



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPE

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E SEU USO VEICULAR

João Carlos Pinheiro Beck* – beck@pucrs.br

*Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Av. Ipiranga,6681 –Prédio 30 – Bloco E –sala 169

90619-900 – Porto Alegre – RS

Carlos Roberto Cauduro – crcauduro@ucs.br

Universidade de Caxias do Sul

Av. Francisco Getúlio Vargas 1130

Caxias do Sul – RS

Isaac Newton Lima da Silva* – isaac@pucrs.br

Leonardo Cabral Fernández* - leocfernandez@uol.com.br

Resumo: Nesta contribuição efetua-se uma ampla descrição, discussão, utilização e projetos envolvendo células a combustível. A razão é que cresce no mundo um movimento em favor de uma "economia do hidrogênio", esta expressão refere-se a um sistema de energia baseado no hidrogênio, para armazenamento, distribuição e utilização de sua energia. A matriz energética predominante no mundo de hoje baseia-se no combustível fóssil, o petróleo. Dois fatores, porém, vêm solicitando a mudança desta matriz: a questão ambiental e a eficiência energética. No aspecto ambiental, o hidrogênio é a opção mais limpa, o único combustível que poderia substituir a eletricidade na condição de nenhuma emissão prejudicial.

Palavras-chaves: células, combustíveis, hidrogênio, projetos

1. INTRODUÇÃO.

O princípio de funcionamento das células a combustível foi descoberto há mais de 150 anos, sua história iniciou-se em 1839, quando o jurista britânico de nome William Robert Grove descobriu ser a eletrólise da água em ácido sulfúrico diluído reversível. Mais recentemente, células a combustível foram utilizadas no programa espacial Apollo e Gemini (NASA), que contribuíram para que o Homem chegasse à lua em 1968.

. A tabela abaixo compara o valor energético do hidrogênio com outras formas de energia:

| Portador de energia | Forma de armazenamento | Densidade energia/ peso | Densidade energia/ vol. |
|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | (kWh/kg) | (kWh/l) |

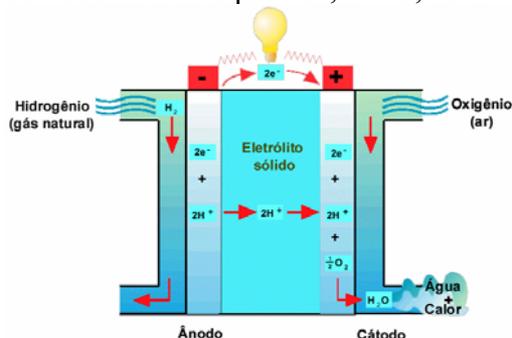
| Portador de energia | Forma de armazenamento | Densidade energia/ peso | Densidade energia/ vol. |
|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | (kWh/kg) | (kWh/l) |

| | | | |
|------------|------------------|------|------|
| Hidrogênio | gás (20 MPa) | 33,3 | 0,53 |
| | gás (24,8 MPa) | 33,3 | 0,64 |
| | gás (30 MPa) | 33,3 | 0,75 |
| | líquido (-253°C) | 33,3 | 2,36 |
| | Hidreto Metálico | 0,58 | 3,18 |
| Metanol | líquido | 5,6 | 4,42 |
| Gasolina | líquido | 12,7 | 8,76 |

| | | | |
|-----------------|-------------------|------|------|
| Gás Natural | gás (20 MPa) | 13,9 | 2,58 |
| | gás (24,8 MPa) | 13,9 | 3,01 |
| | gás (30 MPa) | 13,9 | 3,38 |
| | líquido (-162 °C) | 13,9 | 5,8 |
| LPG (Propano) | líquido | 12,9 | 7,5 |
| Diesel | líquido | 11,6 | 9,7 |
| Elétrica - dade | Bateria-Pb | 0,03 | 0,09 |

2.Descrição da tecnologia

Como é mostrado no esquema simplificado da figura abaixo, células a combustível são, em princípio, baterias de funcionamento contínuo, que produzem corrente contínua pela combustão eletroquímica, a frio, de um combustível gasoso, geralmente o hidrogênio.



Desenho esquemático de uma célula a combustível

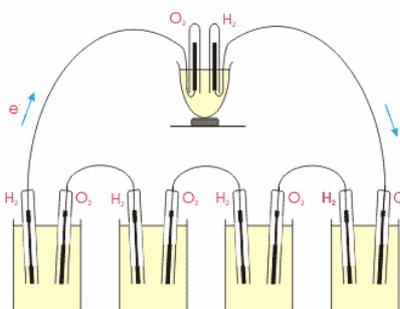
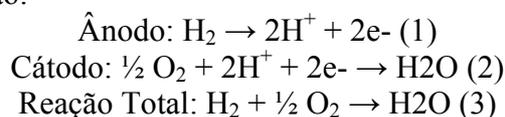


Figura acima: Bateria gasosa de

As reações nos eletrodos são:



2.1 Classificação das células a combustível

Existem vários tipos de células a combustível, conforme se descreve a seguir.

