

## CUSTOS E ESTADO DA ARTE DAS TECNOLOGIAS EM PILHAS A COMBUSTÍVEL COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS NO MERCADO MUNDIAL

Coronado. C. Rodriguez,  
Braga. L. Bollini,  
Silveira. J. Luz  
christian@feg.unesp.br  
lucia@feg.unesp.br  
joseluz@feg.unesp.br

UNESP – Sao Paulo State University – Faculty of Engineering of Guaratinguetá  
Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos (www.feg.unesp.br/gose)

**Resumo:** O hidrogênio é uma forma de energia alternativa aos combustíveis fósseis que tem sido considerado como novo vetor energético num futuro não muito distante. O seu uso em células a combustível, permite juntamente com o oxigênio ou ar, a conversão para eletricidade e energia térmica, de forma limpa e eficiente, podendo ser utilizados em instalações estacionárias (por exemplo, em residências, estabelecimentos comerciais, etc., via métodos de cogeração) ou no sector automobilístico. As grandes vantagens da utilização do hidrogênio como vetor energético, produzido a partir de fontes renováveis, no caso do etanol, por exemplo, caso Brasil; permite um aumento da participação das energias renováveis e a redução das emissões de gases de efeito de estufa e outros poluentes atmosféricos que afetam os principais centros urbanos. Neste trabalho se apresentará o estado da arte das tecnologias de células a combustíveis comercialmente disponíveis no mercado mundial, as suas aplicações, estado de desenvolvimento tecnológico e as principais empresas do mercado mundial. Apresentam-se também alguns valores de custo de investimento US\$/kW e dados de vida útil de sistemas células a combustível para se tornar tal tecnologia em uma alternativa comercialmente disponível. Conclui-se com uma descrição detalhada de sistemas comercialmente disponíveis, dando ênfase a células do tipo PEMFC. Palavras-chaves: Hidrogênio, Célula a Combustível, PEMFC, custo, desenvolvimento.

**Abstract:** The hydrogen is a form of alternative energy to fossil fuels that has been considered like new power vector for a future not far distant. Its use in fuel cells allows, together with oxygen or air to conversion for electricity or thermal energy in a clean and efficiency way, being able to be used in stationary facilities (for example, residences, business, etc; using cogeneration's methods) or in the automobilist sector. The great advantages of the use of hydrogen like power vector, in case of ethanol (Brazilian market), it allows an increase of the participation of alternative energies and the reduction of the greenhouse gas discharges and another polluting atmospherics that affect the main urban centers. In this work a state-of-the-art of the technologies of fuel cells available in the worldwide market will appear; its applications, state of technological development and the main companies of the world-wide market. One will also appear some data of costs of investment (US\$/kW) and values of useful life of systems with fuel cells in order of becoming such technologies in alternatives commercially available. One concludes with a detailedb description of systems of fuel cells available in the market with emphasis to the Polymer Elctrolyte Membrane Fuel Cell. Keywords: Hydrogen, fuel cells, PEMFC, cost, development

## 1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio ligado em compostos orgânicos e na água constitui 70% da superfície terrestre, ou seja é o elemento mais abundante do universo e não se apresenta na forma livre. A quebra das ligações de água com energia elétrica (eletrólise), a biomassa via decomposição térmica ou biológica, ou os próprios combustíveis fósseis como o gás natural, o petróleo e inclusive o carvão mineral permitem produzir hidrogênio e então utiliza-lo como vetor energético. Daí entra em cena a utilização da célula combustível. A célula a combustível (Fuel Cell) é uma fonte alternativa de energia que tem como maior vantagem o baixo impacto ambiental, associado a uma enorme capacidade de geração de energia, o que a torna um objeto de estudo em potencial para órgãos governamentais, institutos de pesquisas, universidades e indústrias do setor privado. Particularmente no ramo automotivo, os motores de combustão interna são responsáveis por uma grande parcela da emissão de dióxido de carbono e outros gases poluentes à atmosfera e as células a combustível estão sendo discutidas como uma das melhores alternativas aos motores de combustão interna. Segundo pesquisas independentes, o mercado das pilhas a combustível, vai registrar nos próximos 10 anos um índice de crescimento anual entre 40 e 60% no transporte. Por exemplo, na União Européia se espera que para o ano 2015, 2% dos veículos que vão circular na União Européia utilizem como combustível o hidrogênio, neste futuro cenário o mercado dos veículos que utilizem pilhas a combustível serão ao redor de 16,3 bilhões de Euros antes do ano 2020, e 52 bilhões de Euros para o ano 2040. [Zabalza et al, 2005] No que se refere às centrais elétricas de geração de energia, tanto na Europa como nos Estados Unidos, eles terão que substituir e aumentar a sua capacidade de produção com sistemas de geração distribuída baseados principalmente em energias renováveis, turbinas a gás e pilhas a combustível. Não obstante, o mercado de pilhas a combustível continua enfrentando importantes obstáculos técnicos e econômicos devido fundamentalmente à falta de infra-estrutura de armazenamento e distribuição do hidrogênio.

