



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Aluno: Leandro Lopes de Azevedo Freire**

**Matrícula: 21021283**

**Professor Orientador: Leimar de Oliveira**

**Campina Grande, Paraíba**  
**Abril de 2012**

**LEANDRO LOPES DE AZEVEDO FREIRE**

**CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para se obter o grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Campina Grande, Paraíba  
Abril de 2012**

**LEANDRO LOPES DE AZEVEDO FREIRE**

**CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA**

Data de Aprovação: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Leimar de Oliveira  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Professor Orientador**

---

Professor Convidado  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Avaliador**

**Campina Grande, Paraíba**

**Abril de 2012**

## **Dedicatória**

À minha mãe, *Ana Maria Lopes de Azevedo Freire* e  
Ao meu pai, *João de Azevedo Freire*.

## **AGRADECIMENTOS**

À toda minha família, e especialmente aos meus pais, pelo incentivo e compreensão durante o período do desenvolvimento deste trabalho;

Ao meu orientador, Professor Leimar de Oliveira, pela orientação e entusiasmo;

A minha namorada e amiga Raisa Melo pelo companheirismo e paciência, e aos amigos, Éder Alelaf, Breno Dantas e Manoel Ramos, entre outros, que contribuíram para minha jornada e que estiveram ao meu lado durante o curso.

## **Resumo**

Este trabalho apresenta os principais tipos de células a combustível, suas vantagens e desvantagens, aplicabilidade, princípios de funcionamento, bem como a comparação com outras fontes de geração de energia. Sendo abordado o seu desenvolvimento no Brasil e ainda os desafios tecnológicos para sua aplicabilidade no nosso país. Finalizando, será apresentado o hidrogênio vetor energético, mostrando sua forma de produção, armazenamento e distribuição, além de sua segurança como combustível.

**Palavra chaves:** Células a combustível, Hidrogênio, Energia limpa

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. INTRODUÇÃO SOBRE AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL .....	14
2.1 O que é uma célula combustível? .....	14
2.2 Histórico da Célula Combustível.....	14
2.3 Tipos de Células Combustível.....	16
2.3.1 AFC – Célula a combustível Alcalina .....	16
2.3.2 PEMFC - Célula a Membrana Polimérica.....	18
2.3.3 PAFC – Célula a combustível de ácido fosfórico.....	20
2.3.4 MCFC – Células a Combustível de Carbono Fundido .....	22
2.3.5 SOFC – Célula a Combustível de óxido sólido .....	24
2.3.6 DMFC – Célula a combustível de metanol direto .....	27
2.4 Comparativo entre as células a combustível.....	28
2.5 Vantagens/Desvantagem da célula a combustível.....	30
2.5.1 Vantagens .....	30
2.5.2 Desvantagens .....	31
2.6 Aplicabilidade.....	31
2.6.1 Sistemas de distribuição de energia.....	32
2.6.2 Automobilística .....	33
2.6.3 Unidades Portáteis .....	34
2.6.4 Programas Espaciais .....	35
2.7 Comparações das células a combustível com demais tecnologias .....	35
3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL .....	37
3.1 Operação Básica .....	37
3.2 Estrutura física de uma célula a combustível .....	38
3.3 Formas de aumentar a velocidade de reação em uma célula a combustível.....	40
3.3.1 Uso de Catalisador.....	40
3.3.2 Aumento da temperatura .....	41
3.3.3 Aumento da área do eletrodo.....	42
3.3.4 Aumento da pressão do combustível.....	43

3.3.5 Aumento da concentração dos reagentes.....	43
3.4 Energia de uma célula a combustível a hidrogênio .....	43
3.5 Potencial elétrico teórico de uma célula a combustível.....	45
3.5.1 Efeito da temperatura e pressão sobre o potencial elétrico teórico .....	46
3.6 Perdas de tensão .....	47
3.6.1 Perdas por polarização de ativação.....	48
3.6.2 Perdas ôhmicas .....	48
3.6.3 Polarização por Concentração .....	49
3.6.4 Perdas por correntes internas.....	49
3.6.5 Efeito da temperatura na perda de tensão.....	50
3.7 Eficiência das células a combustível .....	51
3.7.1 Eficiência das células a combustível VS Ciclo de Carnot.....	54
4. AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NO BRASIL.....	56
5. HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL.....	60
5.1 Produção do hidrogênio.....	61
5.1.1 Reforma a vapor ou reforma catalítica .....	61
5.1.2 Eletrólise da água.....	62
5.2 Armazenamento do hidrogênio .....	63
5.2.1 Armazenamento do hidrogênio sob a forma de gás comprimido.....	64
5.2.2 Armazenamento sob a forma líquida.....	66
5.2.3 Armazenamento em hidretos metálicos.....	66
5.3 Distribuição do hidrogênio .....	67
5.4 Segurança do hidrogênio .....	68
CONCLUSÕES.....	71
BIBLIOGRAFIA .....	72



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado de uma célula combustível.....	14
Figura 2 - Diagrama esquemático de uma célula a combustível AFC .....	17
Figura 3 - Diagrama esquemático de célula combustível PEMFC.....	19
Figura 4 - Esquema de uma célula PAFC de 200kW .....	21
Figura 5 - Esquema de uma célula MCFC .....	23
Figura 6 - Célula a combustível tipo SOFC .....	25
Figura 7 - Esquema de uma célula a combustível tipo SOFC .....	26
Figura 8 - Esquema de uma célula DMFC .....	27
Figura 9 - Diferentes tipos de células a combustível.....	29
Figura 10 – Aplicações de diversas fontes de células a combustível .....	29
Figura 11 - Aplicação de uma célula combustível como suporte de energia .....	32
Figura 13 - Notebook IBM à célula combustível .....	34
Figura 12 - Carro NECAR 5.....	34
Figura 14 - Célula combustível usada na missão Appolo .....	35
Figura 15 - Eficiência estimada dos sistemas de geração.....	37
Figura 16 - Esquema de uma célula a combustível hidrogênio/oxigênio.....	38
Figura 17 – Componentes físicos de uma célula unitária.....	39
Figura 18 - Curva de energia .....	40
Figura 19 - Esquema do funcionamento de um catalisador numa célula a combustível	41
Figura 20 - Curva de energia .....	42
Figura 21 – Causas da perda de tensão.....	47
Figura 22 - Tensão de uma célula a combustível a baixa temperatura.....	50
Figura 23 - Tensão de uma célula a combustível a alta temperatura.....	51
Figura 24 - Rendimento de um sistema qualquer .....	52
Figura 25 - Eficiência de um sistema a célula a combustível.....	52
Figura 26 - Eficiência de uma célula a combustível.....	54
Figura 27 – Comparativo da transformação de energia entre as células galvânicas e termoelétricas.....	55

Figura 28- Eficiência máxima de uma célula a combustível comparada com ciclo de Carnot. ....	55
Figura 29- Célula a Combustível de 5 kW para aplicação residencial desenvolvida pela Electrocell.....	56
Figura 30- Ônibus nacional movido a hidrogênio .....	58
Figura 31 - Estágios de desenvolvimento tecnológico de células a combustível no Brasil e no mundo .....	58
Figura 32- Hidrogênio pressurizado em cilindros .....	65
Figura 33 - Compressão adiabática do hidrogênio, hélio e metano .....	65
Figura 34- Acidente do Hindenburg.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de uma célula a combustível alcalina (AFC).....	17
Tabela 2 - Característica de operação de uma célula PEMFC .....	19
Tabela 3 - Características de uma célula a ácido fosfórico (PAFC).....	21
Tabela 4 - Características de uma célula de a combustível MCFC .....	23
Tabela 5 - Características de uma célula de óxido sólido.....	25
Tabela 6 - Características de uma célula de metanol direto .....	28
Tabela 7 - Comparação entre células a combustível .....	30
Tabela 8 - Custos de diferentes tipos de energia .....	36
Tabela 9 - Comparação entre os tipos de geradores existentes no mercado.....	36
Tabela 10 - Energia de formação de Gibbs da água .....	45
Tabela 11 - Número de patentes de células a combustível entre 2002 – 2010.....	59
Tabela 12 - Densidade de energia (massa e volume) de vários combustíveis.....	64
Tabela 13- Propriedades relevantes sobre a segurança do hidrogênio e dois outros gases combustíveis .....	69

# 1. INTRODUÇÃO

Energia é a força vital da atual sociedade e da economia, posto que o trabalho, o lazer, e o bem-estar econômico, social e físico dependem do seu abastecimento eficiente e ininterrupto. Tradicionais fontes de energia fósseis, como petróleo, são limitadas, podendo ocasionar uma defasagem entre a oferta e a demanda. Diante disto, tem-se a constante busca das fontes de energias alternativas que não sejam suscetíveis a volatilidade de preços e que evitem impactos ambientais. Essas condições levam à busca desenfreada de novas tecnologias para a geração de energia, que faça uso mais eficiente dos recursos naturais, utilizando recursos renováveis.

As células a combustível destacam-se dentre as diferentes tecnologias para a geração de energia de forma sustentável. Fornece um tipo de energia, que diferentemente do que indica o nome, não envolve combustão. É um dispositivo eletroquímico que combina o hidrogênio e o oxigênio para produzir eletricidade e água. Apresenta uma infinidade de aplicações, entre elas, consta a geração descentralizada para uso residencial, comercial, industrial. Nos meios de transporte, a célula combustível pode ser empregada para geração de energia em substituição ao motor de combustão interna. O interesse por essa tecnologia despertou o interesse nacional, que criou em julho de 2002 ProCaC (*Programa Brasileiro de Célula a Combustível*), afim de desenvolver essa tecnologia, apresentando resultados práticos.

O hidrogênio sendo o elemento mais abundante no universo é referido pela mídia e até por algumas literaturas científicas como a alternativa a “era do petróleo”. O entusiasmo por esse gás é tanto, que foi proferido o termo a “economia do hidrogênio” que se refere a um sistema de energia para armazenamento, distribuição e utilização de energia desse gás.

Portanto, o objetivo desse trabalho é estudar o estado da arte das células a combustível juntamente com suas reações químicas envolvidas, bem como o uso do hidrogênio como vetor energético, comparando essas, com demais fontes de energia e sua viabilidade econômica. A dissertação está dividida nos seguintes capítulos.

**Capítulo 2:** Este capítulo aborda os vários tipos de células a combustível, com a finalidade de explicar as diferenças entre as mesmas e outras fontes de conversão de energia. Sendo abordado, ainda, sua vasta aplicabilidade e seus custos.

**Capítulo 3:** Este capítulo tem por objetivo estudar o estado da arte das células a combustível, abordando seu aspecto construtivo, as reações químicas envolvidas e perdas no processo.

**Capítulo 4:** Este capítulo tem como finalidade, apresentar o desenvolvimento das células a combustível no Brasil, mostrando exemplos de aplicabilidade e seus desafios em território nacional

**Capítulo 5:** Como as células a combustível utilizam o hidrogênio como vetor energético, então este capítulo mostra as formas de produção/distribuição e armazenamento desse gás, além de sua segurança.

## 2. INTRODUÇÃO SOBRE AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

### 2.1 O que é uma célula combustível?

Células a combustível são sistemas eletroquímicos capazes de converter a energia química, de uma grande variedade de combustíveis, diretamente em energia elétrica, sem as limitações de eficiência impostas pelo ciclo de Carnot inerente às máquinas térmicas (VILLULAS, et al., 2002).

Embora seu funcionamento seja similar ao de uma bateria, a energia não fica armazenada nos componentes existentes, mas suprida enquanto for mantido o fluxo de combustível (hidrogênio) e oxidante ( $O_2$ ). Os principais componentes da célula são: dois eletrodos porosos e o eletrólito. O produto de sua reação em geral é água, calor e energia elétrica, conforme mostrado figura abaixo.

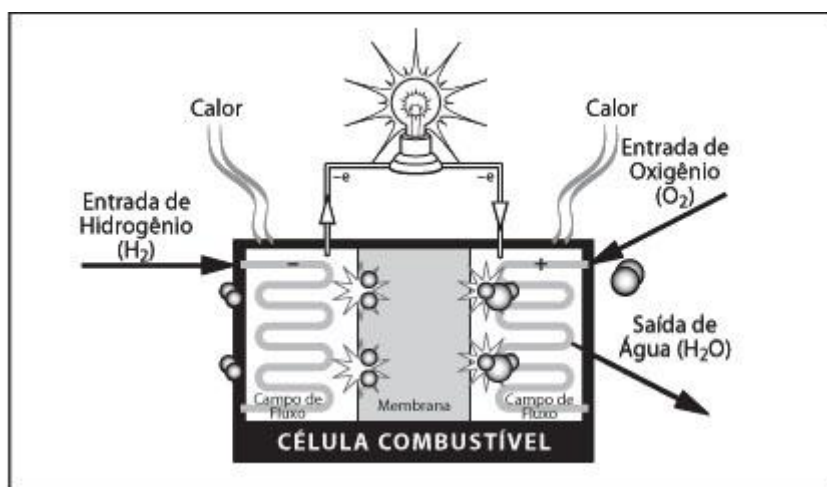


Figura 1 - Esquema simplificado de uma célula combustível

Fonte: Site - <http://www.bluu.com.br/noticias/celulas-de-combustivel-pode-substituir-o-petroleo>

### 2.2 Histórico da Célula Combustível

A tecnologia de produção do hidrogênio vem progredindo desde a descoberta da decomposição da água pela passagem de corrente elétrica por William Nicolson e Anthony Carlisle em 1800, efetuando assim a eletrólise da água.

A primeira célula de combustível foi desenvolvida em 1839 pelo inglês chamado William Robert Grove, utilizando os conhecimentos descritos pelos cientistas citados anteriormente.

A partir de experimentos de caráter simples, Grove descobriu que a eletrólise da água em ácido sulfúrico diluído era reversível. (THOMAS, et al., 1999). Na verdade Grove realizou o experimento inverso: obtenção de energia elétrica a partir do hidrogênio e do oxigênio, utilizando um conjunto de eletrodos de platina imerso em ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e um conjunto de eletrodos de zinco imerso em sulfato de zinco ( $\text{ZnSO}_4$ ), gerando cerca de 12 ampéres e 1,8 volts. (SERPA, 2004).

Em 1889 o químico Ludwing Mond e seu assistente Carl Langer descreveram seu experimento com uma célula a combustível usando hidrogênio e oxigênio de 6 ampéres por “pés quadrados” e 0,73 volts. Mond e Langer observaram dificuldades em empregar eletrólitos líquidos, passando a adotar um eletrólito de aparência quase sólida, absorvido por um material poroso e não condutor. Além disso, fizeram uso de eletrodos de platina fina e perfurada (SERPA, 2004).

Já o cientista e fundador do campo da físico-química, Friedrich Wilhelm Ostwald, contribuiu com muitas das teorias sobre as células a combustível. Em 1893, ele determinou experimentalmente as funções dos vários componentes de uma célula a combustível: eletrodos, eletrólito, agentes de oxidação e redução, ânions e cátions.

No final dos anos 30, Francis Thomas Bacon começou pesquisando células a combustível (CaC) de eletrólito alcalino (AFC - Alkaline Fuel Cell) de alta pressão, que parecia oferecer resultados viáveis. Em 1939, ele construiu uma célula que usava eletrodos de níquel e operava numa pressão de até 220 atm numa temperatura de 100 °C. Durante a Segunda Guerra Mundial, Bacon trabalhou no desenvolvimento de células que poderiam ser usadas nos submarinos da marinha inglesa, e em 1958 demonstrou uma CaC alcalina usando um dispositivo com eletrodo de 10 polegadas (25,4 cm) de diâmetro (NETO, 2005).

Embora fossem extremamente caras, as células a combustível de Francis Bacon provaram ser suficientemente confiáveis para atrair a atenção da Pratt & Whitney. Esta

empresa se uniu com a Energy Conversion, que tinha Francis Bacon como consultor e licenciou o trabalho dele para ser utilizado no desenvolvimento de um sistema de geração de energia para as missões espaciais Gemini e Apollo da Nasa. Este sistema era constituído por três unidades de pilhas a combustível alcalinas e operavam a pressões de 3,5 atm. Na seqüência do desenvolvimento tecnológico, a temperatura das células foi aumentada para 200 °C, e produziam potência de 1,4 kW cada. A tensão desenvolvida variava entre 27 e 31 volts, com uma vida útil limitada em 400 horas de operação, devido principalmente à corrosão do cátodo (eletrodo). Após as missões Apollo, a construção de novas células a combustível alcalinas operando com altas pressões, foi paralisada e tornou claro, levando em conta esse tipo de células, que sua comercialização tinha como principais obstáculos o alto custo e a pequena vida útil (NETO, 2005).

## 2.3 Tipos de Células Combustível

A classificação das células a combustível é feita, de forma geral, em função do eletrólito que utilizam, mas elas também podem ser classificadas segundo a temperatura de operação.