Alcalinas: o eletrólito utilizado é uma solução concentrada de KOH (85 % em peso) para temperaturas elevadas (~ 250 °C) e menos concentrada (35 - 50 % em peso) para temperaturas inferiores (< 120 °C). Podem alcançar eficiência de geração de potência de até 70%.

Ácido fosfóricas: Neste tipo de células a combustível, o eletrólito utilizado é o ácido fosfórico a ~100%, funcionando a temperaturas entre 160 °C e 220 °C. Para temperaturas baixas, o ácido fosfórico é um mau condutor iônico e o envenenamento da platina pelo CO no

ânodo torna-se mais severo. A estabilidade relativa do ácido fosfórico é elevada em comparação com outros ácidos comuns e, conseqüentemente, a célula a combustível pode produzir energia elétrica a temperaturas elevadas a partir de 220 °C

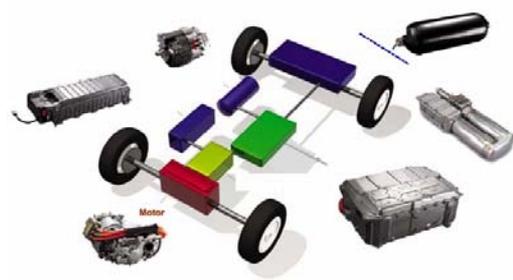
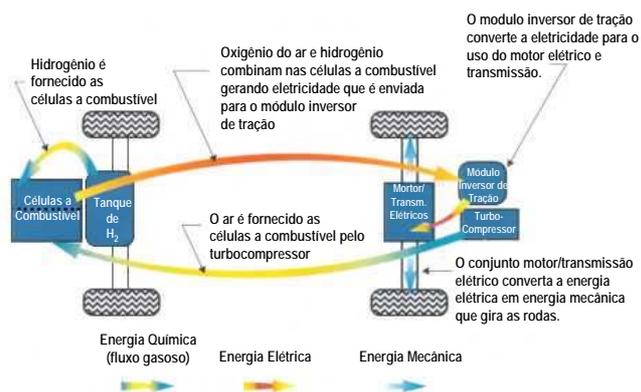
#Membrana de troca protônica e de metanol direto: por serem as mais promissoras como alternativa para motores a combustão (são robustas e de fácil acionamento e desligamento, além das vantagens inerentes como alta eficiência com baixa emissão de poluentes) serão mostradas, mais detalhadamente no decorrer do trabalho.

#Carbonatos fundidos (alta temperatura de operação): utiliza como eletrólito uma combinação líquida de carbonatos alcalinos (Na, K, Li), que são estabilizados num suporte de LiAlO_2 . funciona no intervalo de temperaturas entre 600 e 700 °C, para os quais os carbonatos alcalinos formam um sal altamente condutor de íons (ion carbonato).

#Óxido sólido: funcionam na faixa de temperaturas entre os 600 e 1000 °C possibilitando, assim, velocidades de reação elevadas sem a utilização de catalisadores nobres. O eletrólito utilizado neste tipo de célula é um metal óxido, sólido e não poroso, usualmente Y_2O_3 -estabilizado em ZrO_2 . Nas temperaturas elevadas de funcionamento, os íons de oxigênio são transportados do ânodo para o cátodo.

2.2 Sistemas automotivos

Veículos que operam através de células a combustível são classificados como veículos elétricos. Pois, como os veículos elétricos, à bateria, convergem no ponto em que ambas transformam energia química em energia elétrica muito eficientemente e ambas requerem manutenção mínima, pois, não possuem peças móveis. Entretanto, ao contrário das células a combustível, os reagentes da bateria são armazenados internamente e depois de esgotada, necessita ser recarregada ou substituída. Nos veículos elétricos a bateria, são utilizados modelos recarregáveis. Em veículos elétricos a células a combustível o combustível é armazenado externamente, no tanque de combustível e o ar, obtido na atmosfera. Enquanto o tanque do veículo contiver combustível, as células a combustível produzirão energia na forma de eletricidade e calor. A escolha entre bateria ou células a combustível, depende da utilização pretendida.

