eletrodo e os elétrons irão passar pelo circuito externo, ativando uma carga qualquer. Essas reações eletroquímicas geram calor que podem ser aproveitado para outros fins.

As células combustíveis são modulares, ou seja, pode-se construir células combustíveis com maiores capacidades simplesmente conectando eletricamente células individuais. Teoricamente, é possível construir células combustíveis de qualquer tamanho.

As emissões produzidas por células combustíveis irão depender do tipo de combustível que ela utiliza. PEMFC, que usam como combustível apenas hidrogênio (H_2) puro, irão produzir apenas água. Já outros tipos de células como as SOFC e as MCFC, que usam hidrocarbonetos como combustível geram, além de água, dióxido de carbono (CO_2). Essas últimas, porém, são tão competitivas ou até mais quando comparadas com outras modernas tecnologias que utilizam o mesmo combustível.

Em relação a outros tipos de emissões como, por exemplo, NO_x , as células combustíveis são extremamente competitivas. Observe o gráfico abaixo, no qual estão plotadas as emissões de NO_x , CO e VOC (*volatileorganiccompounds*) para diferentes tipos de células combustíveis quando essas estão produzindo apenas energia elétrica.

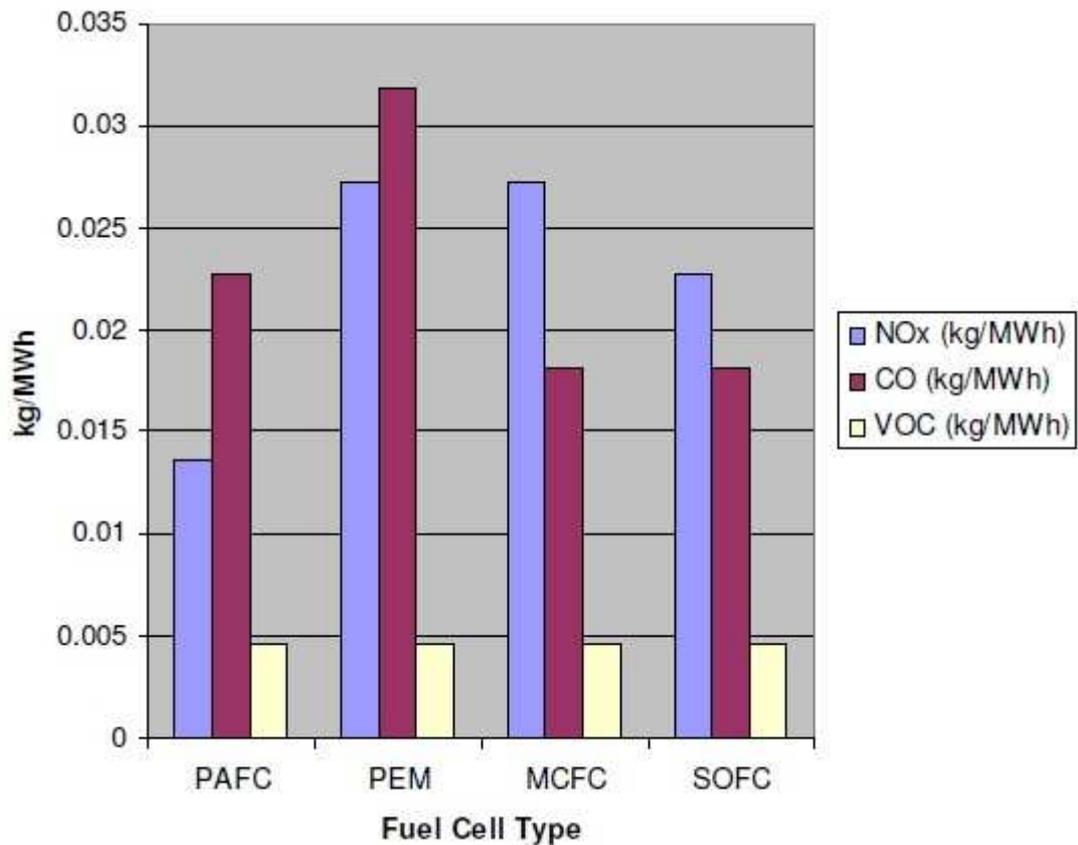


Figura 4 - Emissões por tipo de célula combustível

Note que as emissões de NO_x não superam 0,035 g/kWh. Como foi dito no capítulo anterior, a legislação mais rigorosa da IMO, para ECA's em 2021, estabelece o limite de NO_x em 2 g/kWh. Ou seja, as células combustíveis conseguem atender até as legislações mais rigorosas tranquilamente no que concerne emissões.