### 2.3.1 AFC – Célula a combustível Alcalina

As células a combustível alcalina AFC (*Alkaline Fuel Cell*), têm importância histórica por ter sido a primeira desenvolvida no mundo (LINARDI, 2010), além de ter sido utilizada na missão espacial *Apollo*. As células combustíveis aplicadas nas missões espaciais foram baseadas, em grande parte pelo trabalho de F.T Bacon na década 1930, sendo que em 1952 ocorreu sua construção e teste de 5-kW da célula a combustível alcalina, operando a H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>. A célula combustível desenvolvida por Bacon operava na faixa de 200 à 240 °C, mas atualmente sua temperatura de operação está ao redor de 70°C (VILLULAS, et al., 2002).

O princípio de funcionamento dessas células consiste na utilização de um eletrólito alcalino, KOH (hidróxido de potássio), em solução aquosa, com concentrações em torno de 30 a 50%, além de utilizarem somente hidrogênio e oxigênio de elevada



pureza, afim de evitar a contaminação do eletrólito por carbonatos que causam danos irreversíveis ao sistema.

Sua reação eletroquímica, tabela 1, e seu diagrama esquemático, figura 2, respectivamente abaixo.

Temperatura de operação	60 a 250 °C
Eficiência	50% a 60%
Eletrólito utilizado	Hidróxido de Potássio (KOH) com 30 – 50% de concentração em peso
Reação anódica	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$
Reação catódica	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$

Tabela 1 - Características de uma célula a combustível alcalina (AFC)  
 Fonte: (LEAL, 2011)

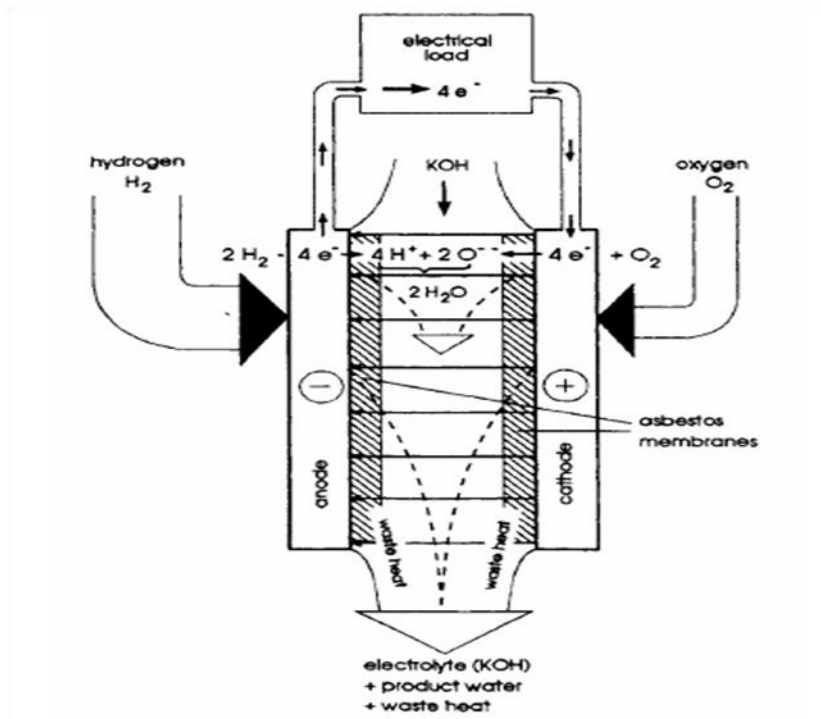


Figura 2 - Diagrama esquemático de uma célula a combustível AFC  
 Fonte: (EG&G Tecnical Services, 2004)

Além de utilizar um eletrólito alcalino essa célula se caracteriza por pertencer à classe de célula a combustível de baixa temperatura de operação, na faixa de

temperaturas de, aproximadamente, 60 a 90<sup>0</sup>C e utilização de eletrodos de difusão gasosa com platina.

Suas vantagens são:

- Elevada eficiência elétrica;
- Alta performance em baixa temperatura;
- Pode ser confeccionada com materiais de baixo custo (ALDALBÓ, 2004);
- Excelente confiabilidade.

Suas desvantagens são:

- Sensibilidade ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>);
- Utilização de combustíveis puros: hidrogênio puro e oxigênio desprovido de dióxido de carbono;
- Remoção constante de água no eletrólito;
- Devido ao seu alto custo, sua viabilidade só é aceitável em missões espaciais e militares.

### 2.3.2 PEMFC - Célula a Membrana Polimérica

A célula do tipo PEMFC (*Próton Exchange Membrane Fuel Cell*) foi originalmente concebida por William T. Grubb, em 1959 (EG&G Technical Services, 2004) e seu sucesso adveio da membrana polimérica o Nafion<sup>TM</sup>, mais resistente quimicamente. A tensão de uma única célula se dar em torno de 1,16V (GOTTESFELD, et al.).

Seu princípio de funcionamento consiste na utilização de uma membrana de polímero sólido, figura 3, e seus eletrodos são construídos em grafite para proporcionar a condução da corrente elétrica (BURANI, et al., 2003). Devido ao fato de sua reação de oxi-redução ocorrer lentamente, dar-se por necessário a introdução de um catalisador, utilizado tanto no ânodo como no cátodo, geralmente a platina.

O uso da água é de vital importância no funcionamento da célula na PEMFC. Embora a água seja produto da reação, e seja levado para fora durante sua operação, é interessante que tanto o hidrogênio e oxigênio (ou ar) que entram na célula sejam umedecidos. Essa água mantém a membrana polimérica hidratada. A umidade dos gases devem ser cuidadosamente controladas. Uma pequena porção de água previne a membrana de conduzir íons  $H^+$  assim como “corrente de fuga”.

Sua reação eletroquímica é apresentada na tabela 2.

Temperatura de operação	60 a 80 °C
Eficiência global	38% a 55 %
Eletrólito utilizado	Membrana sólida de Nafion™
Reação anódica	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$
Reação catódica	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Tabela 2 - Característica de operação de uma célula PEMFC  
Fonte: (LEAL, 2011)

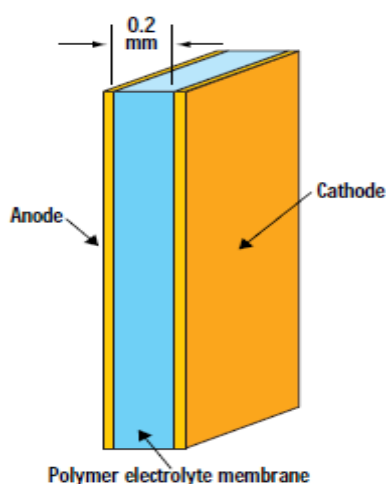


Figura 3 - Diagrama esquemático de célula combustível PEMFC  
Fonte: (THOMAS, et al., 1999)

Além de utilizar uma membrana de polímero essa célula se caracteriza ainda por pertencer à classe de célula a combustível de baixa temperatura de operação, na faixa de temperaturas de, aproximadamente, 60 a 80°C, ser do tipo mais flexível quanto abrangência de aplicações práticas e utilizar um tecido de carbono parcialmente teflonado como camada difusora.

Entre suas vantagens, temos:

- Maiores densidades de potência do que outros tipos de células a combustível (LINARDI, 2010);
- Estrutura compacta (menor relação massa/volume);
- Facilidade de fabricação, atualmente é o sistema mais utilizado na propulsão de veículos e nos sistemas de energia estacionária de pequena escala;
- Capacidade de seguir as variações de carga;
- Eletrólito imóvel (membrana) simplifica a selagem no processo de produção, reduz a corrosão e possui maior vida útil (ALDALBÓ, 2004).

Entre suas desvantagens, temos:

- Elevado custo da membrana de polímero sólido e da platina;
- Sensibilidade ao monóxido de carbono (CO);
- Gerenciamento de água da membrana, para assegurar a condutividade iônica;
- Não pode ser usado na co-geração devido ao baixo calor liberado.

### 2.3.3 PAFC – Célula a combustível de ácido fosfórico

As células a ácido fosfórico, PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), teve seu desenvolvimento no final dos anos 60, pela firma UTA (United Technology Corporation), em vista que esta não apresentava instabilidade da primeira célula a membrana polimérica (PEMFC), e não são muito custosas como as células alcalinas (AFC) utilizadas para o programa espacial norte-americano.

Essa célula foi a primeira célula a combustível a ser comercializada. O número de unidades construídas excede qualquer outra tecnologia a célula a combustível, com mais de 85 MW que foram e vem sendo testados no mundo. A maioria dessas unidades operam na faixa de 50 – 100 kW de potência, figura 4, mas grandes usinas de 1 MW a 5 MW vem sendo construídas (EG&G Technical Services, 2004).

Seu princípio de funcionamento consiste na utilização de ácido fosfórico concentrado em 100% como eletrólito. Segundo Linardi “os eletrólitos ácidos são preferidos devido a não sensibilidade a  $CO_2$ , além de que a estabilidade relativa do ácido fosfórico é alta comparada com outros ácidos comuns, conseqüentemente, a PAFC é capaz de operar em temperaturas elevadas, em torno de  $200^{\circ}C$ ” (LINARDI, 2010). Pode ser com utilizado com uma variedade de combustíveis de hidrocarbonetos leves que devem ser reformados em  $H_2$  puro. Sua temperatura de operação favorece para que aumente sua eficiência e baixe a complexidade na conversão do combustível.

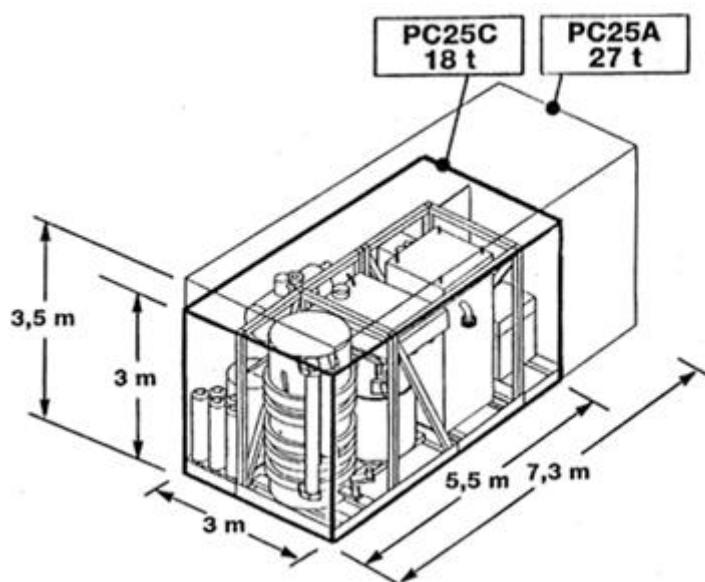


Figura 4 - Esquema de uma célula PAFC de 200kW  
 Fonte: <http://www.scielo.br/scielo>

As reações eletroquímicas, apresentada na tabela 3.

Temperatura de operação	160 a 220 °C
Eficiência	43% a 55%
Eletrólito utilizado	Ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) a 100%
Reação anódica	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
Reação catódica	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Reação final	$\frac{1}{2}O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$

Tabela 3 - Características de uma célula a ácido fosfórico (PAFC)  
 Fonte: (LEAL, 2011)

Além de utilizar ácido fosfórico como eletrólito essa célula se caracteriza ainda por pertencer à classe de células a combustível de baixa/média temperatura de operação, dependendo da literatura a ser referida, na faixa de temperaturas de, aproximadamente, 200<sup>0</sup>C.

Entre suas vantagens, citadas por (LINARDI, 2010), temos:

- Maior tolerância ao CO (até 1%), devido à temperatura de operação (200<sup>0</sup>C);
- Operação relativamente simples, sem interferência humana;
- Disponibilidade no mercado;
- Possibilidade de usar o metano (gás natural) como combustível primário em processos de reforma sem purificação prévia do gás de síntese (PROX), como é obrigatório para PEMFC.

Suas desvantagens segundo (LINARDI, 2010):

- A necessidade de eletrocatalisadores de metais nobres (Pt), mesmo com temperaturas de operação a 200<sup>0</sup>C;
- O fato de ainda ocorrer o envenenamento do eletrocatalisador por CO, embora mais tolerante que a célula do tipo PEMFC;
- Os preços estão estacionados há anos, sem evolução no mercado.

### 2.3.4 MCFC – Células a Combustível de Carbono Fundido

A célula do tipo MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*), figura 5, teve seu desenvolvimento na metade dos anos 60, e caracterizam-se por pela utilização de eletrólitos formados de uma mistura, ou uma solução, de carbonatos fundidos de metais alcalinos, por exemplo, carbonato de lítio (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), carbonato de potássio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) em uma matriz suporte de aluminato de lítio (LiAlO<sub>2</sub>).

Podem possuir potências nominais entre 100 kW até 2 MW, com tendência a unidades de 200 kW a 300 kW com co-geração. As eficiências elétricas encontradas são da ordem de 50% a 60% e, combinadas com co-geração, a eficiência global pode

alcançar a ordem de 85% até valores acima de 90% (LINARDI, 2010). As pesquisas no desenvolvimento da tecnologia MCFC estão orientadas para utilização do gás natural e carvão como combustível, em aplicações industriais, geração de energia elétrica e aplicações militares.

Este tipo de célula pertence à classe de célula a combustível de alta temperatura de operação, pois funciona entre, 630 e 650<sup>0</sup>C o que dispensa o uso de metais nobres como eletrocatalisadores para processos eletroquímicos de redução e oxidação e permite a reforma do combustível (hidrocarboneto ou gás natural). Uma das principais características das células MCFC que as diferenciam das demais é o envolvimento do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) nas reações eletroquímicas (BURANI, et al., 2003).

As reações eletroquímicas envolvidas na reação podem ser vista na tabela 4:

Temperatura de operação	600 a 700 °C
Eficiência	47% a 53%
Eletrólito utilizado	Carbonato fundido (misturas Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> e K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ou Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
Reação anódica	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$
Reação catódica	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
Reação final	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Tabela 4 - Características de uma célula de a combustível MCFC

Fonte: (LEAL, 2011)

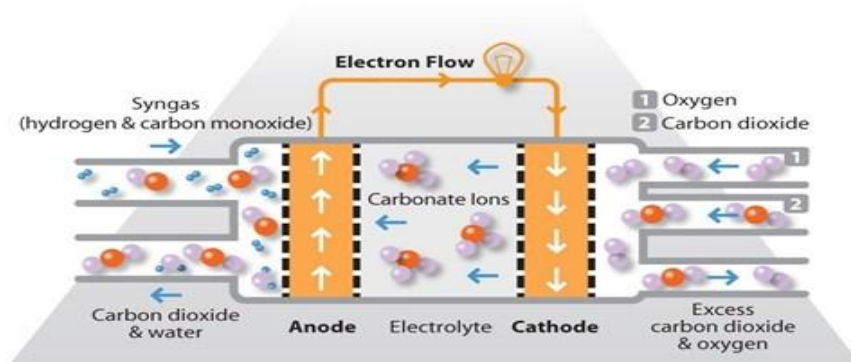


Figura 5 - Esquema de uma célula MCFC

Fonte: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/technologies/mcfc>

As vantagens desse tipo de células são:

- Cinética das reações é bastante favorecida pela alta temperatura de operação;
- Insensibilidade a CO e CO<sub>2</sub> (LINARDI, 2010);
- O calor dissipado é de alta temperatura, podendo ser utilizado para cogeração;
- Eficiência teórica máxima elevada (LINARDI, 2010);
- Possibilita a reforma interna de combustível primário, pelo menos parcialmente (LINARDI, 2010);
- Dispensa o uso de metais nobres como catalisadores, podendo utilizar catalisador de níquel a baixo custo.

As desvantagens:

- Necessidade de manejo do CO<sub>2</sub>. Separação e recirculação de CO<sub>2</sub> do ânodo para o cátodo, elevando custos e complicando o sistema global (LINARDI, 2010);
- Problemas de materiais devido a alta temperatura de operação tipo corrosão, envelhecimento (*ageing*), expansão térmica, entre outros.
- O eletrólito é muito corrosivo e móvel (ALDALBÓ, 2004);
- A temperatura de operação diminui a vida útil do material componente;
- Solubilidade de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> no eletrólito (LINARDI, 2010);

### 2.3.5 SOFC – Célula a Combustível de óxido sólido

As célula do tipo SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*), figura 6, inicialmente foram desenvolvidas pela empresa Siemens e possuem a peculiaridade de apresentar apenas componentes sólidos, daí o seu nome. Apresentam um eletrólito sólido de metal óxido não-poroso, geralmente Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (íttria) estabilizada com ZrO<sub>2</sub> (zircônio) (EG&G Technical Services, 2004)





Figura 6 - Célula a combustível tipo SOFC

Fonte: [http://www.nfrcr.uci.edu/2/FUEL\\_CELL\\_INFORMATION/FCexplained/FC\\_Types.aspx](http://www.nfrcr.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_Types.aspx)

Este tipo de célula assim como a MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*), é caracterizado por ser uma célula de alta temperatura, entre 800<sup>0</sup>C e 1000<sup>0</sup>C, facilidade de gerenciamento do eletrólito e a não necessidade do uso de metais nobres como catalisadores. Podem operar com qualquer tipo de combustível primário devido à sua alta temperatura de operação. Dentre as configurações dos eletrodos mais comuns se encontram – planar quadrada, planar circular, tubular e monocâmara.