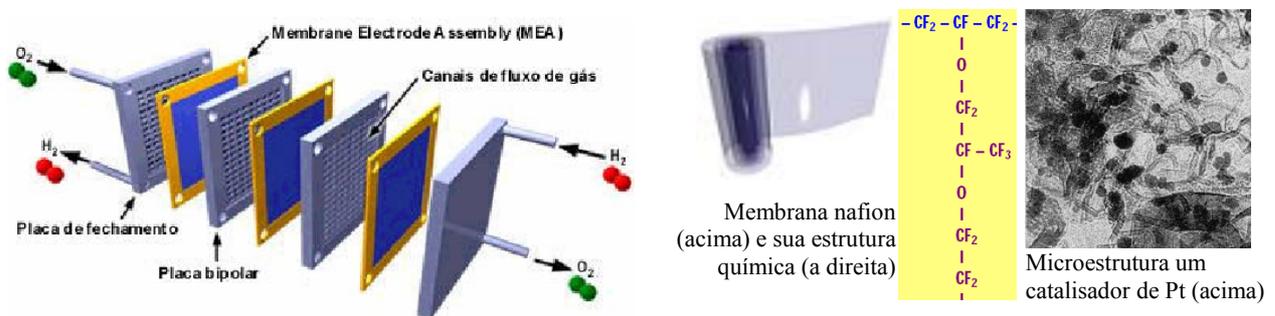


A configuração do sistema pode variar, a figura acima mostra um esquema de um veículo com uma configuração bastante enxuta. O sistema pode ser incrementado por um sistema de reforma de combustível, caso o veículo não seja abastecido com hidrogênio puro; isto com uma unidade secundária de fornecimento de energia que pode ser uma bateria e/ou capacitor. Na figura acima os itens em azul são os componentes responsáveis pelo fornecimento de energia. Os itens em verde são os componentes responsáveis pela transformação da energia. O item em vermelho é o responsável pela transformação da energia em trabalho.

Pilha a combustível (PEMFC): Considerando que as células a combustível operam com uma eficiência inferior a 100%, a saída da tensão de uma célula é no máximo de 1,16 volt. Como a maioria das aplicações requer tensões muito mais altas do que esta (por exemplo, motores elétricos comerciais eficazes operam tipicamente a 200 - 300 volts), a voltagem requerida é obtida conectando muitas células a combustível individuais em série formando a uma pilha. A tensão depende do número de células; já a corrente elétrica depende das áreas.

Fisicamente, cada célula combustível PEM consiste de um conjunto de eletrodo e membrana (Membrane Electrode Assembly - MEA). O MEA é o coração da célula a combustível e consiste dos dispositivos a seguir. Uma membrana contínua de eletrólito polimérico como por exemplo as membranas Nafion®, fabricadas pela DuPont™.

Esta membrana de ionômero perfluorado foi desenvolvida, inicialmente, para a eletrólise cloro/ soda e é composta por um polímero perfluorado de tetrafluoropolietileno, onde, num de seus lados, um éter faz a ligação com um ácido etil sulfônico perfluorado que é prensada entre dois eletrodos e difusores de gás porosos feitos de carbono que tem a função de difundir os gases, fornecer sustentação mecânica e fornecem um caminho elétrico para elétrons. A camada difusora de gases é tipicamente baseada em carbono, pode ser na forma de tecido, em uma configuração prensada de fibra do carbono, ou simplesmente em um material tipo feltro. Tem uma espessura típica de 100 a 300 microns. Um catalisador é integrado entre a membrana e os eletrodos. As reações anódica e catódica representam, de uma maneira geral, a ruptura das ligações químicas entre os átomos de H₂ e O₂. Em células a combustível, entretanto, ambas as reações são heterogêneas e ocorrem na interface eletrodo/eletrólito, sendo catalisadas na superfície do eletrodo. Devido a esse fato, utiliza-se, nas células de baixa temperatura de operação, platina como catalisador. A platina pura sobre carvão ativo é praticamente desativado na presença de 150 ppm de CO.



Entretanto, a utilização de um catalisador binário Pt/Ru (platina-rutênio, 1:1) aumenta significativamente a atividade catalítica. Outros materiais pesquisados como co-catalisadores adicionados a platina são o estanho (Sn), molibdênio (Mo), tungstênio (W) e ósmio (Os). Os conjuntos do eletrodo incluem frequentemente os selos, ou juntas, integrais onde contatam componentes adjacentes. O MEA é prensado entre duas placas de fluxo de gases, que dependendo da sua configuração também podem ser chamadas de placas bipolares que canalizam o combustível e o oxidante aos lados opostos do MEA. Ao lado, junto ao eletrodo, a placa contém os canais. A forma do campo de fluxo assim como a largura e a profundidade dos canais têm um grande impacto na eficácia da distribuição dos gases reagentes através da área ativa do conjunto de membrana/eletrodo. O projeto do campo de fluxo afeta também o fornecimento de água da membrana e a remoção de água do cátodo. Em geral a forma do campo de fluxo em serpentina conduz o combustível e os dutos paralelos conduzem o oxidante. A segunda finalidade é coletar a corrente. Os elétrons produzidos pela oxidação do hidrogênio devem ser conduzidos através do ânodo, dos difusores e através da placa de fluxo de gases antes deles deixarem a célula, viajando por um circuito externo e reentrando na célula pelo cátodo. Se as células a combustível forem montadas alinhadas umas com as