## 2. DEFINIÇÃO DE PILHA A COMBUSTÍVEL E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Pilha a combustível é “um dispositivo eletroquímico que converte de forma contínua energia química em energia elétrica (e algum calor) desde que lhe sejam fornecidos combustível e oxidante” [Chen,2003]. O princípio de funcionamento de uma pilha a combustível é muito semelhante ao de uma convencional célula galvânica (tal como baterias de chumbo convencionais, por exemplo), com a exceção de que os reagentes (combustível e oxidante) são fornecidos do exterior ao invés de constituírem uma parte integrante da sua construção. Ou seja, quando uma célula galvânica é concebida a energia total que poderá produzir é definida, ao invés do que acontece com as pilhas a combustível em que necessidade dessa definição não se coloca. Esta característica tem diversas vantagens, uma delas é a possibilidade de “recarregar” rapidamente um sistema baseado em células a combustível, ao contrario dos sistemas com baterias em que, dado que se tem de provocar a reação inversa no momento em que se recarrega, o recarregamento acarreta uma perda de tempo. Uma célula eletroquímica é constituída por dois eletrodos, ou condutores metálicos, em contato com um eletrólito, um condutor iônico (este poderá ser uma solução líquida ou um sólido, como é o caso da PEM). Um eletrodo ou seu eletrólito formam aquilo que se designa de compartimento eletródico. Eventualmente, os dois eletrodos poderão partilhar o mesmo compartimento (caso da PEM). Existem diversos tipos de eletrodo, no entanto, quando se trata de reagentes gasosos, são utilizados eletrodos de platina. Quando um metal neutro (caso da platina) é utilizado, a sua presença serve apenas como fonte ou sumidouro de elétrons, não tendo qualquer outro papel na reação além de catalisador.

Apesar de toda diversidade de pilha a combustível que existem, o seu princípio de funcionamento é essencialmente idêntico. No ânodo, um combustível (usualmente hidrogênio) é oxidado, dando origem a elétrons e prótons e, no cátodo, o oxigênio é reduzido, formando uma espécie de oxido. Dependendo do eletrólito presente se dá o transporte ou de prótons ou de íons oxido através do eletrólito, gerando-se água e energia elétrica. Devido ao fato de o eletrólito ser um isolante eletrônico, os elétrons gerados no ânodo e necessários no cátodo, têm de percorrer um circuito elétrico externo, realizando assim trabalho elétrico.

### 3. ESTADO DA ARTE

Existe no mercado uma variedade de pilhas a combustível em distintas etapas de desenvolvimento. Podem-se classificar diversas categorias, dependendo da combinação do tipo de combustível e oxidante, se o combustível é processado fora (reformado externo) ou dentro (reformado interno) da pilha a combustível, o tipo de eletrólito, a temperatura de operação, etc. A classificação mais comum das pilhas se baseia no tipo de eletrólito utilizado: Pilhas a combustível com eletrólito de membrana polimérica de intercâmbio de prótons (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell – PEMFC), que incluem as pilhas de metanol direto (Direct Metanol Fuel cell – DMFC). As pilhas tipo PEM receberão um maior enfoque no item 4.

- Pilhas a combustível alcalina (Alkaline Fuel Cell – AFC).
- Pilhas a combustível de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC).
- Pilhas a combustível de carbonato fundido (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC).
- Pilhas a combustível de óxido sólido (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC) de tecnologia planar e tubular.

As pilhas estão ordenadas em função da temperatura aproximada de operação, que variam desde aproximadamente 80 °C para PEMFC, aproximadamente 100 °C para AFC, aproximadamente 200 °C para PAFC, aproximadamente 650 °C para MCFC, e aproximadamente entre 800 – 1000 °C para SOFC. A temperatura de operação e a vida útil da pilha a combustível influenciam diretamente nas propriedades físico-químicas e termomecânica dos materiais usados na construção da pilha (por exemplo, eletrodo, eletrólito, cabo de corrente, etc.). Os eletrólitos aquosos estão limitados a temperaturas de 200 °C ou menos, devido à elevada pressão de vapor da água e/o a rápida degradação a elevadas temperaturas. A temperatura é um fator importante na determinação do tipo de combustível que pode utilizar uma determinada pilha. As pilhas de baixa temperatura com eletrólitos aquosos, estão limitadas apenas ao uso do hidrogênio puro como vetor energético. Nas pilhas de alta temperatura pode-se usar o hidrogênio com maiores teores de monóxido de carbono pois a cinética das reações nessas pilhas a alta temperatura é muito mais rápida e com pouca necessidade de uma elevada atividade catalítica. Para mais detalhes das reações dos diferentes tipos de pilha de combustível, vide as Figs. 1 e 2. Na Tabela 1, apresentam-se as conseqüências de alguns elementos químicos nas diferentes tecnologias de pilhas a combustível e na Tabela 2 um amplo resumo das tecnologias existentes, vantagens, desvantagens e aplicações em cada caso.