Uma vez que as células combustíveis ainda estão no início de seu desenvolvimento, elas ainda são em muitos tipos. Nenhum desses tipos se sobrepôs como o mais importante ou viável para todas as aplicações.

Visando a concisão, serão descritos neste trabalho apenas os princípios de funcionamento das células combustíveis que têm sido mais usadas em navios.

3.2) PEMFC (Polymer Exchange Membrane Fuel Cell)

As células combustíveis são comumente divididas de acordo com a temperatura em que elas operam. A PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) é classificada como de baixa temperatura, pois trabalha entre 60 e 80°C. O fato de ela trabalhar em baixas

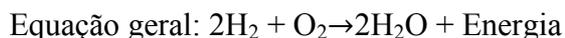
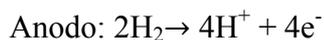
temperaturas é um atrativo, pois significa que ela não precisa aquecer durante um tempo muito longo antes de começar a produzir eletricidade.

Esse tipo de célula foi criada primeiramente pela General Electric e foi usada pela NASA. Atualmente, ela é a que mais se destaca dentre os diferentes tipos de células combustíveis, principalmente no setor automotivo.

O anodo é geralmente feito de carbono, mas tem em sua superfície platina. A platina serve como catalisador para reação que irá ocorrer no anodo. Moléculas de hidrogênio (H_2) fluem para o anodo e quando entram em contato com a platina se separam em dois íons H^+ (dois prótons) e dois elétrons. Os prótons seguem caminho pela membrana, enquanto os elétrons passam por um circuito externo, gerando a energia elétrica.

A membrana é composta por uma fina camada de um polímero. Essa membrana é permeável somente a prótons, dessa maneira, os H^+ que foram produzidos no anodo conseguem atravessá-la em direção ao catodo, enquanto os elétrons que também foram produzidos no anodo tem que seguir caminho pelo circuito externo.

No catodo, que também é feito de carbono com superfície de platina, moléculas de oxigênio (que são providas ou diretamente do ar ou então na forma de oxigênio puro) irão reagir com os H^+ que vieram do anodo e com os elétrons que provêm do circuito externo. Tal reação também é catalisada pela platina. A seguir apresentam-se todas as reações químicas acima citadas:



O papel das *bedplates* é conectar cada conjunto da célula combustível eletricamente, fornecer reagentes para os eletrodos e também retirar os produtos gerados. As *bedplates* possuem espécies de caminhos no seu interior, nos quais são conduzidos o combustível para a célula e por onde são retirados os produtos da reação e os elétrons, que vão para o circuito externo.