outras, as placas que coletam a corrente do ânodo e do cátodo iriam ficar lado a lado. Para diminuir o volume e o peso total da pilha, ao invés duas, apenas uma placa é usada com os campos de fluxo em cada um de seus lados. Este tipo de placa, chama de placa bipolar, significa que na mesma placa é anodo e catodo, pois, quando em série, um lado da placa “torna-se” negativo e o outro, conseqüentemente, positivo e separa uma célula da próxima, transportando o combustível de um lado e o oxidante de outro.

2.3 Teoria de operação fundamental da célula

Reações químicas, elétricas, eletroquímicas e termodinâmicas ocorrem numa célula

A variação da energia livre de Gibbs de uma reação química é relacionada ao potencial da célula via a seguinte equação: $\Delta G = -zFE$, onde z é o número de elétrons envolvidos na reação por mol de H_2 (1 mol de $H_2 = 6,023 \cdot 10^{23}$ moléculas de H_2), F é a constante de Faraday, igual a $9,6485315 \cdot 10^4$ coulombs/mol e^- (ou Joules/Volt /mol) e “E” é a voltagem da célula para um equilíbrio termodinâmico na ausência de um fluxo de corrente, pelo potencial de Nernst. Entretanto o valor da diferença de potencial elétrico nem sempre é o mesmo, mas varia dependendo da pressão e temperatura de acordo com a energia livre de Gibbs nestas quantidades. O potencial reversível é dependente da temperatura e da pressão desde que a energia livre de Gibbs é em função da temperatura e os coeficientes de atividade são dependentes da temperatura, da pressão dos gases e das forças iônicas dos eletrólitos. A equação de Nernst é usada derivar uma fórmula para calcular o potencial reversível da célula.

- No final do século passado, Wilhelm Ostwald e Walther Nernst demonstraram a vantagem da combustão eletroquímica a frio em relação a produção de eletricidade pela máquina de calor/mecânica, que funciona sob o princípio de Carnot. Um motor de combustão interna converte energia química em energia mecânica, que pode ser transformada em energia elétrica por meio de um gerador rotacional. A eficiência é obtida pela relação entre o trabalho reversível realizado variação de entalpia. Em geral estas eficiências não ultrapassam 50% mesmo para os motores mais eficientes. Já a eficiência teórica de qualquer processo de produção de energia eletroquímica é obtida pela relação entre a variação da energia livre de Gibbs e a variação de entalpia. O $T\Delta S$ corresponde ao calor reversível trocado com o ambiente externo. A mudança na entropia da reação (ΔS) depende fortemente dos reagentes e dos produtos. Em princípio, porque em determinados casos a eficiência da célula combustível superior a 1 é atingível quando a mudança da entropia é positiva. Isto significa que o coeficiente da temperatura ($\partial(\Delta E)/\partial T = \Delta S/nF$) da célula é positivo e a energia elétrica suplementar é derivada do calor do reservatório térmico externo. A eficiência teórica eletroquímica diminui de 86 a 70% na faixa de temperaturas de 100 a 1000°C. A eficiência de Carnot, por sua vez, eleva-se de 0 a 70% na mesma faixa e somente a temperaturas superiores a 1000°C é maior que a eficiência teórica eletroquímica. Portanto, células a combustível a hidrogênio apresentam uma eficiência teórica significativamente maior que máquinas de Carnot, principalmente a baixas temperaturas.

- Assumindo uma célula a combustível de 100 cm² operando, sob as condições típicas de 1 atmosfera de pressão e 80° C, a 0,7 V e gerando 0,6 A/cm² de corrente, para uma corrente total de 60 A. O excesso de calor gerado pode ser estimado com a Potência Devida ao Calor = Potência Total Gerada menos a Potência Elétrica.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{calor}} &= P_{\text{total}} - P_{\text{el}} \\
 &= (V_{\text{ideal}} * I_{\text{célula}}) - (V_{\text{célula}} * I_{\text{célula}}) = (V_{\text{ideal}} - V_{\text{célula}}) * I_{\text{célula}} \\
 &= (1,16 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) * 60 \text{ A} \\
 &= 0,46 \text{ V} * 60 \text{ coulombs / s} \quad * 60 \text{ segundos / min.} \\
 &= 1650 \text{ J/min.}
 \end{aligned}$$

Esta célula está gerando cerca de 1,7kJ de excesso de calor/minuto enquanto gera cerca de 2,5 kJ de energia elétrica /minuto.