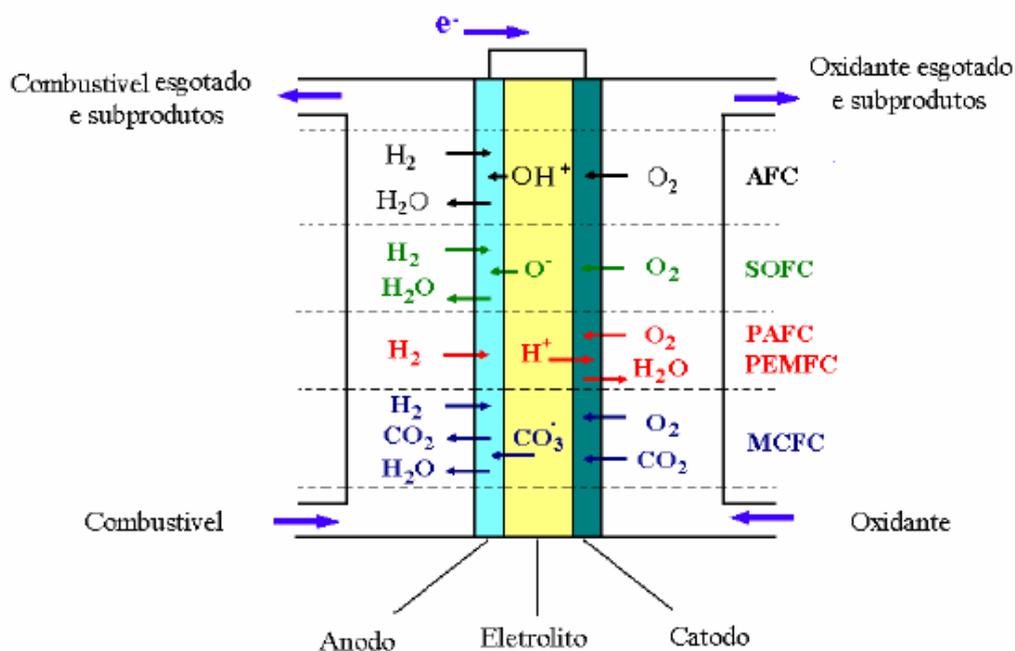


Figura. 1. Principais tipos de tecnologias de pilhas de combustível e as suas reações eletroquímicas.

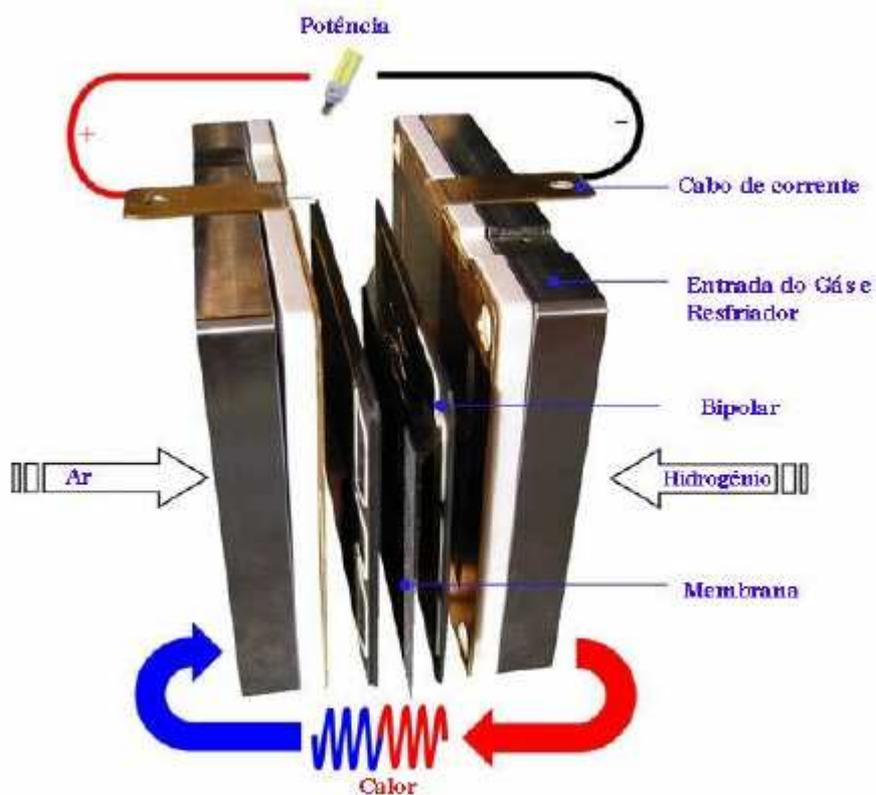


Figura 2. Principais partes de uma Pilha a Combustível tipo PEMFC.

#### 4. CÉLULA A COMBUSTÍVEL TIPO MEMBRANA DE TROCA DE PRÓTONS (PEMFC)

É a tecnologia preferida para aplicações em automóveis, equipamentos como celulares e geração de energia em residências. Inventada pela General Electric (GE) nos anos 50, e utilizada pela NASA no Projeto Apollo. A sigla PEMFC deriva do nome em inglês “Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, ou “Célula a combustível de Membrana de Troca de Prótons”, ou seja, utiliza uma membrana plástica, sólida, que tem a capacidade de transportar as cargas positivas quando úmida, fato este um desafio desta tecnologia, além de seu custo e durabilidade. Tabela 1. Impacto dos principais constituintes do gás combustível nas pilhas a combustível. [Alvarez, 2003].

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	Combustível	Combustível	Combustível	Combustível	Combustível
Monóxido de carbono (CO)	Veneno (> 10 ppm)	Veneno	Veneno (> 0,5 %)	Combustível <sup>a</sup>	Combustível
Metano (CH <sub>4</sub> )	Dissolvente	Veneno	Dissolvente	Dissolvente <sup>b</sup>	Combustível <sup>a</sup>
Dióxido de carbono e água (CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O)	Dissolvente	Veneno	Dissolvente	Dissolvente	Dissolvente
Enxofre (S, como H <sub>2</sub> S e COS)	Veneno (> 1 ppm)	Veneno	Veneno (> 50 ppm)	Veneno (> 0,5 ppm)	Veneno (> 1 ppm)

(a) Na realidade, o CO, com H<sub>2</sub>O, da H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, e o CH<sub>4</sub>, com H<sub>2</sub>O, se transforma em H<sub>2</sub> e CO mais rapidamente que reagindo como combustível no eletrodo.

(b) Combustível em MCFC de reformado interno.

A tecnologia PEMFC tem como característica ser uma célula a combustível de baixa temperatura, operando entre 60 e 140 °C [NETO, 2005]. Esta é uma das razões de sua aplicação em veículos automotivos, pois a operação em baixas temperaturas permite um início de funcionamento da célula a combustível mais rápido do que em outras tecnologias. Portanto é robusta e de fácil acionamento e desligamento, além das vantagens inerentes como a alta eficiência com emissão apenas de vapor d'água para atmosfera. Necessita, no entanto, da utilização de um excelente catalisador, como a platina, metal nobre, raro e caro. Como em baixas temperaturas as reações químicas são mais lentas, a platina tem como função acelerá-las. A platina ainda pode ser facilmente contaminada pelo monóxido de carbono e pelo enxofre, necessitando assim de um hidrogênio com altíssima pureza. Para tornar-se competitiva em aplicações automotivas, a membrana deve ter vida útil de 5 a 8 mil horas, desafio este ainda a ser alcançado, e que equivale a um motor a combustão com vida útil de 170.000 km [NETO, 2005]. Depois de transcorrida a sua vida útil, troca-se a célula a combustível, mas não o sistema completo. A platina pode ser recuperada em grandes porcentagens.