Um sistema híbrido desse tipo tem eficiência elétrica de 58% em capacidade de 250kW, chegando a 60% em capacidade de 1MW com pequenas turbinas. Na faixa de capacidade de 2 a 3 MW, e utilizando grandes turbinas, a eficiência chega a ser de 70% (ALDALBÓ, 2004).

As reações eletroquímicas e o esquema da célula envolvidas na reação são apresentados na tabela 5 e na figura 7 respectivamente.

Temperatura de operação	600 a 1.000 °C
Eficiência global	65% a 80%
Eletrólito utilizado	Ítria (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) estabilizada
Reação anódica	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$
Reação catódica	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Reação final	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Tabela 5 - Características de uma célula de óxido sólido

Fonte: (LEAL, 2011)

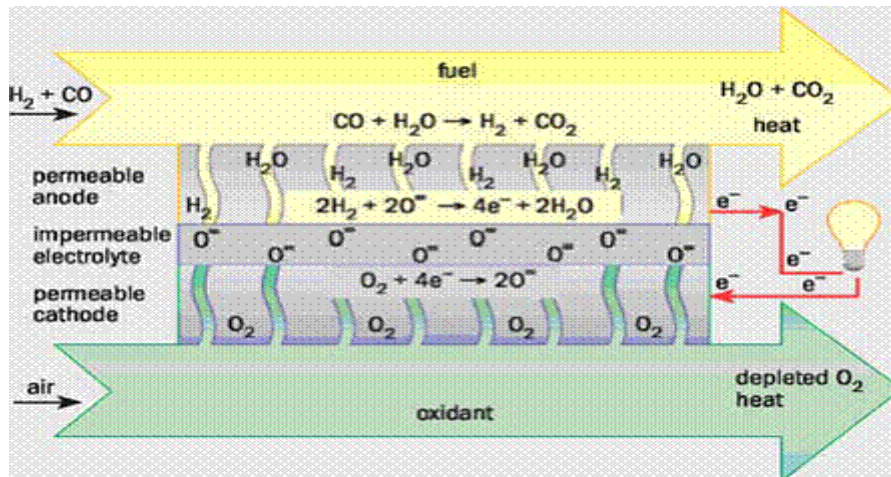


Figura 7 - Esquema de uma célula a combustível tipo SOFC  
 Fonte: <http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-f02-sofc.htm>

As vantagens desse tipo de célula são:

- Cinética das reações é bastante favorecida pela alta temperatura de operação;
- Existência de, somente, componentes sólidos;
- Flexibilidade no uso de combustíveis. Isto significa que pode usar combustíveis hidrocarbonetos comuns, tais como gás natural, diesel, gasolina, álcool e gás de carvão;
- Insensibilidade a CO e CO<sub>2</sub>;
- Possibilidade de reforma interna (parcial) de combustíveis primários;
- Eficiência teórica máxima elevada;
- Dispensa de metais nobres como catalisadores;
- Maior capacidade para co-geração (eletricidade/calor).

Entre as desvantagens: (LINARDI, 2010)

- Problemas de materiais tipo compatibilidade, corrosão, envelhecimento (*ageing*), microestrutura, expansão térmica;
- Necessidade de condutividade mista nos eletrodos: o ânodo deve conduzir tanto o elétron para o circuito externo como o íon O<sup>2-</sup> proveniente do eletrólito, já que todos os componentes são sólidos;
- Volatilidade do Cr do interconector contamina o eletrólito (YSZ);

- Processos de fabricação de membranas eletrolíticas (MEAs) complicados e caros. Com exceção, talvez, de SOFC de configuração tubular ou similares;
- Alta resistividade do eletrólito.

### 2.3.6 DMFC – Célula a combustível de metanol direto

A célula DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*), figura 8, surgiu na década de 90, possui a mesma construção de uma PEMFC, mas o combustível que vai sofrer a oxidação anódica direta é o metanol.

Pertence à classe de células a combustível de baixa temperatura de operação, entre 60 e 90<sup>0</sup>C. Em alguns casos foi constatado que uma DMFC utilizando oxigênio puro como oxidante apresentou uma densidade de corrente de 7.000 A/m<sup>2</sup> em 0,5 V, cerca de 30% inferior à uma célula PEMFC equivalente utilizando Metanol reformado e ar como oxidante (BURANI, et al., 2003).

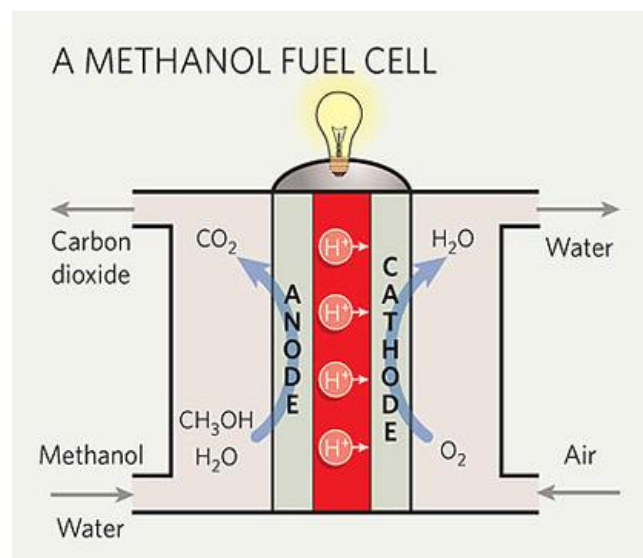


Figura 8 - Esquema de uma célula DMFC

Fonte: <http://www.machine-history.com/Direct%20Methanol%20Fuel%20Cell>

A aplicação mais apropriada para este tipo de célula é a portátil, pois produz baixas densidades de corrente, em relação à PEMFC, devido ao envenenamento da Pt, ou recobrimento de sua superfície, por CO, bloqueando sítios ativos para posteriores oxidações.

As reações eletroquímicas envolvidas na reação podem ser vista na tabela 6.

Temperatura de operação	60 a 90 <sup>0</sup> C
Eficiência	40% a 50%
Eletrólito utilizado	Polimérico ou um líquido alcalino
Reação anódica	$\text{CH}_3\text{OH} + 6\text{OH}^- \rightarrow \text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} + 6\text{e}^-$
Reação catódica	$2\text{OH}^- + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
Reação final	$\text{CH}_3\text{OH} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Tabela 6 - Características de uma célula de metanol direto  
 Fonte: Baseado em dados de (LINARDI, 2010)

#### Vantagens

- Possibilidade de utilização de um combustível na forma líquida, facilitando seu gerenciamento no sistema (LINARDI, 2010);
- Baixo custo de fabricação;
- Seu reabastecimento é simples.

#### Desvantagens:

- Envenenamento do eletrocatalisador por CO, como sua toxicidade;
- 90% do metanol é obtido de fontes fósseis, portanto não renováveis;
- Baixo rendimento.

### 2.4 Comparativo entre as células a combustível

Na figura 9, é mostrado os diversos tipos de células a combustível, podendo verificar suas faixas de temperatura, tipo de eletrólito, vantagens/desvantagens e aplicações. Entre essas células, a do tipo AFC (*Alkaline Fuel Cell*) têm um papel importante somente em viagens espaciais, não apresentando aplicação terrestre, devido ao fato de utilizarem somente hidrogênio e oxigênio ultra puros. Entretanto, este tipo de células foi o precursor das células mais modernas.

Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de Temp. (°C)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Alcalina (AFC)	KOH (OH <sup>-</sup> )	60 - 90	- Alta eficiência (83% teórica)	- Sensível a CO <sub>2</sub> - Gases ultra puros, sem reforma do combustível	- Espaçonaves - Aplicações militares
Membrana (PEMFC)	Polímero: Nafion® (H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> )	80 - 90	- Altas densidade de - Operação flexível	- Custo da membrana potência e eficiência - Contaminação do catalisador com CO	- Veículos automotores e catalisador - Espaçonaves - Mobilidade
Ácido fosfórico (PAFC)	H <sub>3</sub> PO <sub>3</sub> (H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> )	160 - 200	- Maior desenvolvimento tecnológico	- Controle da porosidade do eletrodo - Sensibilidade a CO - Eficiência limitada pela corrosão	- Unidades estacionárias - Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) - Cogeração eletricidade/calor
Carbonatos fundidos (MCFC)	Carbonatos Fundidos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	650 - 700	- Tolerância a CO/CO <sub>2</sub> - Eletrodos à base de Ni	- Problemas de materiais - Necessidade da reciclagem de CO <sub>2</sub> - Interface trifásica de difícil controle	- Unidades estacionárias de algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor
Cerâmicas (SOFC)	ZrO <sub>2</sub> (O <sup>2-</sup> )	800 - 900	- Alta eficiência (cinética favorável) - A reforma do combustível pode ser feita na célula	- Problemas de materiais - Expansão térmica - Necessidade de pré-reforma	- Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor

Figura 9 - Diferentes tipos de células a combustível  
Fonte: (WENDT, et al., 2000)

Na figura 10, é mostrado os diferentes tipos de aplicação das células a combustível assim como sua abrangência de potência. Entre os vários tipos de células a combustível, avalia-se que a do tipo PEMFC têm uma maior aplicabilidade.

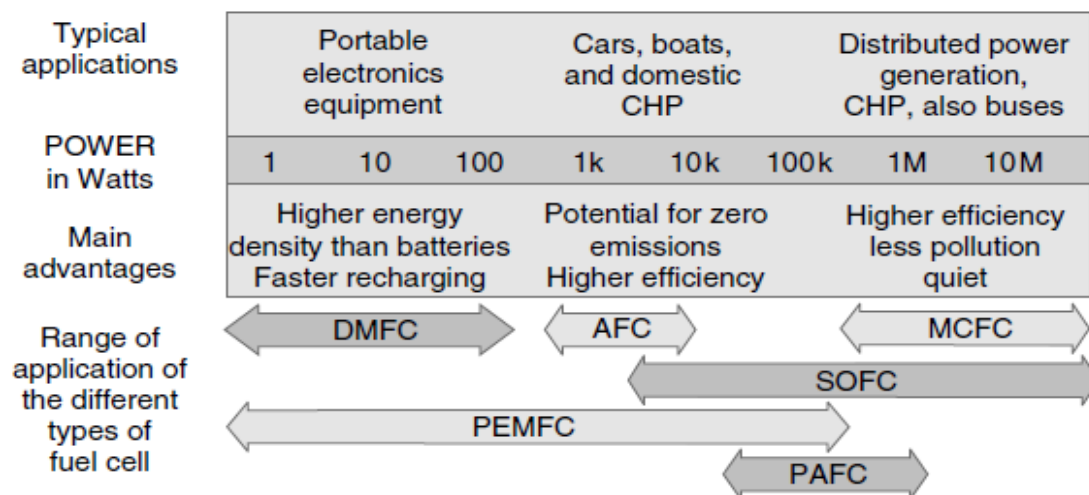


Figura 10 – Aplicações de diversas fontes de células a combustível  
Fonte: (LARMINIE, et al., 2003)

Na tabela 7, será mostrado a eficiência de cada célula a combustível assim como sua densidade de potência, reforma do combustível e o combustível utilizado. Entre a que apresenta maior densidade de potencia se destaca a célula tipo PEMFC.

Célula a Combustível	Eficiência Elétrica	Densidade de Potência	Reforma de Combustível	Combustível
PEMFC	35 – 55%	3,8 – 13,5kW/m <sup>2</sup>	Externo	Hidrogênio
AFC	45 – 65%	0,7 – 8,1kW/m <sup>2</sup>	Externo	Hidrogênio puro
PAFC	40 – 50%	0,8 – 1,9 kW/m <sup>2</sup>	Externo	Gás natural, biogás
SOFC	50 – 65%	1,5 - 5 kW/m <sup>2</sup>	Externo ou interno	Gás Natural, biogás, etanol, etc
MCFC	50 – 65%	0,1 – 1,5 kW/m <sup>2</sup>	Externo ou interno	Gás Natural, biogás, etanol, etc

Tabela 7 - Comparação entre células a combustível  
Fonte: (NETO, 2005)

## 2.5 Vantagens/Desvantagem da célula a combustível

### 2.5.1 Vantagens

As células a combustível vêm demonstrando atualmente, uma fonte de energia flexível para varias aplicações além de abranger diversos benefícios aquém de outras tecnologias convencionais de conversão de energia, entre as quais:

- ✓ *Eficiência:* Células a combustível converte energia química diretamente em energia elétrica sem precisar de combustão. Como resultado, as células a combustível não são governadas pelas leis da termodinâmica. Geralmente a eficiência teórica de uma célula a combustível é maior que a eficiência teórica de um motor a combustão interna. (LARMINIE, et al., 2003)
- ✓ *Simplicidade:* A essência de uma célula combustível é muito simples, pois não tem partes moveis.
- ✓ *Baixa emissão de poluentes:* O produto da reação principal, quando o hidrogênio for o combustível, será: água, eletricidade e calor. Essa pode ser a vantagem principal quando usado em veículos, visto a necessidade de suavizar a emissão de poluentes nas cidades. Entretanto, para se obter o hidrogênio de outros combustíveis nocivos ao meio ambiente, quase sempre tem emissão de CO<sub>2</sub>, mas

em menor escala. Dessa forma Marques avalia que “*mesmo quando o hidrogênio é obtido a partir de fontes fósseis como o petróleo e o gás natural, a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) cai de 25 a 50%, e a fumaça produzida quando comparada com equipamentos tradicionais como os geradores a diesel, diminui em 99%*” (MARQUES, et al., 2007).

- ✓ *Silenciosas*: Como não têm partes móveis as células a combustível são excelentes para redução de poluição sonora. Ideal para utilização em hospitais, equipamentos portáteis e aplicações militares.
- ✓ *Co-geração*: A utilização do calor proveniente da produção de energia pode aumentar sua eficiência de geração de energia.
- ✓ *Instalação modular*: A natureza modular das células a combustível significa que elas podem ser empregadas virtualmente em qualquer aplicação, o que permite uma expansão flexível da microcentral e investimento gradativo para acompanhar a evolução da carga.

### 2.5.2 Desvantagens

As desvantagens são as mesmas de uma tecnologia comercial nova, porém com grandes possibilidades de serem contornadas num futuro próximo.

- ✓ *Alto custo*: Comparando com outras tecnologias o elevado custo por unidade de potência, emprego de materiais nobres, e susceptibilidade aos contaminantes presente no combustível torna o custo dessa tecnologia ainda elevado.
- ✓ O combustível mais eficiente, que é o hidrogênio, ainda não se encontra amplamente disponível.

## 2.6 Aplicabilidade



As características, vantagens e desvantagens explicitadas na secção anterior, forma a seleção das células a combustíveis candidatas para responder a uma variedade de aplicações. Entre umas das varias aplicações das células a combustível incluem: sistemas de distribuição de energia, incluindo unidades de co-geração; energia para sistemas de transporte; equipamentos portáteis, tais como celulares e laptops e programas espaciais.

### 2.6.1 Sistemas de distribuição de energia

Uma característica das células a combustível é que sua eficiência pouco se afeta pela sua dimensão. O que quer dizer que pequenas usinas de energia, com alta eficiência podem ser desenvolvidas, evitando os altos custos associado às grandes usinas. Como resultado, usinas estacionarias podem ser projetadas para algumas centenas de kW ou alguns MW. Pequenas plantas (algumas centenas de kW até 1 ou 2 MW) podem ser alocadas para co-geração, isto é, a usina produz eletricidade associada a energia térmica (EG&G Technical Services, 2004).

As células a combustível oferecem muitos beneficios para sistemas de geração de energia, como: tamanho reduzido com aspecto modular, silenciosas, não-poluentes, alta-eficiência e confiabilidade que podem ser acrescida a ciclo-combinado. Dessa maneira, um mercado que dependa de uma fonte confiável de energia, como hospitais, *shopping centers*, bancos e indústrias são uma boa opção para se utilizar essa tecnologia. As células PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cells*) têm sido comercializadas com sucesso.



Figura 11 - Aplicação de uma célula combustível como suporte de energia  
Fonte: <http://cleantechauthority.com/fuel-cell-primer-lower-costs-better-performance/>



## 2.6.2 Automobilística

Com a preocupação da redução de emissão de poluentes, os países desenvolvidos vêm adotando leis mais rígidas a respeito. Para contornar tal barreira, a indústria automobilística vem desenvolvendo novas alternativas para os motores a combustão, dentre as quais se encontram as células a combustível.

Fabricantes de veículos como General Motors, Volkswagen, Volvo, Honda, Nissan, Toyota e Ford, realizam pesquisas com células combustível poliméricas, para equipar veículos operando com hidrogênio, metanol ou gasolina. Empresas como Ballard, IFC e Plug Power desenvolvem a tecnologia desse sistema (ALDALBÓ, 2004).