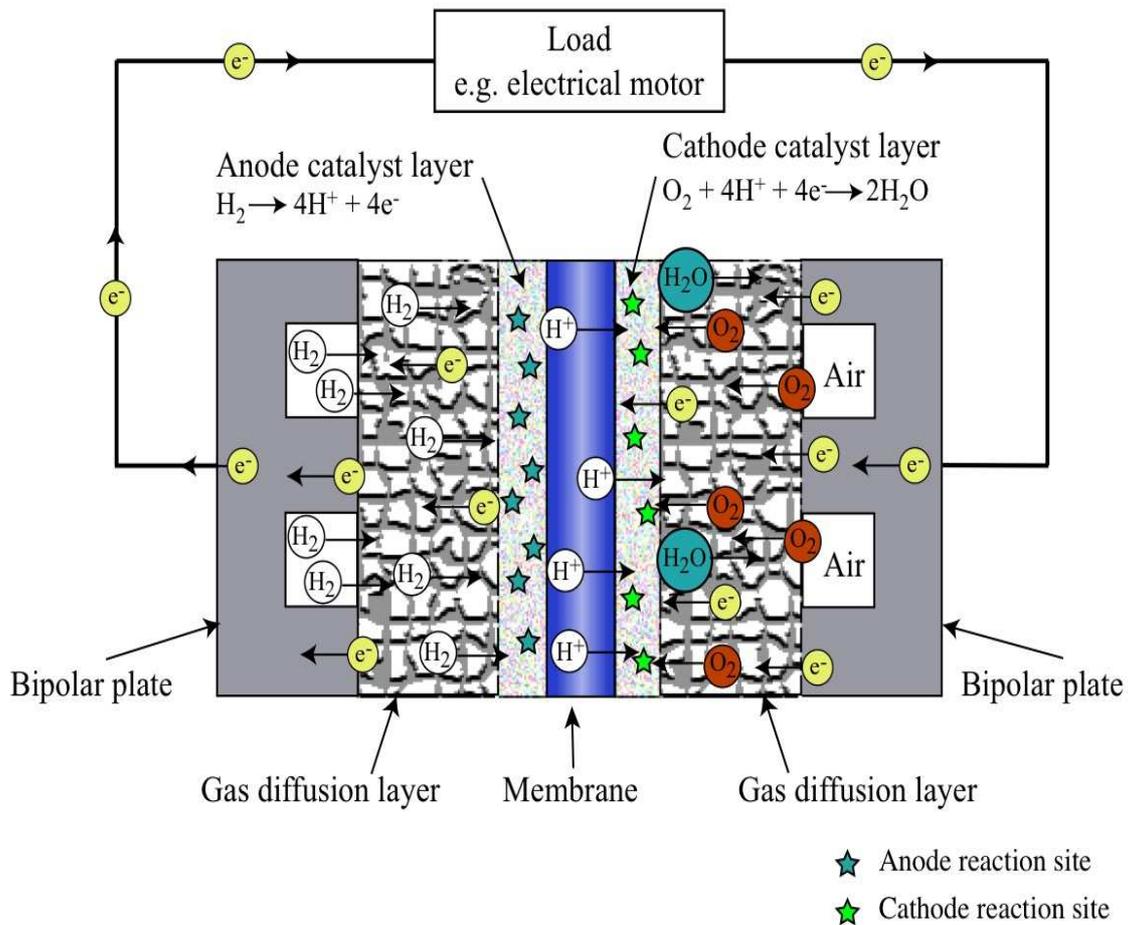


Figura 5 - Esquema de uma PEMFC

Dentre as vantagens das PEMFC podemos enumerar:

- Conseguem variar a potência de saída rapidamente para atender a demanda;
- Operam em temperaturas relativamente baixas, permitindo uma rápida partida quando estão frias;
- São altamente eficientes, produzindo cerca de 40 a 50% da voltagem teórica máxima;
- Produzem apenas água como emissão.

Entre as desvantagens:

- Ainda são muito caras. Vários componentes das PEMFC como a platina, protonexchangemembrane e bipolar plates ainda tem preços elevados.

- Utilizam hidrogênio puro como combustível. Seria necessário desenvolver toda uma nova infraestrutura para abastecer esses novos veículos movidos a hidrogênio.

Outro ponto importante no que se refere à utilização das PEMFC diz respeito a obtenção de hidrogênio. Tal gás não é encontrado puro na natureza e é produzido através da reforma catalítica, que será explicada no próximo tópico.

O problema com o hidrogênio é que, apesar de a sua “queima” nas células combustíveis não produzirem nenhum tipo de poluição, a produção do hidrogênio em si, produz (principalmente CO e CO₂). Muitos críticos das células combustíveis dizem então que a poluição foi apenas transferida de uma parte da cadeia produtiva para outra

Apesar de ainda haver emissão de poluição no uso de hidrogênio como combustível, essa poluição é bem menor quando se compara com a emissão feita por motores de combustão interna. Quando o hidrogênio é produzido a partir de metano, para produzir a mesma quantidade de energia, a emissão de poluentes é por volta da metade da emissão proveniente da queima de combustíveis fósseis em motores de combustão interna. Isso ocorre porque as células combustíveis são muito mais eficientes que os motores de combustão interna. Ou seja, apesar de o uso de hidrogênio ainda não representar uma fonte de energia totalmente limpa, já é uma grande avanço quando comparada com os métodos atuais.

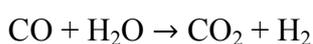
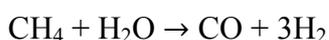
3.3) Reforma catalítica

Antes de detalhar o funcionamento das SOFC e MCFC, é importante falar sobre um processo chamado reforma catalítica, reforma a vapor ou oxidação catalítica.

A reforma a vapor é o processo industrial para a obtenção de hidrogênio (H₂) a partir de hidrocarbonetos. O hidrocarboneto mais usado para a produção de H₂ é o gás natural, cujo principal componente é o metano (CH₄). Além do metano, outros hidrocarbonetos (como diesel, gasolina, propano, querosene, etc) ou bicompostíveis (como etanol) também podem ser usados para realizar a reforma catalítica.

O processo se dá da seguinte maneira: o metano é exposto a vapor d’água em um ambiente a alta temperatura e com ajuda de um catalisador origina hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono.

As reações descritas acima estão representadas quimicamente a seguir:



Equação Geral: $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$

Trata-se de um processo muito importante, pois apesar de o hidrogênio ser o elemento mais abundante do universo, no planeta Terra ele é raramente encontrado como H_2 , forma usada como combustível nas células combustíveis.