Tabela 2. Resumo das principais diferenças de tecnologias de pilhas de combustíveis.

Tipo de Pilha	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>ELETROLITO</b>	Membrana de polímero sólido. <i>Nafion</i> <sup>®</sup>	Solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH)	Ácido fosfórico líquido $H_3PO_3$	Solução líquida de lítio, sódio e potássio.	Oxido de zircônio sólido com ítrio ( $ZrO_2$ )
<b>APLICAÇÕES</b>	Veículos automotores, espaçonaves, mobilidade, geração estacionária.	Espaçonaves, aplicações militares.	Geração estacionária (100 kW a alguns MW). Cogeração	Geração estacionária (de algumas centenas de kW). Cogeração	Geração estacionária (de 10 a 100 kW). Cogeração
<b>VANTAGENS</b>	Eletrólito sólido reduz a corrosão e manutenção. Baixa Temperatura. Arranque rápido. Operação flexível	Reação catódica mais rápida em eletrólito alcalino. Maior eficiência (83% teórica)	Maior desenvolvimento tecnológico. 65% de eficiência em cogeração. Aceita $H_2$ impuro	Tolerância ao $CO/CO_2$ . Devido a sua alta temperatura possui maior eficiência e catalisadores mais baratos. Eletrodos a base de Ni	Alta eficiência (cinética favorável). (A reforma do combustível pode ser feita na célula). Vantagens pela alta temperatura e pelo eletrólito sólido.
<b>DESVANTAGENS</b>	Custo da membrana potência e eficiência. Sensíveis a impurezas por $H_2$ . Contaminação do catalisador com CO.	Sensível ao $CO_2$ . Gases ultra puros, sem reforma do combustível.	Controle da porosidade do eletrodo. Catalisador de platino. Baixa corrente e potência (eficiência limitada pela corrosão). Elevado peso e volume.	Problemas de materiais. Necessidade de reciclagem do $CO_2$ . Corrosão devido ao tipo de eletrólito. Baixa vida útil.	Problemas de materiais. Expansão térmica. Necessidade de pré-reforma. Corrosão devido a elevadas temperaturas. Baixa vida útil.
<b>TEMPERATURA DE OPERAÇÃO</b>	80 – 90 °C	60 – 90 °C	160 – 200 °C	650 – 700 °C	800 – 900 °C
<b>CARGA</b>	$H_3O^+$	OH <sup>-</sup>	$H_3O^+$	$CO_3^{2-}$	$O^{2-}$
<b>PRECISA DE REFORMADOR EXTERNO PARA O METANO</b>	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
<b>COMPONENTES ELETRODOS</b>	Platino - Carbono	Níquel, prata, metais nobres.	Platino – Carbono	Níquel	Níquel – Óxido de estrôncio.
<b>APLICAÇÃO DO CALOR PRODUZIDO</b>	Gás de processo + Sistema resfriamento independente.	Gás de processo + Sistema resfriamento independente.	Gás de processo + Sistema resfriamento independente.	Reformado Interno + gás de processo	Reformado interno + gás de processo

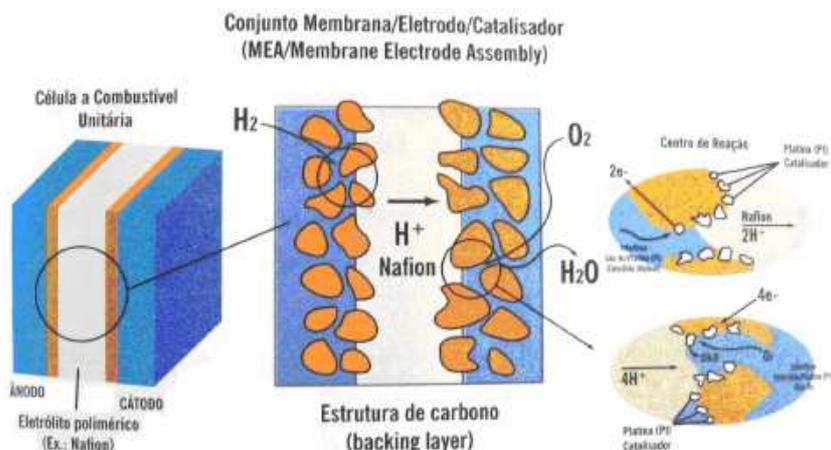


Figura 3. Desenho esquemático do Conjunto Membrana/Eletrodo/Catalisador [NETO, 2005]

#### 4.1. A Célula PEM

A célula a combustível do tipo membrana de troca de prótons transforma a energia química liberada durante a reação eletroquímica da oxidação do hidrogênio e da redução do oxigênio em energia elétrica. A célula PEM funciona da seguinte forma: o hidrogênio gasoso (o combustível) penetra na estrutura porosa do ânodo, dissolve-se no eletrólito e reage na superfície ativa do eletrodo, liberando elétrons ( $e^-$ ) e formando prótons ( $H^+$ ). Os elétrons liberados na oxidação do hidrogênio chegam ao cátodo por meio do circuito externo e participam da reação de redução do oxigênio. Os prótons formados no ânodo são transportados ao cátodo, onde reagem formando o produto da reação global da célula a combustível: água. A Fig. 4 mostra um esquemático de uma célula PEM, com suas partes e funcionamento.