Neste contexto, William C. Ford, Jr. (neto de Henry Ford e atual diretor-presidente da Ford Motors Company), fala por si:

Creio que os veículos com células de combustível terminarão com os 100 anos de reinado dos motores de combustão interna como a fonte de potência dominante para o transporte pessoal. Será uma situação de ganhar por todos os lados – os consumidores obterão uma fonte de potência eficiente, as comunidades terão emissões zero e os fabricantes de automóveis terão outra grande oportunidade de negócio – uma oportunidade de crescimento. (William C. Ford, Jr.)

Atualmente, a maior atividade no desenvolvimento de células a combustível para sistemas de transporte, são em relação as células tipo PEMFC, visto que não necessitam de altas temperaturas, operando a cerca de 80°C, e possuem uma partida rápida. Projetos como a da parceria da Ballard e Daimler-Benz desenvolveu um sistema de célula combustível PEMFC a 205 kW (275 HP), para ônibus de sistemas coletivos. Com advento do sucesso a parceria da Ballard com a Daimler-Benz ambas empresas apresentaram o modelo NECAR (*Non Emission Car*), que com sucesso já chega a quinta versão, utilizando células tipo PEMFC e combustível proveniente do metanol, figura 12, tendo por base o modelo Classe A da Mercedes-Benz.



Figura 12 - Carro NECAR 5  
Fonte: <http://www.4wdonline.com/Mercedes/Cars/Necar.html>

### 2.6.3 Unidades Portáteis

A utilização das células a combustível em equipamentos portáteis vem sendo desenvolvidas com o objetivo de substituir as pilhas e baterias utilizadas em aparelhos eletrônicos. A maioria das aplicações portáteis tem utilizado as células PEMFC (*próton exchange membrane fuel cell*) embora as células do tipo DMFC (*direct methanol fuel cell*) tendo desenvolvimento nessa área.

Exemplos de aplicações portáteis incluem telefones celulares, computadores, laptops e brinquedos. Como exemplo de fabricantes de sistemas de células a metanol direto para aplicações portáteis podemos a IBM em parceria com a Sanyo desenvolveram o notebook com autonomia de 8 horas de funcionamento, a 16V e 12-72W de potência operando a metanol, figura 13. Diversas companhias estão envolvidas no processo de unidades portáteis como: Motorola, Ballard, Panasonic, Toshiba entre outras.



Figura 13 - Notebook IBM à célula combustível  
[http://www.theregister.co.uk/2005/04/11/ibm\\_sanyo\\_notebook\\_fuel\\_cell/](http://www.theregister.co.uk/2005/04/11/ibm_sanyo_notebook_fuel_cell/)

## 2.6.4 Programas Espaciais

A aplicação das células a combustível em programas espaciais (1 kW tipo PEMFC no programa Gemini e 1,5 kW de AFC no programa Apollo), figura 14, foram demonstradas desde 1960. Segundo dados da (EG&G Tecnical Services, 2004) ao menos em 87 missões espaciais com 65.000 horas de voo, usufruíram desse tipo de tecnologia. Características como baixo peso, compactação, capacidade de grande armazenamento de energia, e água como produto da reação para fornecem água potável à espaçonave e seus tripulantes, torna esse combustível ideal para o uso espacial.

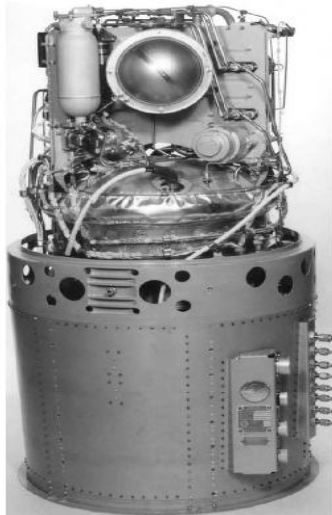


Figura 14 - Célula combustível usada na missão Appolo  
Fonte: (EG&G Tecnical Services, 2004)

## 2.7 Comparações das células a combustível com demais tecnologias

Por se tratar de uma tecnologia nova no mercado, o custo de produção e operação de célula a combustível será um fator determinante na sua comercialização, além de sua funcionalidade e performance. Componentes desse custo incluem os custos do combustível, de manutenção e de fabricação. Se analisarmos a tabela 8, percebe-se

que as células combustíveis têm o custo do kWh apenas inferior ao da tecnologia da energia solar.

Tipo de recurso	Custo médio (centavos de US\$ por kWh)
Hidrelétrica	2-5
Nuclear	3-4
Carvão	4-5
Gás natural	4-5
Vento	4-10
Geotérmica	5-8
Biomassa	8-12
Célula combustível a hidrogênio	10-15
Solar	15-32

Tabela 8 - Custos de diferentes tipos de energia  
Fonte: (MOREIRA, 2009)

Fazendo uma comparação o custo entre as células a combustível (CaC) e as tecnologias que utilizam combustão interna tipo diesel e gás natural como combustíveis, o preço se revela bem aquém para aplicação como provedor de energia, como mostrado na tabela 9. Justifica-se sua aplicação onde a confiabilidade, inexistência de poluição ambiental (gases de combustão e/ou poluição sonora) são indispensáveis, a exemplo de empresas de telecomunicações, bancos, centros de pesquisa, hospitais, aeroportos. Entretanto Linardi (2010) esclarece que esta tecnologia deve apresentar ao público amadurecimento e confiabilidade, sem ultrapassar certos limites de custo de, aproximadamente, US\$ 2.500,00 por kW instalado.

Tecnologia	Poluição sonora	Qualidade de energia	Confiabilidade	Manutenção	Custo (US\$/KW)	Impacto ambiental
CaC	Inexistente	Boa	Alta	Limpeza	3.000,00 à 5.000,00	Inexistente
Grupo Diesel	Alto	Regular	Regular	Geral	750,00	Existente
Turbina Gás Natural	Alto	Regular	Regular	Geral	1.100,00	Existente

Tabela 9 - Comparação entre os tipos de geradores existentes no mercado  
Fonte: (FRANCHI, et al., 2009)

Quanto mais eficiente um sistema de geração, menos combustível será usado. Sistemas que tem alta eficiência produzem menos dióxido de carbono, logo contribuem contra o aquecimento global. Pode verificar, na figura 15, que sistemas híbridos de células a combustível e turbina a gás podem atingir eficiência de conversão superior a 70%, enquanto as plantas que utilizam combustíveis fósseis não passam de 45% de eficiência.

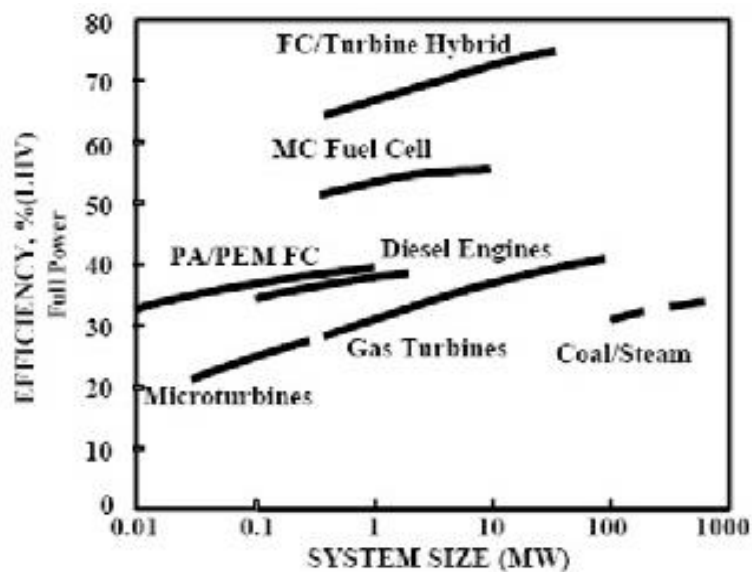


Figura 15 - Eficiência estimada dos sistemas de geração  
 Fonte: <http://www.ibiblio.org/hyperwar/NHC/CRS/propulsion.htm>

### 3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

#### 3.1 Operação Básica

A estrutura básica de todas as células a combustível é semelhante: a célula unitária consiste em dois eletrodos porosos, cuja composição depende do tipo de célula, separados por um eletrólito e conectados por meio de um circuito externo. Os eletrodos são expostos a um fluxo de gás (ou líquido) para suprir os reagentes (o combustível e o oxidante). O hidrogênio gasoso (o combustível) penetra através da estrutura porosa do ânodo, dissolve-se no eletrólito e reage nos sítios ativos da superfície do eletrodo,

liberando elétrons e formando prótons (H<sup>+</sup>). Os elétrons liberados na oxidação do hidrogênio chegam ao cátodo por meio do circuito externo e ali 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 e calor (VILLULAS, et al., 2002). Um esquema de uma célula a combustível na figura 16.

As reações envolvidas em uma célula a combustível em meio ácido são:

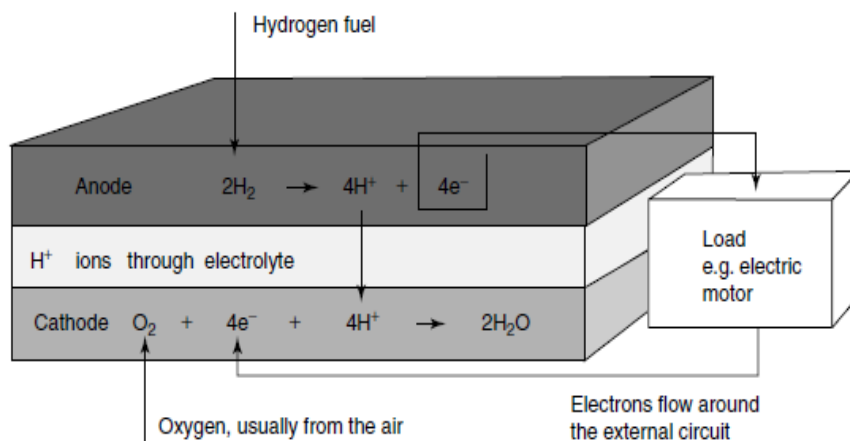
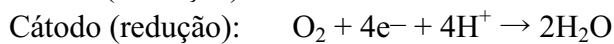


Figura 16 - Esquema de uma célula a combustível hidrogênio/oxigênio  
 Fonte: (LARMINIE, et al., 2003)

De forma geral, o produto dessa reação tem nível de poluição zero quando o hidrogênio for o combustível, haja vista que nenhum outro produto dessa reação vai ser prejudicial a natureza.

### 3.2 Estrutura física de uma célula a combustível

Os componentes físicos de uma célula a combustível unitária são:

- ✓ **Ânodo:** É o eletrodo que *emite elétrons* para o circuito externo; constitui o *pólo negativo* da pilha a combustível. Será nele que vai ocorrer a oxidação do combustível.
- ✓ **Cátodo:** É o eletrodo que *recebe elétrons* do circuito externo; constitui o *pólo positivo* da pilha a combustível. Será onde vai ocorrer a redução do oxidante.
- ✓ **Eletrólito:** Transportar as espécies envolvidas nas reações eletroquímicas, entre os eletrodos; previne a condução eletrônica (curto circuito entre os eletrodos) e possui a função de separar os gases dos eletrodos, mesmo a pressão elevadas. Geralmente o eletrólito dá o nome a um tipo de célula a combustível; (LINARDI, 2010)
- ✓ **Camada difusora** - sem catalisador. Esta camada vem sempre associada aos eletrodos, ânodo e cátodo. Possui as funções de distribuição dos gases reagentes na camada catalítica e onde o contato elétrico do eletrodo com a placa bipolar. A camada difusora é conhecida também pela sigla GDL (*gás diffusion layer*) (LINARDI, 2010).
- ✓ **Placas bipolares ou interconectores:** Servem para fazer um “empilhamento” das células a combustível, dessa forma pode-se se ligar em série o ânodo de uma célula combustível ao cátodo de outra.

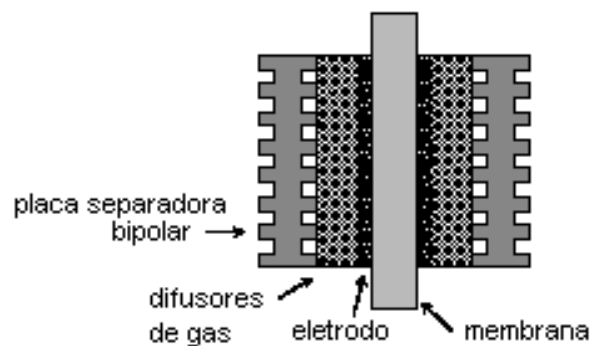


Figura 17 – Componentes físicos de uma célula unitária  
Fonte: (COSTA, 2005)

### 3.3 Formas de aumentar a velocidade de reação em uma célula a combustível

A energia de ativação é a energia mínima necessária para ativar as moléculas, fazendo com que elas colidam efetivamente, possibilitando, assim, o início da reação. Quanto menor a energia de ativação, mais rápida ocorrerá a reação. A energia de ativação pode ser vista através da curva de energia, figura 18, onde o meio é exotérmico (liberação de calor) e têm uma reação é espontânea ( $\Delta G < 0$ ), assim como uma célula a combustível.

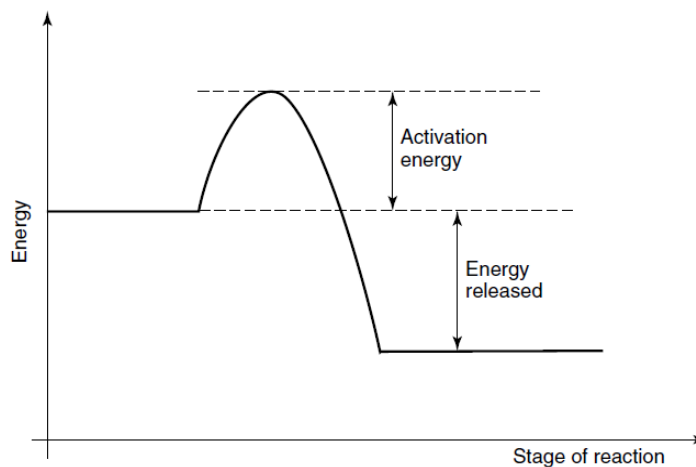


Figura 18 - Curva de energia  
Fonte: (LARMINIE, et al., 2003)

Entre as formas de aumentar a velocidade de uma reação de uma célula a combustível, temos:

#### 3.3.1 Uso de Catalisador

Os catalisadores possuem propriedade de aumentar a velocidade de uma reação sem sofrer modificações permanentes, tanto na composição química como na quantidade. O catalisador vai aumentar a velocidade da reação através da diminuição da energia de ativação, figura 19. Geralmente nas células a combustível utiliza-se platina com tal objetivo.



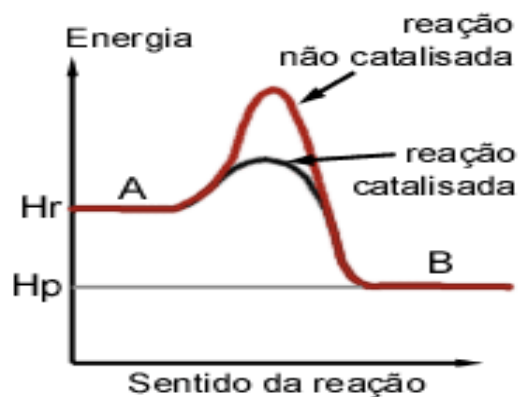


Figura 19 - Esquema do funcionamento de um catalisador numa célula a combustível  
 Fonte: <http://antiga.coperve.ufsc.br/vestibular2000/simulado06.html>

### 3.3.2 Aumento da temperatura

A influência da temperatura na velocidade de uma reação pode ser analisada observando-se o comportamento das reagentes. Aumentar a temperatura significa acrescentar a energia cinética das moléculas, ou seja, aumentar a velocidade das moléculas. Moléculas mais rápidas colidem com mais frequência e com mais violência. Logo, mais moléculas reagem em um certo espaço de tempo e com isso a velocidade aumenta.

Para cada temperatura temos uma *curva de energia* em que exemplifica o número de moléculas com uma certa energia, como mostrado na figura 20. A região rachurada é proporcional ao número de moléculas com energia igual ou maior que energia de ativação. Ela indica, portanto, a parcela de moléculas em condições de reagir. Note que, com o aumento da temperatura de  $T_1$  para  $T_2$ , aumenta também a região rachurada, ou seja, a parcela de moléculas em condições de reagir. Consequentemente, mais moléculas reagem e a velocidade aumenta.