Quando se compara a oxidação catalítica com a combustão de combustíveis fósseis, percebe-se que ambos os processos produzem dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO). Porém, enquanto durante a combustão são gerados SO_x e NO_x (devido à qualidade do combustível), na oxidação catalítica ou são geradas baixíssimas concentrações desses óxidos ou então nenhuma.

3.4) SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)

As SOFC são células combustíveis de alta temperatura, pois funcionam entre 800 e 1000 °C.

O eletrólito das SOFC é uma cerâmica sólida, geralmente feita de óxido de zircônio estabilizado com óxido de ítrio. O catodo e o anodo devem ser permeáveis respectivamente ao oxigênio (O_2) e ao combustível (geralmente $\text{H}_2 + \text{CO}_2$). Nesse tipo de célula combustível não é necessário a presença de platina ou outros metais nobres para servirem de catalisadores, uma vez que as reações ocorrem em um ambiente com temperaturas altíssimas, e, por isso, não precisam ser aceleradas. Outro ponto importante na construção de uma SOFC é que os elementos de conexão entre as células combustíveis devem ser de materiais que resistam às altas temperaturas a que vão estar expostos. Tais elementos de conexão são feitos de materiais muito caros e representam uma grande parte do custo total de confecção de uma SOFC.

Abaixo tem-se uma representação esquemática das reações que ocorrem no interior de uma SOFC:

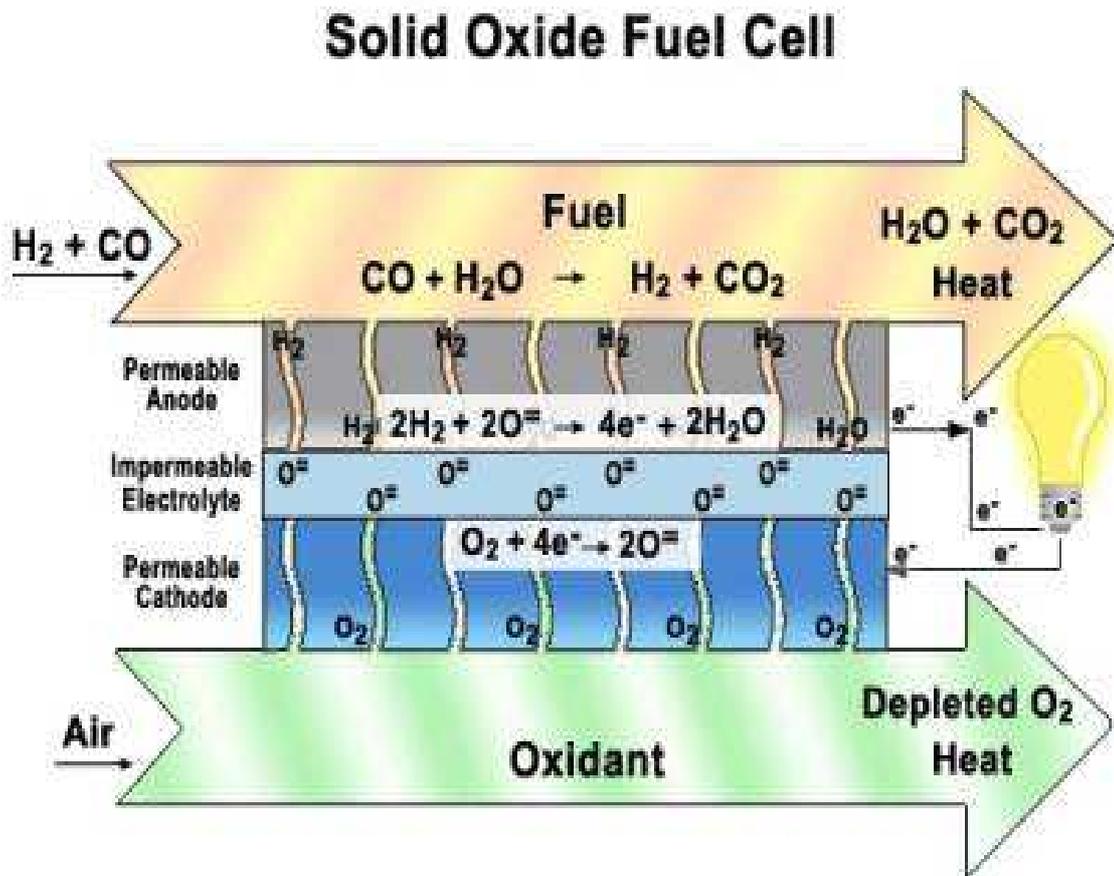


Figura 6 - Representação esquemática das reações no interior de uma SOFC

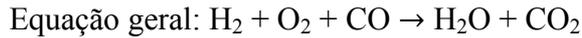
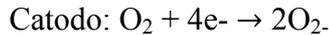
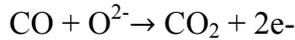
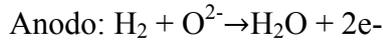
No catodo, o oxigênio que penetrou na célula receberá elétrons e se transformará em ânions O^{2-} . Esses ânions irão atravessar a cerâmica (eletrólito) em direção ao anodo. Lá, esses ânions irão reagir com o hidrogênio (H_2) e o monóxido de carbono (CO) produzindo água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), energia e elétrons. Esses elétrons que são liberados atravessam um circuito externo, ativando uma carga qualquer, atingem o catodo e junto com as moléculas de oxigênio (O_2) formam os ânions O^{2-} , terminando o ciclo.

O combustível utilizado pelas SOFC podem ser de vários tipos, como diesel, gasolina, gás natural, etc. Esses combustíveis são reformados internamente à célula, através do processo de reforma a vapor. Alguns combustíveis muito pesados, porém, devem passar por um reformador externo antes de penetrar na célula combustível. Esse é um grande atrativo das SOFC, pois enquanto as PEMFC utilizam apenas H_2 puro, as SOFC podem utilizar combustíveis que já são extensamente utilizados, favorecendo sua adoção.

A oxidação catalítica que ocorre nas SOFC ajuda a equilibrar termicamente a célula combustível, pois enquanto a reação geral da célula libera calor, a reforma catalítica é

endotérmica e absorve parte desse calor gerado, diminuindo a necessidade de resfriamento externo à célula.

As reações acima descritas são representadas quimicamente abaixo:



Podemos então sintetizar as vantagens e desvantagens das SOFC.

Vantagens:

- Podem trabalhar com vários combustíveis e não só com hidrogênio puro, o que favorece esse tipo de célula em relação às PEMFC;
- O calor gerado pela célula pode ser utilizado para favorecer a reação de reforma bem como pode ser utilizado para outros fins como, por exemplo, produzir vapor (aumentando o rendimento da célula);
- Uma vez que as reações ocorrem a temperaturas muito altas, essa célula não utiliza metais nobres como catalisadores (o que a torna mais barata).

Desvantagens:

- Como trabalha em altas temperaturas, tais células demoram muito tempo para “partir”;
- Todos os materiais dos componentes de uma SOFC devem ser resistentes a altas temperaturas, o que os tornam muito caros.

3.5) MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)

A MCFC é uma célula combustível de alta temperatura que funciona por volta de 650 °C. O eletrólito usado são sais de carbonato, que na temperatura de funcionamento da célula se encontram fundidos. As reações químicas que ocorrem no anodo e catodo estão explicitadas na figura abaixo e através das reações químicas.

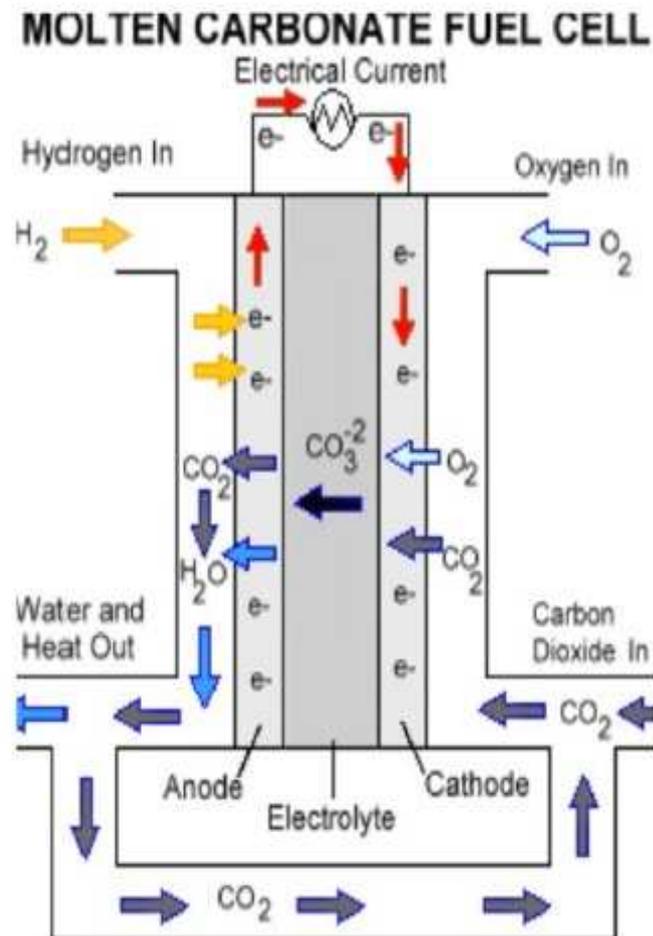
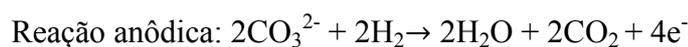