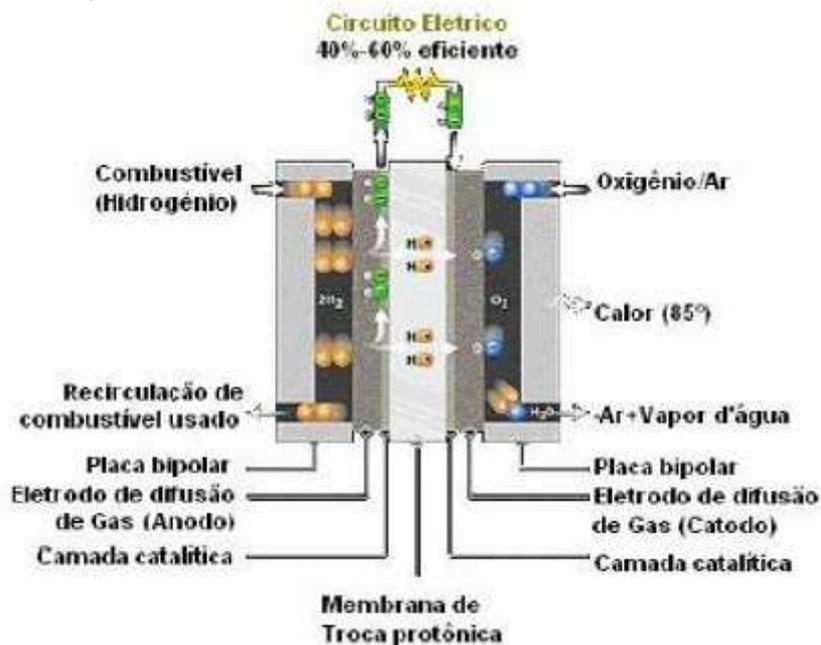


Figura 4: Esquemático de uma PEMFC [BRANDÃO, 2003]

#### 4.2. A Matriz Eletrolítica

O eletrólito é uma membrana polimérica de troca iônica do tipo ácido e é, em princípio, uma membrana de ácido perfluorossulfônico [DUPONT]. Uma das tecnologias mais conhecidas e utilizadas é a Nafion®, estrutura química desenvolvida pela DuPont. A Nafion® é uma membrana constituída por um copolímero de PTFE (politetrafluoretileno) / Ácido perfluorosulfônico. A estrutura da membrana Nafion® (Peso equivalente = 1100; m = 5; x = 2) é dada por [TORRES, 2002].

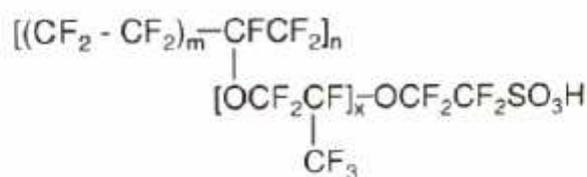


Figura 5. Estrutura química do polímero DuPont Nafion® [TORRES, 2002]

Este polímero apresenta como características desejáveis [TORRES, 2002]:

- alta solubilidade a oxigênio;
- alta condutividade de prótons,
- alta estabilidade química;
- baixa densidade;
- alta resistência mecânica.

Sua estrutura molecular possibilita que absorva água e, úmido, conduza seletivamente apenas íons de carga positiva barrando os íons de carga negativa. Tal propriedade, associada à inércia química, resistência mecânica torna-o útil como eletrodo sólido separador para aplicações para células a combustível, em processos de eletrólise de água e produção de cloro-soda. [DUPONT, 2008] Na presença de água, a membrana rapidamente absorve o líquido e os íons positivos (íons de hidrogênio, ou prótons) ganham mobilidade, ficando livres para transportar cargas positivas através da mesma, daí o nome “membrana de troca de prótons”. Um fator essencial para o funcionamento da célula a combustível é que o deslocamento dos prótons ocorre sempre somente na direção do ânodo para o cátodo, promovendo a circulação de elétrons pelo circuito elétrico externo. Embora seja fino, o eletrólito de membrana polimérica consegue separar os gases hidrogênio e oxigênio. Além disso, sua propriedade orgânica não conduz elétrons, obrigando-os a circular por um circuito externo de um lado a outro da célula. Uma membrana de troca iônica deve possuir propriedades como boa permeabilidade e boa seletividade, além de boa resistência mecânica, estabilidade dimensional e química e resistência a agentes oxidantes. Basicamente, quando se sintetiza uma membrana, analisase sua [TORRES, 2002]: Estabilidade térmica (para verificar a temperatura de degradação da membrana polimérica);

- Capacidade de absorção de água, uma vez que é muito importante que a membrana se mantenha úmida quando está sendo usada;
- Condutividade de prótons, pois é extremamente importante que a membrana seja uma boa condutora de prótons.

#### 4.3. O Catalisador

Devido à sua baixa temperatura de operação, a PEMFC utiliza um catalisador, devido à necessidade de alta velocidade nas reações químicas para o funcionamento da célula a combustível. Estas reações ocorrem devido à presença da Platina (Pt), que funciona como um catalisador, ligando-se aos átomos de hidrogênio e oxigênio somente o suficiente para que o processo principal nos eletrodos ocorra. No ânodo, a platina se liga ao átomo de hidrogênio quando a molécula de hidrogênio (H<sub>2</sub>) reage com a platina, liberando os átomos de hidrogênio em seguida, na forma de íons H<sup>+</sup> e elétrons e<sup>-</sup>. A ligação química entre um catalisador e o átomo de hidrogênio ou oxigênio não pode ser nem muito fraca e nem muito forte, característica esta que, atualmente, só a platina possui. Visto seu alto custo, os estudos visam sempre diminuir ao máximo a quantidade de catalisador nas células a combustível. Como ela é custosa e rara, a sua reciclagem é importante. O reaproveitamento da platina pode ser de até 98% [NETO, 2005] quando uma célula a combustível já teve sua vida útil terminada.