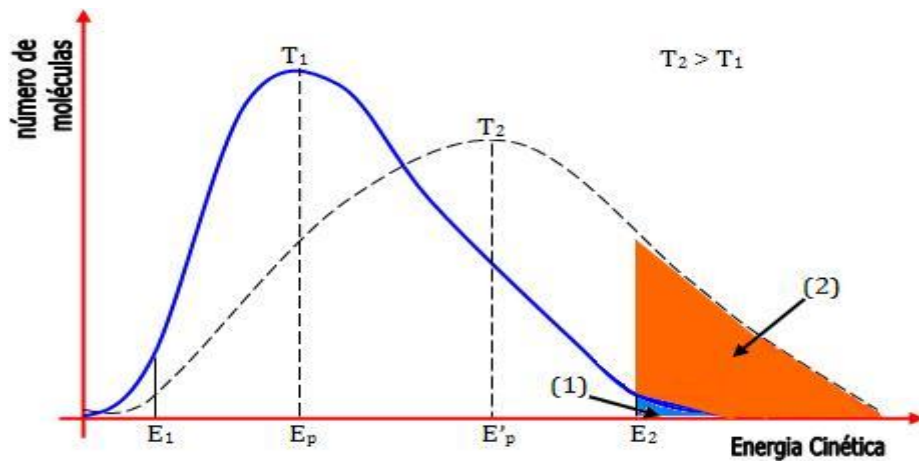


Figura 20 - Curva de energia

Fonte: <http://www.colegioweb.com.br/quimica/analise-grafica-da-influencia-da-temperatura-na-velocidade-de-uma-reacao.html>

A preocupação em medir a velocidade de uma reação é muito antiga. Um grande cientista do século XIX, Van't Hoff, já dizia que: “Um aumento de  $10^{\circ}\text{C}$  na temperatura duplica a velocidade de uma reação”, através da seguinte expressão:

$$V_2 = 2^{(t_2 - t_1)/10} \cdot V_1$$

Onde:

$V_1$  = velocidade na temperatura  $t_1$

$V_2$  = velocidade na temperatura  $t_2$

### 3.3.3 Aumento da área do eletrodo

Quanto maior a área de superfície, maior o número de colisões e maior a velocidade da reação. Desta maneira, claramente a taxa de reações será proporcional a área do eletrodo. De fato a área do eletrodo é de vital importância para performance do projeto da célula a combustível, geralmente citado em termos de corrente por  $\text{cm}^2$  (LARMINIE, et al., 2003). A porosidade dos eletrodos ajudam a aumentar a superfície de contato com o combustível.

Um aviso deve ser mencionado, de que eletrodos frequentemente não funcionam em “escala”, ou seja se a área é dobrada, não significa que a corrente será. As razões para isso são variadas e ainda não foram bem compreendidas ainda (LARMINIE, et al., 2003)

### 3.3.4 Aumento da pressão do combustível

Quando falamos em influência da pressão na velocidade de uma reação, devemos pensar somente nos reagentes gasosos. Se aumentarmos a pressão (diminuindo o volume, por exemplo), aumentamos o número de colisões e, portanto, a velocidade. Note que aumentar a pressão equivale *aumentar a concentração* dos participantes gasosos, o que explica o aumento da velocidade de reação. No geral, o aumento potencial de uma célula a combustível, aumenta com a pressão parcial (concentração) dos reagentes e decresce com o aumento parcial dos produtos (EG&G Technical Services, 2004)

### 3.3.5 Aumento da concentração dos reagentes

A primeira observação da influência da concentração dos reagentes na velocidade de uma reação foi feita pelo químico alemão Karl Friedrich Wenzel, no século XVIII, quando estudava a ação dos ácidos sobre metais. Entretanto, somente em 1864 essa influência foi rigorosamente enunciada, através da *lei da ação das massas*, pelo cientistas noruegueses Cato Maximilian Guldberg e Peter Waage. A lei da ação das massas diz “*A velocidade de uma reação, num dado instante e a cada temperatura, é proporcional ao produto das concentrações molares dos reagentes, elevadas a potências iguais aos respectivos coeficientes na equação química balanceada*”. Entre as células a combustível o potencial elétrico vai diminuir na proximidade onde a concentração é menor.

## 3.4 Energia de uma célula a combustível a hidrogênio

Em sistemas elétricos de potência, a energia e a potência elétrica podem ser facilmente calculadas pelas seguintes expressões:

$$\text{Potência} = V.I \quad (1)$$

$$\text{Energia} = \int_0^t P dt \quad (2)$$

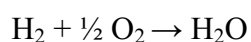
Entretanto, a energia proveniente de reações químicas, de entrada e saída não são tão fáceis de definir. Em um nível mais simples, pode-se dizer que é a “energia química” é proveniente do H<sub>2</sub> e do O<sub>2</sub>. O problema é que a “energia química” é definida em termos como “entalpia”, “função de Helmholtz”, “energia livre de Gibbs”. Mais recentemente o termo “exergia” tornou-se bastante utilizado, e é um conceito particularmente útil em altas temperaturas de células a combustível. Há também outros termos (também útil) como valor calorífico.

No caso das células a combustível, a *energia livre de Gibbs* é um conceito importante. Pode-se definir a energia livre de Gibbs como “a energia para realizar para realizar trabalho externo, desconsiderando qualquer trabalho feito pela mudança de pressão e/ou volume” (LARMINIE, et al., 2003). Em uma célula a combustível, o “trabalho externo” envolve movimento de elétrons pelo circuito externo. Exergia é todo trabalho externo extraído, incluindo as devidas mudanças de volume e pressão. Entalpia, é simplesmente, é a energia livre de Gibbs mais a energia relacionada a entropia.

Outro ponto importante é que a variação energia livre de Gibbs, conhecida como a energia de Gibbs de formação, vai nos dar a energia liberada. Essa energia liberada será dada pela diferença da energia de Gibbs do produto pela entrada dos reagentes, representada pela seguinte expressão:

$$\Delta G_{\text{formação}} = G_{\text{produto}} - G_{\text{reagentes}}$$

Considerando uma reação básica entre hidrogênio/oxigênio em uma célula a combustível:



Então temos:

$$\Delta G_{\text{formação}} = (G_{\text{produto}})_{\text{H}_2\text{O}} - (G_{\text{reagente}})_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (G_{\text{reagente}})_{\text{O}_2}$$

Entretanto a energia livre de Gibbs de formação não é constante, e depende da temperatura e do estado (líquido ou gasoso) (LARMINIE, et al., 2003). Na tabela 10 é mostrado a energia de formação de Gibbs da reação da água, sobre diferentes pontos de temperatura.

Form of water product	Temp °C	$\Delta\bar{g}_f$ , kJ mol <sup>-1</sup>	Max EMF V	Efficiency limit %
Liquid	25	-237.2	1.23	83
Liquid	80	-228.2	1.18	80
Gas	100	-225.2	1.17	79
Gas	200	-220.4	1.14	77
Gas	400	-210.3	1.09	74
Gas	600	-199.6	1.04	70
Gas	800	-188.6	0.98	66
Gas	1000	-177.4	0.92	62

Tabela 10 - Energia de formação de Gibbs da água  
 Fonte: (LARMINIE, et al., 2003)

Se em todo processo não ocorrer perdas ou mais propriamente dito que é “reversível”, então toda a energia livre de Gibbs vai ser convertida em energia elétrica (LARMINIE, et al., 2003).

### 3.5 Potencial elétrico teórico de uma célula a combustível

O potencial elétrico teórico de uma célula a combustível será dada pela expressão (3) de circuito aberto de uma célula a combustível.

$$E = - \Delta G_f / nF \quad (3)$$

Onde:

n = número de elétrons transferidos por cada molécula de combustível na reação;  
 F = constante de Faraday, 96.485 coulombs (volts/joule);  
 $\Delta G < 0$  (reação espontânea)

Para a reação,  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ , operando a 200<sup>0</sup>C, temos pela tabela 10 que  $\Delta G_f = -220$ kJ, então:

$$E = 220.000 / 2 * 96.485 = 1.14 \text{ V}$$

### 3.5.1 Efeito da temperatura e pressão sobre o potencial elétrico teórico

O potencial elétrico teórico de uma célula a combustível está diretamente relacionada com a temperatura e a pressão, no qual está submetida. As expressões abaixo revelam tal fato.

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) \quad (4)$$

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (5)$$

Onde:  $\Delta H$  = variação da entalpia (J);

$\Delta S$  = variação da entropia (J/K);

T = temperatura (K);

n = número de elétrons transferidos por cada molécula de combustível na reação;

$E_0$  = *fem* a 1 atm

F = constante de Faraday, 96.485 coulombs (volts/joule);

R = constante universal dos gases.

O aumento da temperatura em uma célula a combustível vai diminuir o potencial elétrico, conforme mostrado na expressão 4. Para exemplificar, conforme os dados obtidos da Tabela 10 para a reação de formação da água ( $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ ) nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP) à 25<sup>0</sup>C sua tensão fica em 1,23 V, entretanto se sua temperatura aumenta para 80<sup>0</sup>C seu potencial elétrico teórico cai para 1,18 V. Entretanto, como será visto no tópico 3.6.5, quando posta em funcionamento, o aumento da temperatura reduz a queda de tensão em uma célula a combustível posta em condições operacionais, devido as suas perdas.

O efeito da pressão afeta a energia livre de Gibbs, conseqüentemente a tensão. A partir da expressão 5 pode-se atinar que quanto maior a pressão dos reagentes, mais elevado será o potencial elétrico da pilha a combustível. Caso se utilize ar no lugar de oxigênio puro, vai ocorrer uma diminuição da pressão, conseqüentemente haverá uma queda no potencial elétrico da pilha.

### 3.6 Perdas de tensão

Como visto anteriormente, o potencial teórico de uma célula a combustível em circuito aberto é calcula pela expressão abaixo,

$$E = - \Delta G_f / nF$$

Em condições ideais de temperatura e pressão (CNTP), a tensão de circuito aberto apresenta um valor em torno de 1,23 V. Entretanto, quando uma célula a combustível posta em funcionamento, seu potencial tende a diminuir à medida que aumenta a densidade de corrente. Para corroborar o fato, a curva de polarização, figura 21, representa o desempenho de uma célula a combustível quando posta em funcionamento. Esta curva representa a queda de potencial da célula, a partir do circuito aberto, com o aumento de solicitação da carga elétrica da mesma, ou seja, do potencial  $E$  em função da densidade de corrente  $i$ .

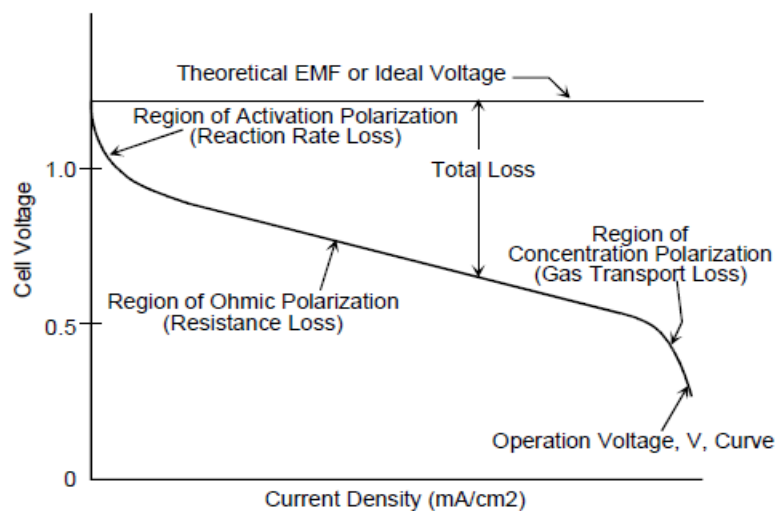


Figura 21 – Causas da perda de tensão.  
Fonte: (EG&G Tecnical Services, 2004)

A partir da figura acima pode-se dizer que a queda de tensão que ocorre na célula a combustível está relacionado ao seguintes fatos:

- Perdas por Polarização de ativação;

- Perdas Ôhmicas;
- Perdas por Polarização de Concentração

Ainda ocorre *perdas por correntes internas* que não está relacionada a figura acima.

### 3.6.1 Perdas por polarização de ativação

Representa a barreira energética criada para a transferência de elétrons na interface do eletrodo (LINARDI, 2010). Essa perda é o resultado da energia requerida para iniciar a reação. É causada pela baixa cinética dos eletrodos sendo similar as reações eletroquímicas em que exige a necessidade de superar a energia de ativação (EG&G Technical Services, 2004).

Essa perda se torna representativa para baixas densidades de corrente, visto que as outras perdas de tensão a baixas correntes ainda são desprezíveis. Apresenta uma característica não-linear, como visto na figura 21.

Segundo (LARMINIE, et al., 2003), os fatores de mitigação das perdas por polarização podem-se incluir:

- Aumento da temperatura;
- Uso mais efetivo do catalisador;
- Aumento da superfície de contato dos eletrodos;
- Aumento da concentração dos reagentes, por exemplo, usar O<sub>2</sub> em vez de ar;
- Aumento da pressão.

### 3.6.2 Perdas ôhmicas

São perdas do resultado da combinação da resistência dos vários componentes da célula a combustível. Essas resistências incluem a resistência elétrica dos eletrodos, a resistência que o eletrólito oferece a passagem de fluxo de íons, além do fluxo de



elétrons através dos componentes condutores de corrente. Podem ser definidas pela expressão a seguir.

$$R = ( R_{\text{eletrólito}} + R_{\text{eletrodo}} + R_{\text{condutores}} ) \quad (6)$$

A queda de tensão é essencialmente proporcional à densidade de corrente, obedecendo à lei de Ohm, assim apresentando uma característica linear como mostrado na figura 21.

Existem três maneiras segundo (LARMINIE, et al., 2003), para reduzir a resistência interna das células a combustível, entre as quais:

- Uso de eletrodos com uma excelente condutividade;
- Bom design e o uso material apropriado para as placas bipolares ou interconectores.
- Fazer o eletrólito mais fino possível.

### 3.6.3 Polarização por Concentração

Polarização por concentração (por difusão ou ainda por transferência de massa) é resultado da mudança na concentração dos reagentes na superfície dos eletrodos. Uma redução na concentração resulta na diminuição no transporte de reagentes para a superfície do eletrodo, afetando a tensão.

Quanto maior a densidade de corrente, maiores serão as perdas por concentração, visto que o combustível (hidrogênio) e o oxidante são consumidos em grandes quantidades.

### 3.6.4 Perdas por correntes internas

É a perda de energia resultante do combustível que atravessa diretamente o eletrólito, do anodo para o cátodo sem liberar elétrons para o circuito externo, reduzindo dessa forma a eficiência da célula a combustível. Ocorre a baixas densidades de corrente, especialmente em circuitos abertos, o que vai contribuir para uma pequena

diferença entre a tensão ideal e seu valor prático. Seu efeito prático é mais notável em células de combustível a baixa temperatura operação.

### 3.6.5 Efeito da temperatura na perda de tensão

Foi mostrado no tópico 3.5.1 que o efeito da temperatura sobre a tensão, era que o aumento da mesma ocasionaria um decréscimo da tensão em condições de circuito de aberto. Entretanto ver-se nesse tópico que quando postas em condições de operação, as células a combustível que operam a alta temperatura tem uma menor queda de tensão comparada as células que operam a baixa temperatura operação, como ilustrado na figura 22 e figura 23 respectivamente. Ambas ilustrações abaixo equivalem a figura 21, com suas perdas, sobre diferentes pontos de temperatura.

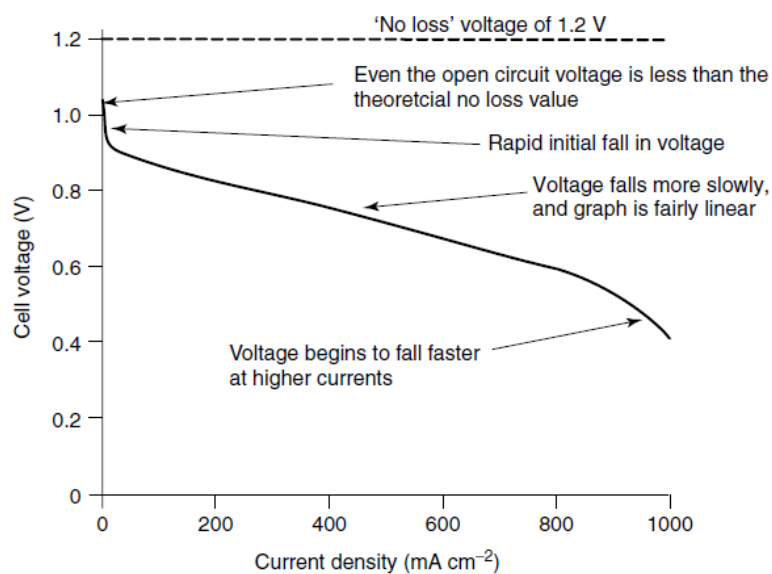


Figura 22 - Tensão de uma célula a combustível a baixa temperatura  
Fonte: (LARMINIE, et al., 2003)

É mostrado na figura acima, que a tensão de circuito aberto teórico de uma célula a combustível a baixa temperatura é de 1,2 volts. Entretanto na prática sua tensão de circuito aberto é menor que o valor teórico, devido perdas de tensão por correntes internas, referente ao tópico 3.6.4. É visto no gráfico que ocorre uma abrupta queda inicial de tensão (perdas por ativação) e em seguida de um decaimento mais suave e linear com o aumento gradativo densidade de corrente (perdas ôhmicas). Em certo

momento, ocorre uma queda mais acentuada de tensão (perdas por concentração) a alta densidade de corrente.