A condição de operação para uma célula a combustível PEM é diretamente relacionada as propriedades do ácido perfluorosulfônico, ionômero utilizado na membrana e na camada difusora. Os mais recentes desenvolvimentos neste campo estão voltados para a o desenvolvimento de membranas que operam acima de 100°C.

2.4 Célula a combustível por metanol direto

Podem operar com metanol líquido, geralmente diluído em uma mistura com água. O abastecimento em estado gasoso da mistura metanol/água também é possível e minimiza os problemas do cruzamento, porém, é mais problemático em respeito a umidificação. Os polímeros combinados com flúor são rapidamente permeados pelas moléculas de metanol no combustível, de forma que quando os combustíveis concentrados são usados, o combustível perde-se no processo gerador, afetando a capacidade de potência, e a sub-reação do metanol e do ar reduzem drasticamente os watts, criando um problema designado cruzamento de metanol.

Devido às propriedades similares do metanol comparado com as da água, as moléculas de metanol bem como as moléculas de água são transportados ao cátodo pela difusão eletro-osmótica. No cátodo, o metanol causa um potencial misturado devido à interferência da oxidação do metanol com a reação de redução do oxigênio. Conseqüentemente, resulta uma diminuição no desempenho da célula. O cruzamento do metanol depende de um número de fatores, os mais importantes são a permeabilidade/espessura da membrana, a concentração do metanol na alimentação do combustível, a temperatura de operação e o desempenho do próprio ânodo.

2.5 Sistemas adjacentes

Além da pilha de células a combustível os outros componentes que completam o seu sistema são: componentes de gerência de combustível, água e ar.

- **Ar:** Sob condições normais de operação o ar entra na célula a uma pressão requerida para alimentação do cátodo que varia de acordo com o modelo e fabricante do módulo, por exemplo, o Ballard Mark 902 está entre 1 e 2 barg (nominal), nos modelos Gen 3, 4 e 7 da GM a pressão é de 2,7 bar. A configuração do sistema depende do fabricante. Na admissão do ar o umidificador deve obrigatoriamente ser o último componente antes da célula, mas pode porém ser integrado ao compressor e como a compressão aquece ar, um intercooler pode ser colocado após o compressor, para que o ar seja resfriado a temperatura de operação da célula. O ar quente esgotado que sai da célula a combustível contém água como um produto da geração de energia e da umidificação. Esta água está em estado de vapor e é recuperada em sua maior parte pela passagem do ar por um condensador a água então é reencaminhada ao reservatório, o ar é devolvido a atmosfera.
- O circuito de refrigeração consiste de reservatório (que também pode ser um desionizador), filtro desionizador, conjunto radiador/ventoinha (que pode fazer parte do circuito direta ou indiretamente), um trocador de calor para fornecer calor ao umidificadores, uma válvula by-pass e um aquecedor.
- **Temperatura:** Embora a célula combustível PEM opere a uma temperatura muito mais baixa do que o motor de combustão interna, a gerência do calor é um desafio. A célula a combustível tem somente 10% do calor retirado pela exaustão. Com o tamanho da célula requerido para o uso veicular o calor gerado não pode ser passivamente dissipado por convecção e radiação por sua superfície externa, assim 80% precisa ser rejeitado através do

radiador. Outra questão interessante é a gerência do calor para as temperaturas mais baixas que é mais difícil devido ao diferencial inicial da temperatura entre o refrigerante e a temperatura do ambiente. O sistema de gerenciamento de calor dos veículos com células a combustível geralmente tem um radiador maior que os dos equipados com motores de combustão interna. A válvula by-pass, assim como nos motores de combustão interna, serve para direcionar a linha do refrigerante liberando sua passagem para circular no radiador, um desviando-a para o circuito aonde se encontra uma câmara com o aquecedor. Uma fonte externa de calor pode ser uma resistência elétrica ou um queimador de combustível e serve para ceder calor ao fluido refrigerante no início da operação para que assim a célula atinja a sua temperatura de operação mais rapidamente.