## 5. DESENVOLVIMENTO DE PILHAS A COMBUSTÍVEL

Com relação às famílias tecnológicas das pilhas a combustíveis, poderiam se considerar aquelas que são historicamente importantes, como por exemplo, as pilhas alcalinas (AFC) e as pilhas de ácido fosfórico (PAFC). As famílias atuais de pilhas que em sua maioria estão em fase de comercialização incluem as pilhas de membrana polimérica (PEMFC) de baixa temperatura e as pilhas tanto de óxido sólidos (SOFC) como as de carbonatos fundidos (MCFC), todas elas estão sendo usadas ou em sistemas portáteis, setor automobilístico, ou em setor residencial, cogeração e até geração estacionária. Por último a família de pilhas que ainda estão em desenvolvimento são as pilhas que utilizam metanol direto como combustível (DMFC) e aquelas que utilizam o borohidreto de sódio como combustível; ambas com futuras aplicações em sistemas portáteis. Existem alguns fatores críticos quanto ao estado da arte nas tecnologias de pilhas a combustível. Os fatores críticos estão dispostos em dois níveis: a nível geral e por segmento. Em nível geral: o preço do hidrogênio ainda é um inconveniente, o desenvolvimento das estações de serviço de hidrogênio será um grande passo para o uso generalizado desta nova fonte energética, seja do tipo "off shore", ou seja, transportando o hidrogênio até as estações de serviço ou do tipo "on shore", ou seja, utilizando a atual infraestrutura de transporte de gás natural e oleodutos. Em nível geral também, o preço do kW gerado pelas pilhas a combustível de qualquer tipo é também outro grande inconveniente. Por último a logística do hidrogênio, no que se refere ao transporte e armazenamento, será outro grande obstáculo a superar. O hidrogênio pode ser armazenado como gás, mas a baixa densidade do hidrogênio gasoso é uma desvantagem, isto significaria maiores volumes e elevadas pressões. O hidrogênio poderia ser armazenado em forma líquida, mas isto significaria recipientes criogênicos de dobre parede perfeitamente isolados para garantir a baixa temperatura do líquido, isto acrescentaria dificuldades a níveis de segurança e elevado consumo de energia. O hidrogênio também pode ser armazenado na forma de hidratos metálicos; estes compostos podem guardar mais hidrogênio por unidade de volume que o hidrogênio em forma líquida; o grande inconveniente é o peso relativamente alto associado ao material absorvente, no melhor dos casos se consegue aproximadamente 7% do peso em hidrogênio, por tanto não é recomendado esta forma de armazenamento para unidades móveis (automóveis), mas sim para unidades estacionárias. [Amos, 1998] Por último, existe a possibilidade de armazenar o hidrogênio em "nanotubos de carbono" formados por camadas de grafite envoltas formando um cilindro de diâmetro nanométrico, ainda este método está em fase de experimentação [INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA, 2008]. Outro fator crítico quanto ao estado da arte, mas por segmento, teria a ver com o tempo de vida útil da pilha e a autonomia de energia que esta garante no caso do seu uso em unidades móveis.

### 5.1. O custo de geração com pilha a combustível

A fim de se tornarem competitivos os custos dos sistemas com pilhas a combustíveis comparados com os sistemas convencionais, Zegers (2006) recomenda que os custos não devem exceder os seguintes valores:

- 66 US\$ / kW para carros particulares
- 260 – 390 US\$/kW para caminhões e ônibus
- 520 – 780 US\$/kW em aplicações portáteis
- 520 – 780 US\$/kW em aplicações de estabelecimentos e geração de potência. Os atuais custos de pilhas a combustível construídas de forma particular (protótipos) estão na faixa de 3900 - 6500 US\$/kW sendo ainda, muito difícil alcançar os preços fixados acima, em especial para carros particulares. Apesar de que a produção em massa deve reduzir fortemente os custos, alguns constituintes das pilhas como a platina e a membrana (no caso das PEMFC), provavelmente não tenham redução do custo no caso de produção em massa. As pilhas a combustível em geral, são apropriadas para ser produzidas em massa devido ao número limitado de distintas partes. As PEMFC têm a vantagem que as membranas poliméricas são armadas de acordo à necessidade da produção em massa da indústria e ainda com processos a baixa temperatura. Por outro lado o custo das MCFC e as SOFC se esperam que sejam consideravelmente mais elevadas devido aos altos custos pelas altas temperaturas de processo que alcançam (> 700 – 1000 °C). [Zegers, 2006].