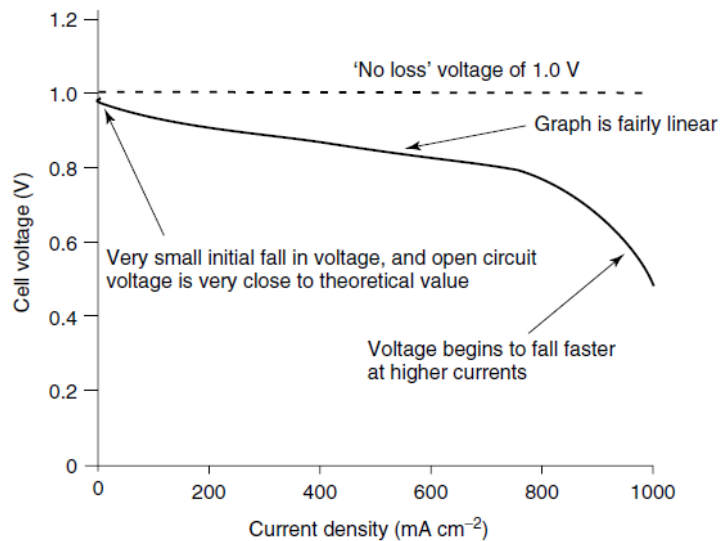


Figura 23 - Tensão de uma célula a combustível a alta temperatura  
Fonte: (LARMINIE, et al., 2003)

Quando se trata de uma célula a combustível a alta temperatura de operação, a tensão de circuito aberto na prática é igual ou pouco menor que sua tensão teórica de circuito aberto, como representado na figura acima. Sua queda de tensão inicial é pequena e razoavelmente linear. Quando submetido a alta densidade de corrente, a queda de tensão cai abruptamente assim como as células a combustível de baixa temperatura.

Fazendo um comparativo da figura 22 à figura 23, conclui-se que embora as células a combustível de baixa temperatura operação tenham uma tensão reversível ou sem perdas maior que as de alta temperatura, suas perdas operacionais são maiores por causa de fatores relacionados a perda de tensão.

### 3.7 Eficiência das células a combustível

Baseado na primeira Lei da Termodinâmica, o conceito de desempenho ou eficiência de um sistema energético,  $\eta_{energ}$ , pode ser expresso pela seguinte equação, e ilustrado pela figura 24.

$$\eta_{energ} = \frac{E_{útil}}{E_{entrada}} \quad (7)$$

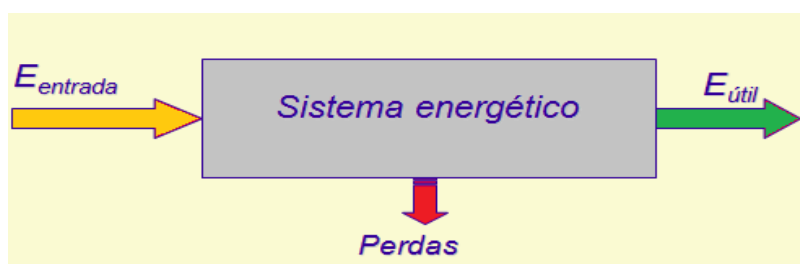


Figura 24 - Rendimento de um sistema qualquer

Seguindo o mesmo procedimento, o cálculo de eficiência de uma célula a combustível pode ser mostrado conforme ilustra a figura 25.

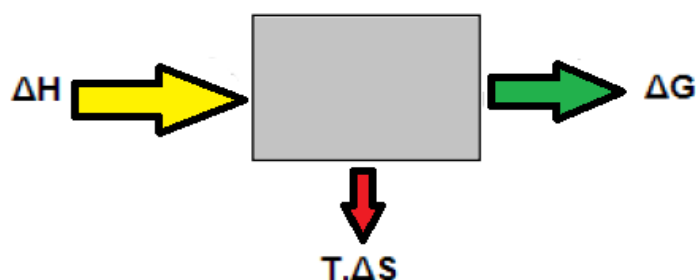
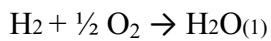


Figura 25 - Eficiência de um sistema a célula a combustível

Comparando a figura 24 à figura 25, relaciona-se a entalpia ( $\Delta H$ ) à energia de entrada,  $T.\Delta S$  (entropia) com as perdas, e  $\Delta G$  (energia livre de Gibbs) à energia útil. Assim,  $\Delta G$  representa a parte máxima de  $\Delta H$  que pode se manifestar na forma de trabalho elétrico. A relação entre  $\Delta G$  e  $\Delta H$  é chamada de eficiência teórica máxima (ou eficiência termodinâmica) (LINARDI, 2010).

$$\eta_{max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (8)$$

Considerando-se a reação da formação da água nas condições padrões de temperatura (25<sup>o</sup> ou 298<sup>o</sup>K) e pressão (1 atm), a energia térmica ( $\Delta H$ ) na reação hidrogênio/oxigênio é 285,8 kJ/mole, e a energia livre de Gibbs é de 237,1 kJ/mole. Dessa forma, a eficiência de uma célula a combustível operando a nas condições padrões será:



$$\text{Eficiência}_{\text{máx}} = \Delta G / \Delta H$$

$$\text{Eficiência} = 237,1 / 285,8$$

$$\text{Eficiência} = 83\%$$

Outra forma de calcular a eficiência de uma célula a combustível é através do potencial de operação e o potencial de equilíbrio termodinâmico.

$$\text{Eficiência}_{\text{el}} = E_{op} / E^0 \quad (9)$$

Nas situações práticas quando circula corrente, a voltagem da célula a combustível é menor que o potencial de equilíbrio termodinâmico (1,23 V), resultando, portanto, em eficiências menores que as teóricas (VILLULAS, et al., 2002). Como pode ser visto na figura abaixo, o rendimento de uma célula a combustível varia inversamente à potencia devido a perdas de tensão. Embora a eficiência seja alta a baixa densidade de potência, a relação peso/potência é alta, o que não é desejável. Segundo (VILLULAS, et al., 2002), em condições práticas de operação, a voltagem da célula a combustível se aproxima de 0,7 V, o que se traduz em uma eficiência prática ao redor de 50%.

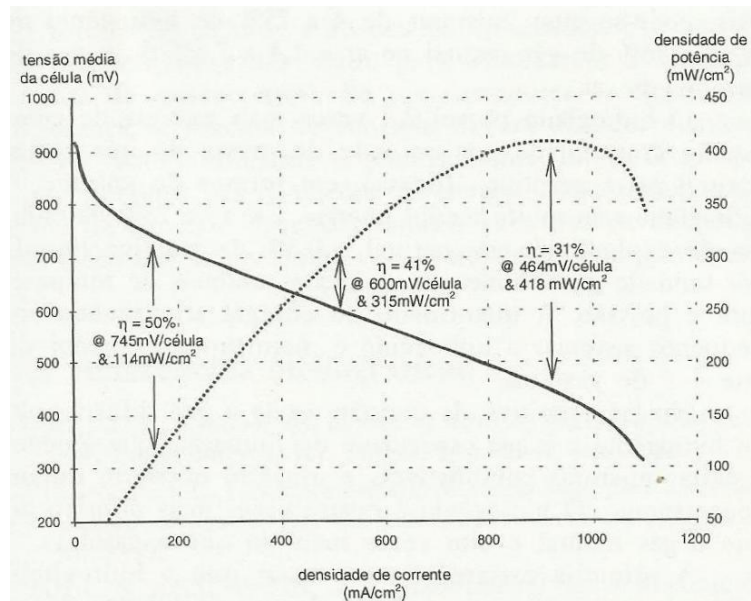


Figura 26 - Eficiência de uma célula a combustível  
 Fonte: (FARRET, 1999)

### 3.7.1 Eficiência das células a combustível VS Ciclo de Carnot

A teoria termodinâmica mostra que sobre as condições ideais, o ciclo de Carnot não pode converter toda a energia fornecida em energia mecânica, pois parte da energia térmica é desperdiçada. Se a máxima temperatura de uma máquina térmica é  $T_1$ , e o calor do fluido liberado a temperatura  $T_2$ , então o ciclo de Carnot nos diz que a máxima eficiência será:

$$\epsilon(\%) \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\%$$

A eficiência dado pelo ciclo de Carnot em usinas térmicas avançadas chega aproximadamente a 50% (LINARDI, 2010). As razões para o limite do ciclo de Carnot é que parte da energia térmica, proporcional a baixa temperatura  $T_2$ , é “jogada fora” ou desperdiçada além de que o transporte de calor e atritos mecânicos resultam em um valor de eficiência muito menor.

A conversão da energia química – nas células a combustível - por outro lado, é direta para energia elétrica e esse processo não envolve a conversão do calor em energia mecânica, como é feito no ciclo de Carnot, figura 27. Portanto, nas células a combustível, sua eficiência pode exceder a do ciclo de Carnot mesmo operando a baixas temperaturas.

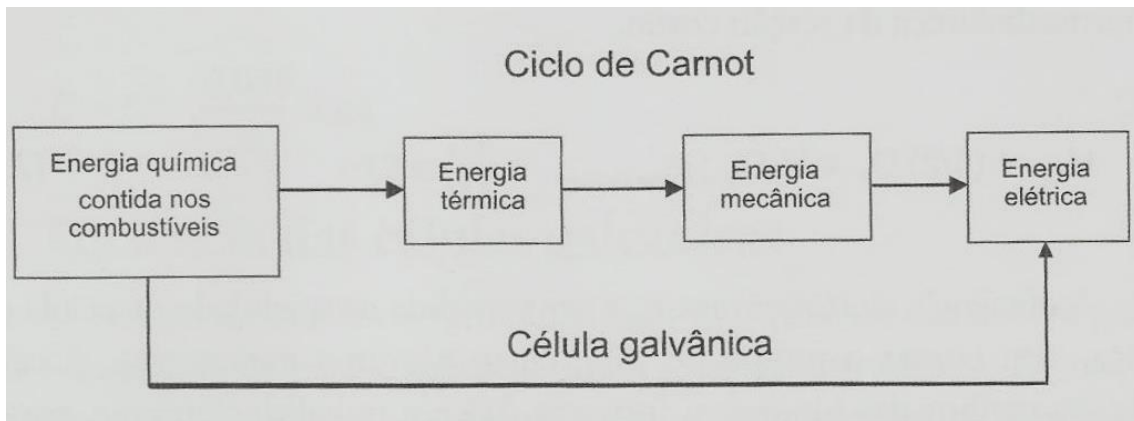


Figura 27 – Comparativo da transformação de energia entre as células galvânicas e termoeletricas  
 Fonte: (LINARDI, 2010)

Sobre uma vasta escala de temperatura as células a combustível tem uma eficiência teórica maior do que as tecnologias provenientes do ciclo de Carnot como mostrado na figura abaixo.

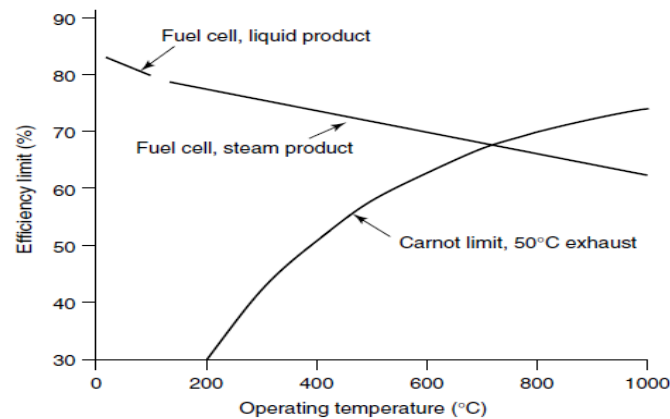


Figura 28- Eficiência máxima de uma célula a combustível comparada com ciclo de Carnot.  
 Fonte: (LARMINIE, et al., 2003)

Algumas considerações podem ser consideradas sobre a figura acima:

- Embora o gráfico sugira que a baixas temperaturas são melhores para as células a combustível, as perdas de tensão quase sempre, são menores a altas temperaturas, conforme visto no tópico 3.6. Na pratica, geralmente, as células possuem tensões mais elevadas as altas temperaturas do que nas baixas temperaturas, assim possuem um rendimento maior.
- O calor desperdiçado a altas temperaturas das células a combustível é mais útil que a baixas temperaturas, pois é possível o reaproveitamento da energia térmica dissipada com a utilização de sistemas de co-geração.
- As células a combustível nem sempre tem maiores eficiência que as maquinas térmicas.

#### 4. AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NO BRASIL

No Brasil, as pesquisas em células a combustível começaram em 1977 (TICIANELLI, et al., 1988). Existe hoje no país três empresas que fabricam (Clamper, Unitech e Electrocell) e que investem a um certo tempo em P&D de células a combustível, com resultados disponíveis em protótipos iniciais e até mesmo aprimorados. Outras instituições nacionais investem em P&D como a COPEL, PETROBRAS e ELETROPAULO, desenvolvendo programas nessa área, ou abordam pontualmente aspectos dessa tecnologia, fazendo parcerias com universidades e instituições de pesquisa (IPEN, UFRJ, UNICAMP, USP entre outras).



Figura 29- Célula a Combustível de 5 kW para aplicação residencial desenvolvida pela Electrocell  
Fonte: (NETO, 2007)



Em julho de 2002 o governo brasileiro criou o Programa Brasileiro de Célula a Combustível (ProCaC), elaborado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT. A tradição brasileira de pesquisa e desenvolvimento tem levado ao financiamento de projetos individuais, pontuais, ou de colaborações de grupos com interesses afins.

O objetivo do ProCaC é *"Promover ações integradas e cooperadas que viabilizem o desenvolvimento nacional de tecnologias de sistemas de célula combustível, para habilitar o país a se tornar um produtor internacionalmente competitivo"* definindo um programa de âmbito nacional, visando organizar e conduzir as ações de P&D (pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico, pesquisa aplicada e pesquisa estratégica) em torno desse tema.

Foram encontrados diversos desafios para o desenvolvimento dessa tecnologia. Além da própria barreira tecnológica que envolve a construção das células existem a produção, armazenamento e a distribuição do hidrogênio, o desenvolvimento de recursos humanos, indefinições na política energética nacional e a premissa de parcerias efetivas entre instituições do governo, setor industrial e o de serviços.

Das várias estratégias sugeridas no programa a fim de conseguirem atingir o objetivo pretendido, estão *"estabelecer condições para que as instituições participantes colaborem ativamente entre si nos diversos aspectos envolvidos nas áreas de pesquisa, desenvolvimento e dessa tecnologia"* e *"fortalecer as indústrias existentes, criar novas e envolver uma parte maior do setor industrial em parceria"*.

Entre os projetos de pesquisa e desenvolvimento nacional de células a combustível, o que mais se destaca é o de aplicação automotiva. Em um consórcio integrado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), em conjunto com a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP), o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o Global Environmental Facility (GEF) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) foi possível desenvolver cinco ônibus movidos a células de combustível estão circulando em São Paulo desde 2005, colocando a cidade entre as poucas do mundo utilizando a tecnologia em transporte público.



Figura 30- Ônibus nacional movido a hidrogênio

Fonte: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=onibus-brasileiro-movido-a-hidrogenio-comeca-a-rodar-em-sao-paulo>

Com base nos dados obtidos pelo site do Ministério de Minas e Energia o ônibus tem capacidade para quarenta passageiros (incluindo motorista), potência de 230 kW, autonomia de 300 km e um consumo de hidrogênio de 15 kg/100 km. O tipo de atração é híbrido (célula a combustível tipo PEM + baterias) e se necessário, consegue rodar mais 40 km utilizando bateria, somente.

Apesar de o projeto combinar a alta tecnologia e a experiência de empresas líderes no mercado global, o Brasil ficou apenas com o desenvolvimento dos chassis e carrocerias, sendo que o principal componente – a célula a combustível – foi produzida pela Ballard (empresa Canadense) em detrimento dos fabricantes nacionais desse tipo de tecnologia, denotando que seus produtos não têm a mínima competitividade com relação aos produtos das empresas estrangeiras, tanto em termos de qualidade quanto em preço. Pode-se confirmar tal fato através da figura 31 abaixo.