- **Desionização:** os íons causam a condutividade do fluido o que causa curtos circuitos nas células. A ionização é evitada através do uso de sofisticados sistemas de detecção e leitos desionizadores em circuitos de refrigeração e umidificação. O uso de materiais apropriados tais como o aço inoxidável, ligas de alumínio, alumínio especialmente revestido e polímeros isolantes são os mais apropriados.
- **Umidificação:** pelo fato da condutividade da membrana estar diretamente relacionada ao seu teor de umidade o objetivo da umidificação é saturar os gases reagentes com tanta água quanto possível.

3. Armazenamento

O armazenamento do hidrogênio é o principal problema para veículos a célula a combustível que utilizam hidrogênio de forma direta. O hidrogênio pode ser armazenado comprimido, líquido, em materiais tais como nanotubos, fibras de carbono, hidretos de metal, e em um número de compostos químicos.

- **Hidrogênio comprimido:** o hidrogênio comprimido não pode ser armazenado em tanques de aço, porque as moléculas de hidrogênio tornariam o metal quebradiço. O armazenamento do gás comprimido em tais tanques tem sido a uma pressão de 34 MPa (5000 psi).
- **Armazenamento criogênico:** O hidrogênio atinge seu estado líquido a 235°C quando passa a ter uma concentração 845 vezes maior do que em seu estado gasoso, cerca de 30% do hidrogênio pode ser desperdiçado por evaporação durante o abastecimento.
- **Nanoestruturas de carbono:** Nanotubos de carbono são tubos de carbono microscópicos sintetizados em laboratório que podem ser usados para armazenar hidrogênio e que podem estar dispostas em paredes simples, paredes duplas e fibras de grafite.
- **Hidretos:** O hidrogênio liga-se a mais de 80 compostos metálicos que dão forma a uma atração fraca que armazena o hidrogênio até ser aquecido. Os sistemas de hidretos metálicos podem ser categorizados como de baixa (<150°C) ou alta temperatura (300°C). A empresa Millenium Cell desenvolveu um processo de armazenar o hidrogênio quimicamente em uma solução de borohidreto de sódio (NaBH₄), o qual é produzido a partir do bórax (NaBO₂), para fornecimento a célula a combustível.

Reforma de combustíveis convencionais: Os combustíveis convencionais como álcoois ou hidrocarbonetos podem ser uma opção de armazenamento de hidrogênio em alta densidade através da utilização de um processo de reforma de combustível a bordo. A tabela abaixo compara a reforma de alguns combustíveis no reformador multi-combustível desenvolvido por Ahmed.

| Combustível | H ₂ teórico | H ₂ teórico | Seletividade H ₂ | Temperatura C° |
|-------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------|
| Metanol | 70% | 64% | 91 | 450 |

| | | | | |
|-----------|-----|-----|----|-----|
| Etanol | 71% | 62% | 88 | 580 |
| Isooctano | 68% | 60% | 88 | 630 |
| 2-Pentano | 67% | 58% | 88 | 670 |

- **Técnicas de processamento:** A reforma primária é a responsável por receber o combustível líquido e converte-lo em um gás reformado que contenha grande quantidade de hidrogênio que ainda conterá algumas quantidades de impurezas indesejadas. Depois da reforma primária um ou mais estágios de limpeza são empregados reduzindo a concentração de impurezas.

. A reforma por oxidação parcial combina o combustível com quantidades sub-estequiométricas de oxigênio para produzir hidrogênio e monóxido de carbono. A reação de oxidação inicial ($C_nH_mO_p + O_2 \rightarrow CO_2 + CO + H_2O$) resulta em geração de calor e altas temperaturas. O calor gerado pela oxidação é então utilizado para a reforma do vapor do combustível restante.

A reforma autotérmica combina o combustível com o ar e o vapor, de modo que o calor exotérmico da reação de oxidação parcial seja balanceado pelo calor endotérmico da reação de reforma de vapor num sistema adiabático que produz uma concentração muito maior de hidrogênio do que a oxidação parcial, porém menos concentrado do que na reforma de vapor puro

- **Processo de limpeza:** A reação de deslocamento água (também chamada de metanização seletiva pois é o inverso da reforma do metano). A oxidação catalítica seletiva é uma técnica promissora para reduzir a concentração do CO, no gás reformado, a mais ou menos 10 ppm. O problema principal deste método é que a oxidação do hidrogênio compete com a oxidação do CO e também a diluição do gás reformado pelo nitrogênio e assim conduzir a uma perda da eficiência do sistema.

A gasolina utilizada hoje em dia contém porções de enxofre de 30-300 ppm, um veneno para as células a combustível. O método mais comum para a dessulfurização é pelo uso de ZnO, o oxido é convertido em sulfido de zinco. O dessulfurizador reduz o teor de enxofre na gasolina de 30-100 ppm a menos de 3 ppm.