As pilhas MCFC têm vantagem respeito às PEMFC e SOFC, no tamanho ( $m^2$ ) das células, ou seja, devido à economia de escala, estas lideram a redução dos custos. A densidade energética (energia por  $cm^2$  da superfície da célula) é um importante parâmetro e a chave para a redução de custos. Baixas densidades energéticas requerem mais superfícies de células por kW gerado, significando elevados custos. As superfícies podem variar entre 0,1 a 1 W/ $cm^2$ , dependendo do tipo de célula a combustível, por exemplo, a espessura e condutividade iônica do eletrólito, a velocidade das reações nos ânodo e cátodo, etc. As densidades energéticas típicas nas pilhas são: PEMFC e SOFC (planar) 0,7 – 1 W/ $cm^2$  [Singh et al, 2003]; DMFC: 0,05 – 0,1 W/ $cm^2$ ; MCFC e SOFC (tubular): 0,14 – 0,18 W/ $cm^2$ , respectivamente. [Vora, 2003]. As pilhas PEMFC e SOFC (planar) têm elevado potencial para reduzir os custos na suas construções. Os custos das membranas Nafion variam entre 54 – 260 US\$/kW; a espessura da membrana conta muito no custo final. O vencimento das patentes deve reduzir estes custos. Para as PEMFC, o custo do catalisador não é o maior problema, com uma carga de Pt com 0,3 mg de Pt/ $cm^2$  (o qual deve ser fatível num futuro não muito longe) o custo de platino deve ficar na faixa de 11 US\$/kW. Para as pilhas tipo DMFC o custo deve ser arredor de 520 – 1040 US\$/kW, assumindo 2 mg Pt/ $cm^2$  e 0,05 – 0,1 W/ $cm^2$ . MCFC e SOFC têm os mais baixos custos de catalisadoras. [Zegers, 2006] As pilhas tipo PEMFC são as que têm grandes potenciais na redução dos seus custos; usando hidrogênio puro, por exemplo, como este tem uma maior densidade energética, é apropriada a produção em massa e não precisa de reformador interno. Assim deve ser possível alcançar os preços fixados acima 66 US\$/kW para carros particulares; o qual é visto com bons olhos pela indústria automobilística a nível mundial.

## 5.2. Empresas que trabalham com pilhas a combustível e nível de desenvolvimento

Varias empresas internacionais estão empenhadas no desenvolvimento da tecnologia das pilhas a combustível. A seguir se apresentará algumas das empresas americanas que trabalham com as distintas tecnologias. A empresa ZTECK é conhecida internacionalmente pelo pioneirismo no desenvolvimento de pilhas a combustível de oxido sólido tipo planar. Dentro dos produtos que fabricam desde 1994 incluem stack (estrutura compacta) de pilhas de 1 kW com 16.000 horas de operação. Stack de 25 kW com reformadores de gás natural interno e projetos de 200 kW para sistemas de turbinas a gás ainda em construção. [ZTECK Corp, 2008]. A empresa SOFCo através de sua parceira Ceramatec and McDermott Technology tem desenvolvido pilhas a combustível de oxido sólido desde 1986. O interesse principal é a integração de vários stacks para uma planta de multi-geração de energia elétrica. Um dos projetos originais produzia 2 kW de energia alimentado diretamente com gás natural. Futuros projetos incluiriam sistemas que produzam entre 10 a 50 kW. [SOFC Corp, 2008]. Westinghouse Power Generation tem trabalhado com pilhas a combustível de oxido sólido por período de 30 anos com distintas unidades pré-comerciais. A Westinghouse (adquirida pela Siemens desde 1998) é líder no processo de desenvolvimento de unidades estacionarias com tecnologia tubular de pilhas de combustível de oxido sólido; com unidades, de ate 100 kW via cogeração, instaladas na Holanda assim como unidades de 250 kW ate 1 MW ainda em fase de construção. [Westinghouse – Siemens Corp, 2008]. A empresa M-C Power se especializou no desenvolvimento de Pilhas a combustíveis de carbonatos fundidos (MCFC). Tem se conhecimento de uma unidade MC Power instalada e testada em São Diego – Califórnia numa estação militar da marina dos Estados Unidos no ano 1997. A unidade inclui um reformador interno com 210 células que conformam o stack da pilha e uma geração de energia elétrica de 210 kW, a unidade inclui também um sistema de cogeração. Em total a unidade produziu 158 MWh de energia em 2350 horas de operação. [Benjamin et al, 1997]. Outras duas empresas americanas que trabalham com este tipo de pilhas de combustível são E.R.C (Energy Research Corporation) e a International Fuel Cell Corporation, ambas com aplicações na industria militar especialmente. A empresa Ballard Power System Inc é líder no mercado de desenvolvimento, manufatura, venda e serviço de pilhas a combustível em especial as pilhas tipo PEM. Como se sabe estas pilhas são adequadas na industria automobilística, equipamentos portáteis assim como no setor residencial, transporte e cogeração. O escritório principal esta localizado em Burnaby, Canadá. A Pilha a combustível tipo PEM desenvolvida pela Siemens, com tecnologia própria, combina propriedades mecânicas favoráveis, como por exemplo, resistência aos impactos, integração dos processos diminuindo o volume da pilha, elevada eficiência assim como alta densidade de energia. A Siemens tem desenvolvido pilhas tipo PEM com potências de saída entre 30 a 40 kW para aplicações em submarinos militares não-nucleares, especialmente da frota naval da Alemanha e Itália. [Ballard Corp, 2008; Westinghouse - Siemens Corp, 2008].

Outras empresas que trabalham em especial com este tipo de tecnologia são: a IFC (International Fuel Cell) e a Plug Power, empresa também americana criada em Junho de 1997 construindo desde o começo protótipos de pilhas tipo PEM para o setor residencial para o estado de New York, hoje em dia a empresa trabalha em diferentes países e com outras tecnologias de pilhas. Por último a empresa ONSI que era o nome comercial da união das empresas IFC (agora conhecida como UTC Fuel Cell) e a Toshiba. Esta empresa foi formada para produzir plantas de potência de aproximadamente 200 kW utilizando pilhas de combustível tipo PAFC (desenvolvida pela IFC). A Toshiba e a UTC Fuel Cell é agora liderada pela Toshiba International Fuel Cell (51% das ações pertencem a Toshiba e 49% pertencem a UTC Fuel Cell). Na Tabela 3 é apresentado o desenvolvimento de tecnologias que estão levando a cabo as empresas americanas abordadas nos parágrafos anteriores. Na atualidade o mercado de pilhas a combustível é liderado pelos Estados Unidos destacando as empresas Ballard, Plug & Power, International Fuel Cell (IFC) e H. Power como se apresenta a Tabela 4.