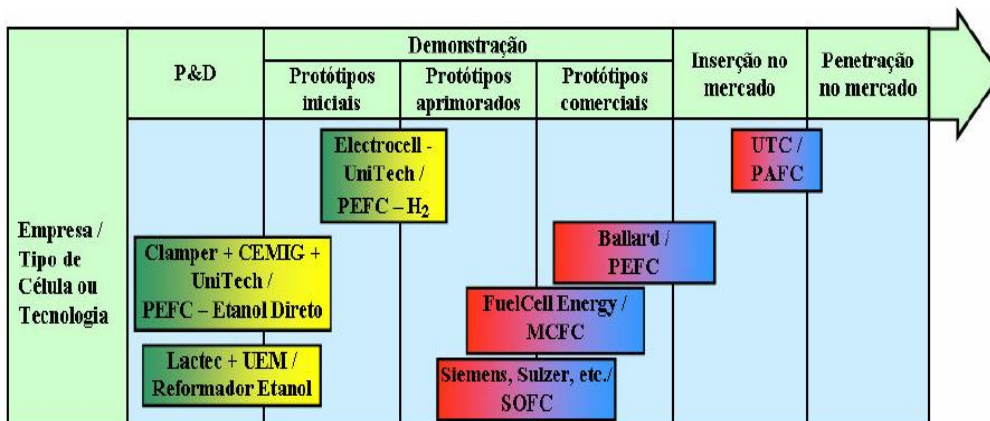


Figura 31 - Estágios de desenvolvimento tecnológico de células a combustível no Brasil e no mundo

Fonte: Programa Brasileiro Sistemas Célula a Combustível

A latência do Brasil em respeito ao desenvolvimento de células a combustível se reflete nos números de patentes que abrange o período de 2002 á 2010. Se analisarmos a tabela abaixo, nenhuma empresa brasileira está listada entre as dez mais que patentearam a respeito de tal tecnologia, sendo destacado o interesse de empresas multinacionais automotivas. Como forma de aumentar a participação nacional desenvolvimento das células a combustível seria a participação do governo como forma contornar a desconfiança existente entre instituições de ensino e empresas nacionais afim de evitar o temor que sua tecnologia seja “roubada” pelo parceiro.

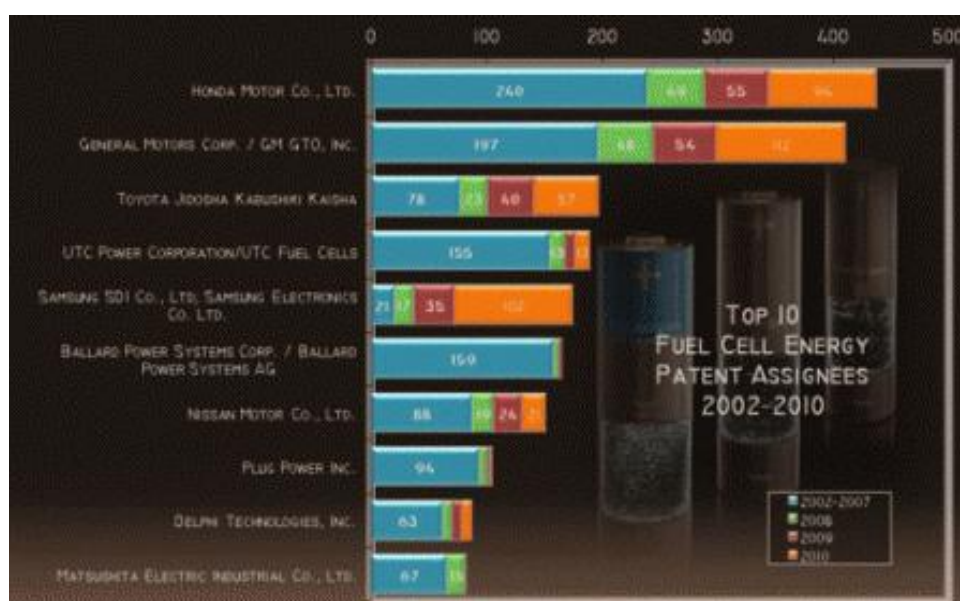


Tabela 11 - Número de patentes de células a combustível entre 2002 – 2010  
 Fonte: <http://www.thetruthaboutcars.com/2011/07/the-truth-about-green-patents/>

Segundo o relatório de (Matos, 2009), entre os países membros do BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China), indicou que o Brasil investiu 157 milhões de reais ou 70 milhões de dólares, o que corresponde a 55% dos valores investidos pela Rússia ou China individualmente, durante o período de 2001 – 2007. E que esses valores comparados com países desenvolvidos durante este mesmo período (Estados Unidos, Japão ou União Européia) é da mesma ordem de grandeza dos investimentos anuais dos citados.

Em comparação com outros países, embora o investimento nessa tecnologia tenha sido ínfimo, o Brasil tem dado importância a projetos que privilegiem o uso de

combustíveis renováveis nacionais, com ênfase especial à reforma de etanol em particular. De acordo com o ProCaC no caso do etanol, a existência da produção em escala comercial a preços competitivos no mercado internacional com uma rede de distribuição em todo o país, torna este combustível bastante atraente e estratégico para ser reformado e desenvolvido para aplicações automotivas a células a combustível.

O etanol sendo obtido da biomassa, logo renovável, além de ser menos tóxico, apresenta uma menor permeabilidade à membrana Nafion para o caso das células a DMFC embora sua desvantagem consista em uma baixa densidade de potência, pois necessita de energia extra para ruptura da ligação C-C segundo (LINARDI, 2010).

Outro fator para o desenvolvimento das células a combustível no Brasil é que estas terão que superar a concorrência de combustíveis baratos e de produção difundida nacionalmente. Esses combustíveis, como o próprio etanol, já estão inseridos no popular, além de serem utilizados sem a necessidade de sua reforma para prover energia, diferentemente das células a combustível. Somando-se a isto, elevam-se as incertezas a respeito de uma tecnologia ainda em desenvolvimento e seus retornos financeiros.

## **5. HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL**

Com essa crescente preocupação em substituir os combustíveis fósseis, extensivas pesquisas tem sido feitas na área de fontes renováveis de energia. O principal destino de muitas fontes de energia visa à produção de eletricidade. Contudo, o potencial de utilização de fontes renováveis como a solar e eólica é limitado por sua característica intermitente e pela dificuldade de utilizar eletricidade em algumas aplicações. Além disso, essas alternativas já citadas não podem ser convertidas em fontes de energia que sejam armazenada e transportada.

Como fonte alternativa de energia renovável, o hidrogênio vem ganhado destaque, sendo considerados por muitos o “combustível perfeito”. Uma de suas principais características concerne ao fato de ser o elemento mais abundante do

universo, compondo 75% de sua massa e 90% de suas moléculas, ser não-poluente e poder ser armazenado e distribuído. Sua importância é tanta que criou-se um movimento a favor de uma “economia do hidrogênio”, proferida pela empresa General Motors (EUA), em 1970, durante a crise do petróleo. Para que isto seja possível terá que se criar as seguintes infra-estruturas: a) Produção de hidrogênio; b) Armazenamento c) distribuição do hidrogênio d) Segurança do hidrogênio.

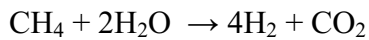
## 5.1 Produção do hidrogênio

Embora o hidrogênio ( $H_2$ ) seja o elemento mais abundante do universo, não se encontra na natureza no seu estado puro, toda sua forma está combinada com outros elementos, por exemplo, água ( $H_2O$ ), ou combustíveis fósseis como o gás natural ( $CH_4$ ). Por isso, a extração do hidrogênio requer energia. Idealmente essa energia deve ser pelo menos igual à energia contida no conteúdo na forma sintética do gás a qual se encontra. A produção do hidrogênio por qualquer processo (geralmente eletrólise ou reforma) é um meio de transformação de energia. A energia elétrica ou energia química dos hidrocarbonetos é transferida para energia química do hidrogênio. Infelizmente, o processo de produção do hidrogênio está sempre associado a perdas de energia.

A escolha do melhor método de produção do hidrogênio depende da quantidade que queremos produzir e do seu grau de pureza. Entre os meios convencionais de produção do hidrogênio temos a seguir:

### 5.1.1 Reforma a vapor ou reforma catalítica

O hidrogênio pode ser extraído de hidrocarbonetos por reforma catalítica, que corresponde segundo (THOMAS, et al., 1999) a 95% da forma obtenção do hidrogênio em larga escala. Esse processo químico é em princípio um processo de transferência de energia. Esse meio de produção de hidrogênio consiste na reação do metano ( $CH_4$ ) ou metanol ( $CH_3OH$ ) com o vapor de água a altas temperaturas, para produzir num processo catalítico, a extração de átomos de hidrogênio, deixando o dióxido de carbono como subproduto, mostrado na reação abaixo.



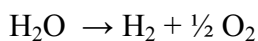
Na realidade, perdas térmicas excedem o conteúdo energético do hidrocarboneto para obtenção a energia contida no hidrogênio. Segundo dados obtidos do site do IEA (*International Energy Agency*) esse processo tem uma eficiência entre 80% - 85% do conteúdo energético original no processo de conversão de energia. Conseqüentemente mais dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é liberado nesse processo do que se o combustível fóssil fosse usado diretamente, sem “desvios”.

Dessa forma, para a maioria das aplicações práticas, o gás natural pode fazer o que o hidrogênio faz, sem a necessidade de converter esse combustível fóssil em hidrogênio. É mais difícil armazenar e distribuir esse portador de energia (H<sub>2</sub>), do que próprio gás natural. Transformar o metano e metanol em hidrogênio não é uma solução para os problemas de energia no futuro, embora que alguns nichos de mercado prefiram esse vetor energético.

### 5.1.2 Eletrólise da água

A eletrólise da água consiste em decompor a molécula da água (H<sub>2</sub>O), quebrando as ligações dos átomos de hidrogênio e oxigênio. Para isso, a energia em forma de eletricidade é fornecida à água. Essa energia em forma de eletricidade pode ser proveniente de um combustível fóssil ou uma fonte de energia renovável.

Reação de eletrólise:



A desvantagem de utilizar este método esbarra na grande quantidade de energia despendida para romper a ligação entre hidrogênio e oxigênio. É preciso fornecer no mínimo a mesma quantidade de energia fornecida pelo hidrogênio como combustível. Na verdade, gasta-se mais energia na eletrólise da água do que na liberada pelo hidrogênio, pois existem perdas nos processos de conversão de energia na forma de calor.

Embora seja uma tecnologia estabelecida, por razões de custo é utilizada somente em pequenas indústrias, onde é necessária alta pureza do hidrogênio para processos químicos tais como fabricação de semicondutores, produção farmacêutica e alimentos.

## **5.2 Armazenamento do hidrogênio**

O armazenamento do hidrogênio é um dos grandes desafios a serem alcançados, pois devido a suas propriedades físico-químicas o torna muito difícil de “prende-lo”. Além de ser o elemento mais leve da natureza e apresentar uma molécula bastante pequena, é quimicamente muito ativo, está sempre procurando outro elemento para se combinar.

Embora o hidrogênio tenha uma grande densidade de energia por massa, apresenta uma baixa densidade energia por volume, fazendo disso um desafio para armazenar, particularmente dentro de um veículo onde o espaço é restrito. Segundo (LINARDI, 2010) *“a energia contida em 1,0kg de hidrogênio corresponde à energia de 2,75 kg de gasolina. Entretanto, devido à sua massa específica [...] a energia de um litro de hidrogênio equivale à energia de 0,27 litro de gasolina”*. Esse aspecto pode ser ilustrado na tabela 12.

Portador de energia	Forma de armazenamento	Densidade de energia por massa [kWh/kg]	Densidade de energia por volume [kWh/l]
Hidrogênio	Gás (200 atm)	33,3	0,53
	Gás (300 atm)	33,3	0,75
	Gás (800 atm)	33,3	2,92
	Líquido (-253 °C)	33,3	2,36
	Hidretos metálicos	0,58	3,18
Gás natural	Gás (200 atm)	13,9	2,58
	Gás (300 atm)	13,9	3,38
	Líquido (-162 °C)	13,9	5,8
GPL	Líquido	12,9	7,5
Metanol	Líquido	5,6	4,42
Gasolina	Líquido	12,7	8,76
Gasóleo	Líquido	11,6	9,7
Electricidade	Bateria ácido-chumbo	0,05	0,1
	Bateria iões de lítio	0,25	0,05

Tabela 12 - Densidade de energia (massa e volume) de vários combustíveis  
Fonte: (ALMEIDA, 2005)

O hidrogênio apresentar uma baixa densidade de energia faz-se necessário containers muito maiores para poder fornecer a mesma quantidade de energia do que outros combustíveis. Dessa maneira é preciso armazenar o hidrogênio sobre elevadas pressões ou mantê-lo sobre estado líquido para obter maiores quantidades de energia por volume. Entre as formas de armazenamento, temos a seguir:

### 5.2.1 Armazenamento do hidrogênio sob a forma de gás comprimido

O armazenamento do gás hidrogênio em cilindros pressurizados, figura 32, é tecnicamente o modo mais utilizado para armazenar uma pequena quantidade de gás. Atualmente as pressões mais usadas para armazenamento em veículos são de 3.600 psi (250 bar) a 5000 psi (350 bar).



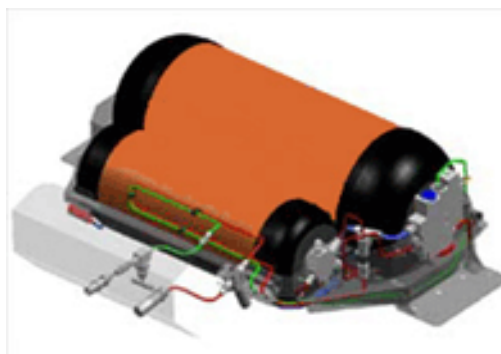


Figura 32- Hidrogênio pressurizado em cilindros  
Fonte: <http://www.lamtec-id.com/energias/hidrogenio.php>

Os materiais utilizados para o armazenamento desse gás será submetido a altas pressões, e a uma molécula muito pequena, com alta velocidade, capaz de difundir em materiais que são impermeáveis a outros gases. O hidrogênio também tende a deixar os metais mais quebradiços. Dessa maneira utiliza-se um tanque alumínio de 6mm de espessura, revestido por fibra de carbono e resina de epox, para demonstrações em aplicações automotivas (LARMINIE, et al., 2003).

Uma desvantagem de aumentar a pressão é que o processo desprende energia, chegando a corresponder a mais de 20% da energia do hidrogênio à pressão de 800 bar em um processo de compressão adiabático, ilustrado na figura abaixo. Em relação a outros gases a compressão do hidrogênio é mais custosa. Além disso, aumentar a pressão corresponde aumentar a espessura do tanque para aumentar sua resistência, acrescentando peso e custo.

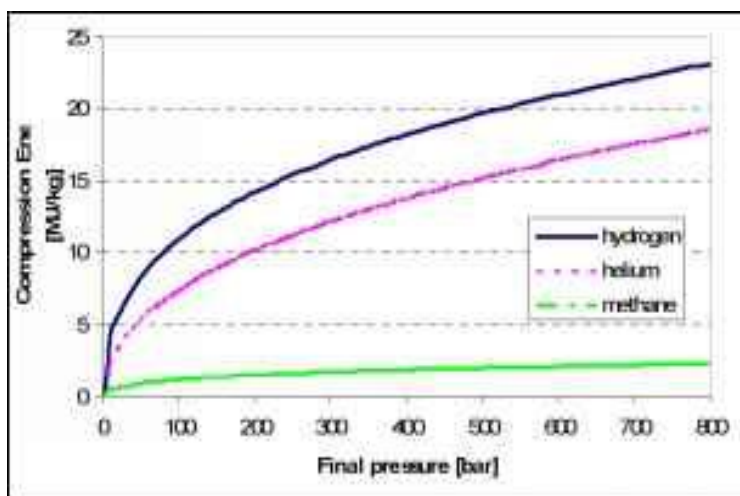


Figura 33 - Compressão adiabática do hidrogênio, hélio e metano  
Fonte: <http://www.panorooma.com/fermentation-biogas/fig-steam-reforming-process-%5Bhydrogen-storage-and-transportation.html>

As vantagens nesse tipo de armazenamento é sua simplicidade e não tem limites para a pureza do hidrogênio.

### 5.2.2 Armazenamento sob a forma líquida

O armazenamento do hidrogênio sobre a forma líquida é a forma mais comum de se estocar grandes quantidades de hidrogênio. O gás refrigerado para o estado líquido é conhecido como criogênico líquido. Grandes quantidades de criogênico de hidrogênio é normalmente usado no processo de refino de petróleo e produção de amônia. Outra aplicabilidade notável é seu uso na NASA para programas espaciais, garantido o fornecimento de energia em suas missões espaciais.

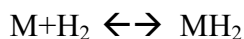
Para manter o gás do hidrogênio na sua forma líquida, precisa submeter o hidrogênio a uma temperatura abaixo de  $252,8^{\circ}\text{C}$ , o que consome segundo (ALMEIDA, 2005) em torno 35 a 60 MJ/kg, correspondente de 30 a 50% da energia contida nesse gás. A tecnologia dos tanques usados em carros consiste em uma dupla camada de paredes, com vácuo entre as mesmas. Essas paredes são formadas em torno de 3cm de espessura com 70 camadas de alumínio folheado com fibras de vidro (LARMINIE, et al., 2003).