- **Sistema de reforma de combustível:** Ao descrever o sistema de reforma de combustível é conveniente dividir o sistema em um número de módulos funcionais de interação, onde o desempenho total do sistema é dependente da compatibilidade e do desempenho dos módulos individuais. Os módulos principais do sistema, além do módulo da célula combustível, são:

a) processador do combustível; b) limpador; c) módulo de ar.

4. Sistema de propulsão

Veículos a células a combustível poder ser classificados como veículos a células a combustível elétricos e veículos a células a combustível híbridos. Veículos a células a combustível elétricos utilizam as células a combustível como única fonte de potência sem o uso de bateria. Como as baterias em veículos elétricos, as células a combustível fornecem eletricidade para o trem de força do veículo. O trem de força geralmente consiste em um inversor para converter a potência das células a combustível em AC, voltagem variável e frequência variável, um motor de tração AC e uma transmissão para transmitir a força do motor para as rodas.

a) Veículos a células a combustível híbridos possuem uma bateria ou ultracapacitor em paralelo com o sistema de células a combustível. A operação da célula combustível híbrida permite o uso o mais eficiente da densidade da energia inerente elevada das células a combustível e da densidade de potência elevada da bateria. Quando a demanda de potência é elevada, como durante um aceleração, as baterias fornecerão o poder requerido.

Quando a demanda de potência é baixa, como em cruzeiro, as células a combustível fornecem o poder requerido. As baterias são recarregadas durante os períodos de baixa operação de potência. Assim, dependendo das exigências de potência e de energia, as células a combustível poderiam ser projetadas para fornecer a potência de cruzeiro e a bateria poderia ser projetada para fornecer a potência de pico. A seleção do conjunto de baterias depende também de fatores tais como o custo e o desempenho das células a combustível e da bateria, a tecnologia da bateria, e o ciclo de operação. O uso da bateria permite uma partida rápida das células a combustível e protege-as contra a reversão da célula durante esta operação. Além disso a bateria fornece a potência de pico, a energia de regeneração pode ser capturada, e o tempo de resposta do sistema do veículo para mudanças de carga será mais rápido com a bateria. Um híbrido de células a combustível oferece bom desempenho, longa autonomia, reabastecimento rápido, e vida útil longa.

O motor determina as características do sistema de propulsão e do controlador, e determina também as posições do conversor em relação à manipulação da potência. Os tipos de motores considerados para aplicações num veículo a células a combustível são:

- a) Motor de Indução Trifásico;
- b) Motor Síncrono de Ímãs Permanentes;
- c) Motor de Relutância Chaveada.

O sistema eletrônico de potência consiste num conversor de DC/DC, no inversor de potência e nos conversores que fornecem as cargas aos acessórios. A topologia do conversor de potência com sua estratégia de chaveamento e a malha fechada do sistema de controle do motor é importante para a otimização da eficiência e estabilidade do sistema.

Para aplicações em motores AC, uma topologia de ponte inversora trifásica é geralmente usada.

- a) Inversor PWM (do inglês “Pulse Width Modulation”, Modulação por Largura de Pulsos) de chaveamento forçado;
- b) Inversor PWM suavemente chaveado:
 - Inversor ressonante DC ligado em série;
 - Inversor ressonante ligado em paralelo;
 - Inversor de pólo comutado ressonante auxiliar.

Os veículos típicos desperdiçam cerca de 30% da energia andando em ciclo urbano, veículos elétricos têm a vantagem de poder usar a frenagem regenerativa, e assim de recuperar alguma energia. Quando o motorista pisa no pedal do freio o motor age como um gerador usando a energia cinética do veículo para gerar eletricidade, que pode ser armazenada em bateria para o uso futuro.

4.1 Monitoramento e controle

O objetivo principal do controlador do trem de força é maximizar a eficiência do veículo traçando uma estratégia de controle que envolva as células a combustível, a bateria (no caso de um veículo híbrido) e o desempenho requerido.

Protótipos

Alguns exemplos de protótipos desenvolvidos pelas montadoras.