Tabela 3. Estado da arte do desenvolvimento das pilhas a combustível. [Adaptado de Alvarez, 2003]

	Pesquisa e desenvolvimento	Demonstração			Entrada no Mercado	No mercado
		Protótipos	Protótipos melhorados	Protótipos comerciais		
PAFC					IFC, ONSI	
PEMFC		BALLARD, SIEMENS, IFC, PLUG POWER				
MCFC		ERC				
		M-C POWER				
SOFC (tubular)		WESTINGHOUSE				
SOFC (planar)		SOFCo				
		ZTEK				

Tabela 4. Principais organizações envolvidas no desenvolvimento de pilhas de combustível. [Alvarez, 2003]

Empresas	Tecnologias de Pilhas de Combustível			
	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC
International Fuel Cell	•	•	•	
Fuel Cell Corporation América	•			
Siemens – Westinghouse				•
Energy Research Corporation			•	
M. C. Power			•	
Energy Partners		•		
Allied Signal (AI Research)		•		•
SOFC (Ceramtec/Babcock & Wilcox)				•
Ztek (Waltham, MA)				•
Analytic Power (Boston, MA)			•	
Ballard Power System (Canadá)			•	
H. Power			•	
Plug Power (MTI - DTE)			•	
EletroChem (Woburn, MA)			•	

## 6. CONCLUSÕES

O hidrogênio é uma nova forma de armazenar energia que poderia mudar a uma grande parte dos sistemas atuais baseados em combustíveis derivados do petróleo, as suas principais características são: elevada eficiência energética e baixos níveis de contaminação; sendo que na sua produção, as fontes de energia renováveis têm especial relevância. Para que esta tecnologia esteja ainda mais perto, deve-se superar um grande número de retos tecnológicos e econômicos assim como o desenvolvimento de regras adequadas para garantir o seu consumo mundial. O lento progresso na comercialização das células de combustível é a principal barreira na introdução na economia do hidrogênio; tudo isto devido ao alto custo e insuficiente disponibilidade. O transporte e distribuição do hidrogênio requerem de importantes investimentos e infra-estrutura de subministro, em outras palavras, a criação de uma rede de postos de abastecimento para o subministro do hidrogênio em parceria com as grandes companhias multinacionais, assim como logística de distribuição (redes de tubulações, frotas de caminhões, barcos, trens, etc.) Deve se dar prioridade ao desenvolvimento de novas tecnologias de células a combustível tipo PEM, conseguindo eficiências iguais o melhores que 0,5 kW/l, as quais requer uma curta vida útil e sistemas menores. A indústria automobilística deve priorizar a diminuição do custo de investimento de células tipo PEM para 65 US\$/kW.

## 7. REFERÊNCIAS

- Alvarez. T.T, “Princípios básicos das Pilhas de Combustível. Análise termoeconômicos de plantas e sistemas de Pilhas de Combustíveis para a geração de energia elétrica”, Tese de Doutorado, Escola Técnica Superior de Engenheiros de Minas. Universidade Politécnica de Madri, Universidade de Zaragoza, 2003.
- Amos. W.A., 1998., Cost of storing and transporting hydrogen, National Renewable Energy Laboratory, Colorado (USA).
- Ballard Corp, 2008, <http://www.ballard.com>, , Consultada em Agosto 2008.
- Benjamin. T.G, Erickson. D.S, Haugh. E.J, Petri. R.J, 1997., Status of the M-C Power MCFC commercialization program, Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97., Proceedings of the 32nd Intersociety, Honolulu, HI, USA (M-C Power). Brandão, M.O. Termodinâmica E Simulação De Sistemas De Células A Combustível, Potencial Gerador Elétrico Para Aplicações Estacionárias e Automotivas. 2003. 30f.
- Programa de Engenharia Mecânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.
- Dupont Fuel Cells – Nafion® Membranes and Dispersions. <<http://www.dupont.com/fuelcells/products/nafion.html>>. Acesso em: setembro de 2008.
- Ifc Corp, 2008, <http://www.ifc.org>, , Consultada em Agosto 2008.
- Neto, E.F.G. Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba: H2 Fuel Cell Energy, 2005. 240p
- Instituto de Carboquímica. <http://www.icb.csic.es/>, Consultada em Agosto 2008
- Singh. P, Stevenson. J, SECA core technology program overview, Fourth Annual DOE SECA Meeting, Seattle, WA, April 2003. SOFC CORP, 2008, <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/99/99fuelcell/fc6-4.pdf> , Consultada em Agosto 2008.
- Torres, F.S. Análise Técnica e Econômica de Células de Combustível Aplicadas a Veículos Automotores. 2002. 82f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.
- Vora. S.D, SOFC at Siemens–Westinghouse, Fourth Annual DOE SECA Meeting, Seattle, WA, April 2003.
- Westinghouse –Siemens, 2008, <http://www.fuelcelltoday.com/online/industrydirectory/organisations/si/Siemens-Westinghouse> , Consultada em Agosto 2008.
- Zabalza. I.B, Valero. A.C, Scarpellini. S., “Hidrógeno y Pilhas de Combustível, Estado de La técnica y posibilidades en Aragón”. Fundación para el desarrollo de las nuevas tecnologías del Hidrógeno en Aragón. ISBN: 84-609-4322-4. Zaragoza – España, 2005.
- Zegers. P., 2006., Fuel cell commercialization: The key to a hydrogen economy., Journal of power Sources v154, pp 497 – 502.
- Zteck Corp, 2008, <http://www.zteckcorp.com/> , Consultada em Agosto 2008.