A vantagem desse método está em armazenar uma quantidade maior de hidrogênio por unidade de volume, bem como, facilitar o seu transporte (fornecimento em maiores quantidades com menores perdas). Os perigos do hidrogênio liquefeito são menores que o comprimido, pois se existir uma fuga o combustível vai aquecer de forma a ir evaporando-se e libertando-se sobre a forma gasosa mais lentamente para a atmosfera. Segundo dados obtidos no site da NASA, a combinação do hidrogênio líquido com oxigênio líquido produz o maior impulso, ou eficiência em relação ao consumo de propulsor do que qualquer outro propulsor conhecido.

### 5.2.3 Armazenamento em hidretos metálicos

Vários tipos de metais como, titanium, ferro, manganês, níquel e cromo alguma podem combinar-se com o hidrogênio (sob alguma pressão), criando hidretos metálicos.

Os hidretos metálicos são metais híbridos, onde facilmente sua reação reversível pode ser alcançada, com uma pequena introdução de calor. A equação geral é:



O armazenamento será em reservatórios sendo uma das vantagens desse método é sua segurança, pois quando o hidrogênio não é armazenado sobre altas pressões, não pode escapar de forma rápida e perigosa (LARMINIE, et al., 2003). De fato, se a válvula estiver comprometida, ou se houver um vazamento no sistema, a temperatura do container vai diminuir, inibindo a liberação do gás. A desvantagem é que não pode ser utilizado em situações onde grandes quantidades de hidrogênio precisa ser armazenado, como automóveis. Há uma vasta aplicabilidade onde pequenas porções de hidrogênio se fazem necessário, apropriado em locais onde o peso não é importante, mas o espaço sim.

### **5.3 Distribuição do hidrogênio**

O transporte de hidrogênio é uma questão diretamente relacionada as questões de armazenamento do hidrogênio. De forma geral, formas compactas do hidrogênio são mais econômicas de transportar. Atualmente, o hidrogênio é distribuído por dutos ou tanques com hidrogênio líquido ou pressurizado.

Segundo dados do DOE (*Department of Energy*) é menos custoso transportar grandes quantidade de hidrogênio por meio de dutos embora este apresente um grande capital inicial de investimento para construir essa infra-estrutura. O transporte desse gás por rodovias é caro, especialmente sobre longas distancias, sendo o hidrogênio líquido, atualmente o método mais comum de distribuição de hidrogênio devido a pouca quantidade de duto existentes para o transporte desse gás.

Ainda existem as preocupações técnicas com distribuição do hidrogênio em longas distancias, incluindo o potencial do hidrogênio fragilizar a base do aço usado em soldas nesses dutos, a necessidade de um menor custo e maior confiabilidade na tecnologia de compressão do hidrogênio.

Os métodos pelo qual o hidrogênio é produzido também afeta os custos de entrega. Se a produção for diretamente no ponto de utilização desse combustível, elimina-se o custo do transporte. Inversamente, se a produção for centralizada, necessita-se de uma longa distância até o ponto de entrega do combustível, mas diminui o custo de produção do hidrogênio devido a uma maior economia de escala. Dessa forma o custo de produção e distribuição deve-se ser analisadas conjuntamente, afim de obter uma maior economia.

Segundo o DOE, entre os desafios para o transporte desse gás estão à diminuição do custo da compressão do hidrogênio, aumento na segurança de distribuição, apresentar maior custo-benefício no armazenamento, e diminuição do preço da liquefação desse “vetor energético”.

#### **5.4 Segurança do hidrogênio**

O hidrogênio é o único elemento gasoso, que possui o menor peso molecular entre todos os gases. Tem a maior condutividade térmica, maior velocidade molecular e a menor viscosidade e densidade de todos os gases. Tais propriedades, conduz o hidrogênio a ter uma taxa de vazamento maior que outros gases. O hidrogênio vaza 2,8 vezes mais rápido que o metano e 3,3 mais rápido que o ar. Adicionando a isso, o hidrogênio é altamente volátil e inflamável, e sobre certa circunstâncias a mistura do hidrogênio com o ar pode detonar. Essas implicações no design das células a combustível são óbvias, e a segurança desses sistemas devem se apresentar forte (LARMINIE, et al., 2003).

Dessa maneira o hidrogênio deve ser manuseado com cuidado. Os sistemas precisam ser projetados com a menor chance de vazamento e deve ser monitorado constantemente para que isso não aconteça.

Apesar do conceito generalizado de que o hidrogênio é mais perigoso do que outros tipos de combustíveis, tais como gás natural e gasolina, não encontra respaldo, visto que não se tem muitos anos de experiência industriais e residenciais. Estudos sobre a utilização do hidrogênio, metano e gasolina, concluíram que os procedimentos nas normas de segurança são os mesmos (ALDALBÓ, 2004).

De acordo com os dados da tabela 13, pode-se comparar as propriedades relevantes sobre a segurança do hidrogênio com outros gases comumente utilizados como combustível.

	Hydrogen	Methane	Propane
Density, kg m <sup>-3</sup> at NTP	0.084	0.65	2.01
Ignition limits in air, volume% at NTP	4.0 to 77	4.4 to 16.5	1.7 to 10.9
Ignition temperature, °C	560	540	487
Min. ignition energy in air, MJ	0.02	0.3	0.26
Max. combustion rate in air, m s <sup>-1</sup>	3.46	0.43	0.47
Detonation limits in air, volume%	18 to 59	6.3 to 14	1.1 to 1.3
Stoichiometric ratio in air	29.5	9.5	4.0

Tabela 13- Propriedades relevantes sobre a segurança do hidrogênio e dois outros gases combustíveis  
Fonte: (LARMINIE, et al., 2003)

De acordo com a tabela acima, o maior problema com o hidrogênio se torna sua mínima energia de ignição, indicando que pode pegar fogo facilmente. Mas para todos os combustíveis sugeridos na tabela, uma simples faísca poderia causar a ignição desses gases (LARMINIE, et al., 2003). Outro dado importante, é que para o hidrogênio se tornar uma mistura explosiva, precisa de 18% de concentração no ar, enquanto os demais combustíveis precisam de uma menor concentração. A temperatura de ignição do hidrogênio em relação aos demais gases também é a maior.

Outro problema de segurança do hidrogênio, diz respeito ao fato de ser um gás inodoro e queimar com uma chama quente, quase invisível, difícil de detectar. Apesar disso o hidrogênio tende a irradiar menos calor e se extingue mais rápido que a gasolina por exemplo (ALDALBÓ, 2004).

Por se tratar um gás de baixíssima densidade, essa característica torna o hidrogênio comparativamente mais seguro. A densidade do metano é próxima a do ar, significa que não se dispersa facilmente. O propano por ser mais pesado que o ar tende a ficar nos pontos mais baixos, como subsolos. O hidrogênio, por outro lado, é tão leve que se dispersa rapidamente para o alto. Isso significa que os níveis de concentração de ignição ou detonação acontecer são mais improváveis de acontecer.

O hidrogênio, como outros combustíveis deve ser manuseado com cuidado. Entretanto, levando em considerações todas as coisas, não apresenta um grande

potencial de perigo como outros líquidos ou gases inflamáveis comumente usados nos dias atuais.

Grande parte do receio sobre o hidrogênio, se deve a acidente do Hindenburg, no dia 6 de maio, de 1937, figura 34. O acidente deixou amplamente divulgado o mito que o hidrogênio é particularmente uma substância perigosa. Embora o acidente fosse trágico, o número de vítimas foram de 35 pessoas. Por volta de 2/3 das vítimas sobreviveram. Muitos dos que morreram queimados, foram devido ao óleo diesel usado na propulsão do sistema, e o fogo não se iniciou devido ao hidrogênio, mas devido à superfície do dirigível, que era feito de um material altamente inflamável.

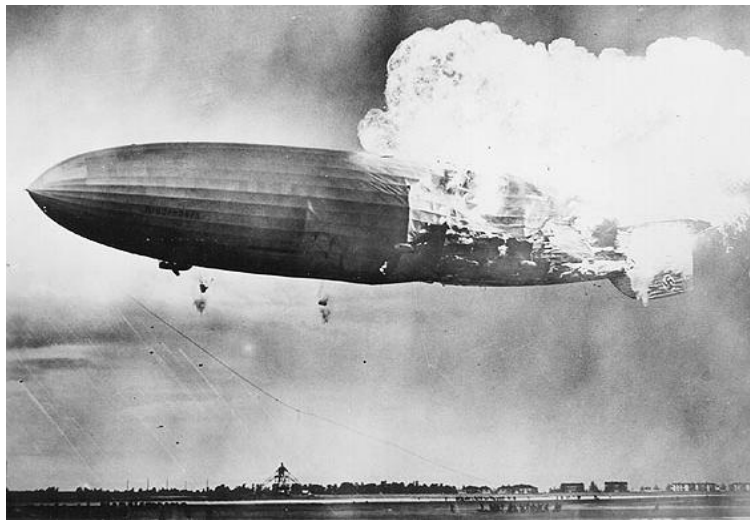


Figura 34- Acidente do Hindenburg

Fonte: <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/boletim/boletim7/B7-%20O%20Acidente%20do%20Hindenburg.pdf>

## CONCLUSÕES

As células a combustível apresentam-se como uma tecnologia próspera, e se justificam em nichos de mercados em que a qualidade e a confiabilidade de energia são primordiais. Seus custos são bastantes elevados e os fatores ambientais ainda não pressionam a utilização dessa tecnologia na geração de energia. Embora seja disseminado pela mídia e parte da literatura científica de que as células a combustível sejam uma tecnologia não poluente, esse fato apenas se torna verdadeiro apenas quando o hidrogênio é obtido de uma fonte renovável de energia, visto esse gás é um “vetor energético” e não uma fonte primária de energia não podendo ser encontrado na forma livre na natureza.

A produção do hidrogênio por qualquer processo é um meio de conversão de energia. Infelizmente, em todo processo de conversão vai estar sempre associado a perdas de energia, dessa forma não há de ser diferente para o hidrogênio. Além disso, o armazenamento e o transporte desse gás requer mais energia seja para compressão ou liquefação, diminuído ainda mais a eficiência relativa desse combustível. Devido aos fatos citados acima, se torna inviável uma economia do hidrogênio, pois os “três pontos” para sua comercialização (produção, distribuição e armazenamento) são ineficientes energeticamente.

O problema global de energia não pode ser resolvido utilizando um vetor intermediário de energia em que para tê-lo tenha-se que desprender mais energia do que a própria fonte de combustível ao qual é obtido, seja renovável ou não.

## BIBLIOGRAFIA

**ALDALBÓ Ricardo.** Célula Combustível a Hidrogênio - fonte de energia da nova era [Livro]. - São Paulo : Artliber, 2004.

**ALMEIDA Aníbal Traça de.** Hidrogênio e células de combustível [Artigo]. - Coimbra : Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005. Disponível em < [http://nautilus.fis.uc.pt/gazeta/revistas/29\\_1-2/vol29\\_1\\_2\\_Art08.pdf](http://nautilus.fis.uc.pt/gazeta/revistas/29_1-2/vol29_1_2_Art08.pdf) > Acesso em: 15 jan. 2012

**ARAUJO Paula Duarte, BERGAMINI, Cristiane Peres, ESTEVES, Gheisa Roberta Telles.** Análise comparativa entre dois sistemas de geração de energia elétrica para a comunidade isolada do interior do Estado do Amazonas: célula A combustível com reformador para gás natural X gerador diesel [Conferência] // In Anais do 5º Encontro de Energia no Meio Rural,. - Campinas (SP) : [s.n.], 2004. Disponível em < [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100010&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100010&script=sci_arttext&tlng=pt) > Acesso em: 03 jan. 2012

**BURANI Geraldo Francisco [et al.]** Introdução da Produção Energetica Através de Células de Combustível no Planejamento Energético [Artigo]. Disponível em < [http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/CLAGTEE2003\\_GeraldoBurani2.pdf](http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/CLAGTEE2003_GeraldoBurani2.pdf) > Acesso em: 05 jan. 2012

**CGEE.** PROCaC - Programa Brasileiro Sistemas Células a Combustível. [Relatório]. - [s.l.] : Ministério de Ciência e Tecnologia, 2002. Disponível em: < <ftp://ftp.mct.gov.br/Biblioteca/10636%20%20Programa%20Brasileiro%20de%20C%E9lulas%20a%20Combust%EDvel.pdf> > Acesso em: 23 jan. 2012

**COSTA Rodolfo Antonio.** Modelagem Computacional e Análise do Comportamento de Célula a Combustível de Membrana Polimérica em Regime Estático e Dinâmico de Carga [Relatório]. - Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2005. Disponível em <[http://www.blogdopapeleiro.com.br/biblioteca/Cientificos/Energia/celula\\_a\\_combustivel.pdf](http://www.blogdopapeleiro.com.br/biblioteca/Cientificos/Energia/celula_a_combustivel.pdf)> Acesso em: 02 de jan. 2012

**EG&G Technical Services Inc.** Fuel Cell Handbook (Seventh Edition) [Livro]. - [s.l.] : U.S. Department of Energy: West Virginia, 2004.

**FARRET Alberto Felix** Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica [Livro]. - Santa Maria : editora da UFSM, 1999.

**FRANCHI T.P e A.F.B Júnior** Utilização de células a combustível tipo PEM como alternativa na geração auxiliar em instalações elétricas de grande porte [Conferência] //



Décimo tercer encuentro regional iberoamericano de Cígre. - Puerto Iguazú : [s.n.], 2009. Disponível em < <http://labplan.ufsc.br/congressos/XIII%20Eriac/B3/B3-12.pdf> > Acesso em: 15 de jan. 2012

**K.D K.E. Cox e Williamsom Jr** Hydrogen: Its technology and Implications [Livro]. - Cleveland : Press, 1977.

**LARMINIE James e Dicks Andrew** Fuel Cell Systems Explained [Livro]. - [s.l.] : John Wiley & Sons Ltd, 2003. - Vol. I.

**LEAL Paulo Andrade** Comparativo entre células a combustível e baterias utilizadas como reserva de energia em telecomunicações [Relatório]. - Curitiba : PRODETC, 2011.

**LINARDI Marcelo** Introdução à ciência e tecnologia de células a combustível [Livro]. - São Paulo : Artliber Editora Ltda., 2010.

**MARQUES Pereira [et al.]** Fuel Cell [Periódico]. - Rio de Janeiro : AEDB, 2007.

**MARUYAMA Flávio [et al.]** Células de combustível e a integração de recursos energéticos [Artigo] // 4th Encontro de Energia no Meio Rural. - Campinas (SP) : [s.n.], 2002. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100037&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100037&script=sci_arttext) > Acesso em: 10 de jan. 2012

**MOREIRA Diego José de Castro** Energia Eólica: Estudo de Caso do Parque Vale dos Ventos. [Relatório]. - Campina Grande : UFCG, 2009.

**NETO Emilio Hoffmann Gomes** Células a Combustível Estacionárias de Pequeno Porte: Contexto e Tendências [Conferência] // Brasil H2 - Fuel Cell Energy. - 2007.

**NETO Emilio Hoffmann Gomes** Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível [Periódico]. - Curitiba : Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005. - Vol. I.

**SERPA Leonardo augusto** Estudo e implemetacao de um sistema gerador de energia empregando células a combustível do tipo PEM [Relatório]. - Florianópolis - SC : [s.n.], 2004.

**THOMAS S. e Zalowitz M.** Fuel Cells - Gree Power [Conferência]. - Los alamos National Laboratory : Los Alamos, NM, EUA, 1999. Disponível em < <http://www.lanl.gov/orgs/mpa/mpa11/Green%20Power.pdf> > Acesso em: 07 de jan.2012

**VILLULAS H. Mercedes, A.Ticianelli Edson e González Ernesto R.** Células a Combustível: Uma alternativa promissora para a geracao de eletricidade [Artigo]. - São Paulo : Química Nova, 2002.

**WENDT Hartmurt, Götz M. e Linardi M.** Tecnologia De Células A Combustível [Artigo]. - [s.l.] : Química Nova, 2000.

**Ministério de Minas e Energia - MME.** Disponível em  
<[http://www.mme.gov.br/programas/onibus\\_hidrogenio/menu/projeto/cronologia.html](http://www.mme.gov.br/programas/onibus_hidrogenio/menu/projeto/cronologia.html)>  
Acesso em: 25 de jan. 2012

**National Aeronautics and Space Administration - NASA.** Disponível em  
<[http://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/hydrogen\\_fuel\\_of\\_choice.html](http://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/hydrogen_fuel_of_choice.html)>  
Acesso em: 28 de jan. 2012

**Department of Energy - DOE.** Disponível em  
<[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/doe\\_h2\\_delivery.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/doe_h2_delivery.pdf)> Acesso em: 03 de fev. 2012

**International Energy Agency - IEA.** Disponível em:  
<<http://www.iea.org/techno/essentials5.pdf>> Acesso em: 25 de mar. 2012