Figura 7 - Esquema de uma MCFC



No anodo, o hidrogênio reage com os íons carbonato (que são produzidos no catodo), produzindo água, dióxido de carbono e elétrons. Esses irão passar pelo circuito externo, ativando uma carga qualquer, em direção ao catodo. Lá, esses elétrons irão reagir com o oxigênio (proveniente do ar) e com o dióxido de carbono (proveniente da reforma catalítica do combustível), originando o íon carbonato, que irá atravessar o eletrólito em direção ao anodo, onde reagirá com o hidrogênio, fechando o ciclo.

Por ser uma célula combustível de alta temperatura, a MCFC tem muitas características similares a SOFC.

- A MCFC pode utilizar uma grande gama de combustíveis como gás natural, metano, propano, etc;

- Por trabalhar em altas temperaturas, não precisa utilizar metais nobres (caros) como catalisadores.
- Os materiais que compõem a célula devem ser resistentes a altas temperaturas e à corrosão;
- A célula demora bastante tempo para “partir”.

4 APLICAÇÃO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS EM NAVIOS

As células combustíveis são uma tecnologia ainda em desenvolvimento. Apesar disso, já existe alguns navios e projetos que as utilizam. Nesse capítulo, serão descritas as experiências com essas tecnologias e suas conclusões, bem como os futuros projetos que pretendem utilizar tal tecnologia.

Os navios (ou projetos) estão agrupados de acordo com a célula combustível que usam (ou pretendem usar).

4.1) PEMFC

4.1.1) FCS Alsterwasser

O FCS (*fuelcellship*) Alsterwasser é uma balsa de 100 passageiros que navega no Rio Alster, Hamburgo, Alemanha. Esse navio tem um comprimento de 25,46 m e calado de 1,33 m (com passageiros). É equipado com duas PEMFC de 48 kW e um sistema de baterias, ambos os sistemas desenvolvidos pela empresa Proton Motor. O projeto do navio foi aprovado pelo GL (Germanischer Lloyd).

As células combustíveis do navio utilizam hidrogênio puro como combustível. Cerca de 50 kg de hidrogênio são armazenados a bordo do navio em tanques pressurizados a 350 bar. Essa quantidade de combustível é suficiente para manter a balsa em funcionamento por 3 dias. O reabastecimento do navio dura apenas 12 minutos.

O navio é dotado de um sistema híbrido de gerenciamento de energia. Se o navio estiver com muita carga, as baterias (que são carregadas pelas células) e as células funcionaram conjuntamente. Caso contrário, somente as baterias irão funcionar, o que prolonga a vida útil das células combustíveis.

No que concerne às emissões, a única substância emitida é vapor d'água.

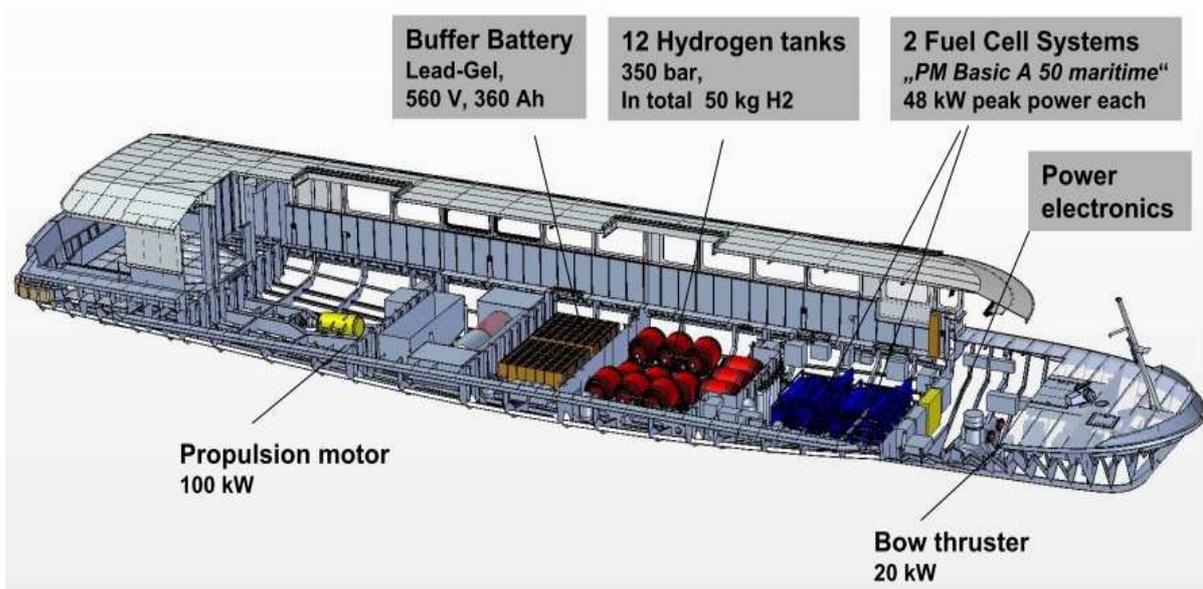


Figura 8 - Esquema do FCS Alsterwasser



Figura9 - FCS Alsterwasser

4.2) SOFC

4.2.1) MV Undine

Trata-se de um navio Ro-ro que opera entre a Alemanha e os Estados Unidos e que utiliza um sistema de SOFC de 20 kW para gerar energia auxiliar para o navio enquanto esse está no porto.

O MV Undine é resultado do METHAPU *Project (Validation of a Renewable Methanol-based Auxiliary Power System for Commercial Vessels)* que é integrado pela Wärtsilä, Wallenius Marine, Lloyd's Register, Det Norske Veritas, e pela Universidade de

Gênova. Parte do projeto foi financiado pela União Europeia. O objetivo de tal projeto era facilitar a introdução de regulações internacionais para o uso de metanol como combustível marítimo.

As células combustíveis a bordo do MV Undine utilizam metanol como combustível. Durante a operação do navio, foi concluído que o uso de tal combustível não compromete a segurança das pessoas a bordo nem do navio.



Figura10 - MV Undine

4.3) MCFC

4.3.1) Viking Lady

Trata-se de um navio offshore que utiliza um sistema de MCFC, totalizando 330 kW de potência. Além das células combustíveis, o navio ainda utiliza quatro geradores, sendo que ambos, célula combustível e gerador, utilizam gás natural como combustível.

O navio é resultado do projeto FellowSHIP, que ainda está em curso e é integrado pela DNV (DetNorskeVeritas), Eidesvik Offshore e pela Wärtsilä. O próximo objetivo deste projeto é instalar um conjunto de baterias a bordo do Viking Lady para criar um sistema híbrido de geração de energia. Quando alcançado esse objetivo, os índices de emissão do Viking Lady, que já são extremamente bons (o navio opera no Mar do Norte, uma ECA), irão diminuir ainda mais. A previsão é cortar as emissões de CO₂ em mais de 50% e erradicar as

emissões de SO₂, NO_x e material particulado. A eficiência energética do navio irá melhorar em 30%.



Figura 11 - Viking Lady

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que o preço dos combustíveis para navios estão aumentando cada vez mais e a legislação para evitar poluição do ar por navios está se tornando cada vez mais rígida, as células combustíveis aparecem como uma ótima alternativa para substituir os motores diesel a bordo dos navios.

As células combustíveis são extremamente eficientes (algumas chegam a até 85% de eficiência), e são pouco poluentes. Seu uso seria a solução ideal para a navegação dentro de ECA's, como o Mar do Norte, por exemplo.

Apesar dessas vantagens, as células combustíveis ainda são bastante caras de produzir e ainda estão apenas em um estágio inicial de implantação em navios. Os projetos em navios são poucos e muito caros, mas já demonstram a viabilidade da utilização dessa tecnologia.

Atualmente, as células combustíveis ainda precisam de algumas melhorias técnicas e produção em massa para possibilitar sua utilização a bordo. Mas é certo que as empresas que investirem em células combustíveis estarão apostando corretamente no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONJA, Funmi. **High Fuel Prices Are Creating Rough Seas For Shipping Companies.**

Disponível em: <http://www.infrastructureviews.com/2013/09/04/high-fuel-prices-are-creating-rough-seas-for-shipping-companies/>. Acesso em: 10/07/2014

Brief of the 66th session from 31 March to 4 April of the MEPC. Disponível em:

<http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/References/Regulatory/2014/MEPC66Brief>. Acesso em: 10/07/2014

BARRY, Keith. **Car Carrier's Powerplant Like a Bloom Box On a Boat.** Disponível em:

<http://www.wired.com/2010/06/methanol-fueled/>. Acesso em: 27/07/2014

DE GUIRE, Eileen J. **Solid oxide fuelcells.** Disponível em:

<http://www.csa.com/discoveryguides/fuecel/overview.php>. Acesso em: 26/07/2014

EUROPEAN FEDERATION FOR TRANSPORT AND ENVIRONMENT

AISBL. **Annual Report 2013.** Relatório. Bruxelas, 2014. Disponível em:

http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/finalT%26E_AR_2013_web.pdf. Acesso em: 09/07/2014

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **In-Use Marine Diesel Fuel.** Disponível em:

<http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/marine/ci/fr/dfuelrpt.pdf>. Acesso em: 02/08/2014

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, **Renewable Energy Fact Sheet:**

Fuel Cells. Disponível em:

http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/finalT%26E_AR_2013_web.pdf. Acesso em: 27/07/2014

Fuel Cells. Disponível em:

http://www.eusustel.be/public/documents_public/WP/WP3/Fuel%20Cells%20Report%20-%20Final.pdf. Acesso em: 27/07/2014

Fuel cells in maritime operation. Disponível

em: <http://fuelcellsworks.com/news/2011/04/28/fuel-cells-in-maritime-operation>. Acesso em: 27/07/2014

Fuel cell technology. Disponível

em: http://www.che.sc.edu/centers/PEMFC/about_fuelcell_1.html. Acesso em: 26/07/2014

LLOYD'S REGISTER MARINE; UCL ENERGY INSTITUTE. **Global Marine Fuel Trends 2030.** Disponível em: [http://www.lr.org/en/_images/12-](http://www.lr.org/en/_images/12-5926_Global_Marine_Fuel_Trends_2030.pdf)

[5926_Global_Marine_Fuel_Trends_2030.pdf](http://www.lr.org/en/_images/12-5926_Global_Marine_Fuel_Trends_2030.pdf). Acesso em: 09/07/2014

MCFC - Molten Carbonate Fuel Cells Portal Page. Disponível em:

http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/molten_carbonate_fuel_cells_mcfc/4,1,1,2505.html. Acesso em: 27/07/2014

MULLER, Richard A. **A Pollution-Free Hydrogen Economy? Not So Soon.** Disponível em: <http://www.technologyreview.com/news/401988/a-pollution-free-hydrogen-economy-not-so-soon/>. Acesso em: 24/08/2014

NICE, Karim; STRICKLAND, Jonathan. **How fuel cells work.** Disponível em: <http://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/alternative-fuels/fuel-cell.htm>. Acesso em: 26/07/2014

One hundred passengers and zero emissions - The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells. Disponível em: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&ep=file&fil=Zemships_Brochure_EN.pdf. Acesso em: 26/07/2014

PEMFC. Disponível em: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pemfc>. Acesso em 26/07/2014

ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. **Future Ship Powering Options Exploring alternative methods of ship propulsion.** Relatório. Londres, 2013. Disponível em: <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/future-ship-powering-options>. Acesso em 02/07/2014

RYAN, Marge. **Fuel Cells For Greener Shipping.** Disponível em: <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/analyst-views/2012/12-12-05-fuel-cells-for-greener-shipping>. Acesso em: 26/07/2014

Success at IMO MEPC 66: Tier III Implementation Delayed until 2021. Disponível em: <http://www.icomia.com/news/news.aspx?NewsId=320>. Acesso em: 10/07/2014

Technology. Disponível em: <http://vikinglady.no/technology/>. Acesso em 27/07/2014

VERMEIRE, Monique B. **Everything You Need to Know about Marine Fuels.** Ghent, Bélgica, 2007. Disponível em: http://www.chevronmarineproducts.com/docs/EverythingAboutFuels_v0108_LO.PDF. Acesso em: 10/07/2014

Wärtsilä has unique integrator role in FellowSHIP - a pioneering technology project. Disponível em: <http://www.wartsila.com/en/wartsila-has-unique-integrator-role-in-fellowship>. Acesso em: 27/07/2014

Wärtsilä installs fuel cell unit on vessel - unique SOFC technology provides power to Wallenius' car-carrier 'Undine'. Disponível em: <http://www.wartsila.com/en/press-releases/wartsila-installs-fuel-cell-unit-on-vessel-unique-SOFC-technology>. Acesso em: 27/07/2014

WÜST, Christian. **Smoking Ban: Shipping Shifts to Cleaner Fuel.** Disponível em: <http://www.spiegel.de/international/business/new-imo-regulations-push-shipping-industry-toward-cleaner-fuel-and-lng-a-916811.html>. Acesso em: 10/07/2014