Ford Focus FCEV Hybrid

| | |
|-------------------|----------------------------|
| Modelo do motor | Motor Ecostar AC trifásico |
| Potência máxima | 65 kW / 88 hp |
| Torque máximo | 230 Nm |
| Eficiência máxima | 91 % |

| | |
|--|---------------------------------------|
| Transmissão | Planetóide única velocidade integrada |
| Gerenciamento do motor/Módulo inversor de tração | |
| Modelo | Corrente direta de três fases |

| | |
|-----------------------|-------------------|
| Corrente máxima | 330 A |
| Min. /max. / voltagem | 250 / 420 / 315 V |

| | |
|---------|-------|
| nominal | |
| Peso | 16 kg |

DaimlerChrysler F-Cell

Além dos protótipos NECAR e NEBUS também foi desenvolvido o modelo F-Cell cujo a foto que em corte pode se ver com o sistema de células a combustível embaixo do assoalho e dados técnicos estão a seguir.

| | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------|
| Sistema de células a combustível | Saída máxima | 68.5 kW |
| | Número de células | 440 |
| Motor elétrico | Tipo | Motor de Indução |
| | Saída máxima | 65 kW |
| | Torque máximo | 210 Nm |
| | Rotação máxima | 13,000 rpm |

| | | |
|-------------|-------------------------|---|
| Combustível | Tipo | Hidrogênio Comprimido (350bar) |
| | Consumo | 3.8 - 4.2 L/100km (23.8 - 26.3km/L) Diesel Equivalente 150 km |
| Desempenho | Autonomia | 150 Km |
| | Velocidade Máxima | 140 km/h (Limitada Eletronicamente) |
| Baterias | Tipo | NiMH |
| | Saída (Permanente/Pico) | 15 / 20 kW |
| | Capacidade | 6.5 Ah, 1.4 kW |

General Motors

O HydroGen1 é um protótipo, criado em 2000 baseado no Opel Zafira, foi o primeiro veículo movido a energia elétrica a partir de uma unidade de pilha a combustível alimentada a hidrogênio puro.



GM/Opel HydroGen3 com armazenamento de hidrogênio líquido (a direita) e comprimido (a esquerda).

A pilha - um bloco de 200 células a combustível ligadas em série - gerou 80 kW de potência constante e, com a ajuda do motor elétrico assíncrono trifásico de 55 kW/75 cv, conseguiu acelerar o automóvel dos 0 aos 100 km/h em cerca de 16 segundos, atingindo uma velocidade máxima de 140 km/h. Em 2000 também foi lançado o protótipo Precept, híbrido, com hidrogênio armazenado em hidretos metálicos que atingia uma velocidade máxima de 196 km/h.

Honda

O programa FCX da Honda progrediu através de quatro protótipos do V1 até o V4 antes do último modelo FCX lançado em 2002. Todos com exceção do V2, que emprega a reforma do metanol, armazenam o hidrogênio gasoso comprimido. O V2 foi equipado com células a combustível desenvolvidas pela própria Honda, o V3 com células da Honda e da Ballard. A Honda denomina seu sistema de propulsão como um “ sistema assistido por capacitor” pois emprega um bloco de

ultracapacitores para agregar a saída da pilha de combustível para as arrancadas e acelerações e armazenando energia elétrica nas acelerações e frenagens.

A Honda também está investindo em infra-estrutura de reabastecimento. Existem projetos de produção de hidrogênio através da energia solar e projetos de postos de reabastecimentos que já estão funcionando na Califórnia.



5. Conclusão

A tecnologia de células a combustível poderá se desenvolver no mundo de maneiras diferentes de acordo com a realidade econômica, climática e estrutural de cada região. De todos os métodos avaliados o que mais se aproxima da nossa realidade é o uso de álcoois como fonte de hidrogênio devido a sua facilidade de processamento em relação aos hidrocarbonetos e sua facilidade e segurança de armazenamento em relação ao hidrogênio puro. Também se deve levar em conta que o Brasil tem uma posição privilegiada por ser um grande produtor de álcool (Etanol). Esta tecnologia, porém, ainda carece de desenvolvimento para torná-la mais eficiente e economicamente viável. A grande vantagem é que as especificações e peculiaridades técnicas de desenvolvimento de componentes e sistemas, tendo em vista a produção em volume, é possível aplicar o mesmo conceito de montagem dos motores convencionais de combustão. Em resultado disso poderá se criar as condições necessárias para que, no futuro, possa se integrar veículos com células a combustível numa linha de produção mista.

A principal questão é que, realmente, as técnicas atuais já garantem a viabilidade das células a combustível, não poluentes e que deve ser comparada com as formas tradicionais de geração de energia como as máquinas térmicas.

6. Bibliografia

- 1 AHMED, S.; KRUMPELT, M.; KUMAR, R.; LEE, S. H. D.; CARTER, J. D.; WILKENHOENER, R.; MARSHALL, C. **Catalytic Partial Oxidation Reforming of Hydrocarbon Fuels**. Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, 1998.
- 2 AHMED, S.; KUMAR, R.; KUMPLERT, M. **Fuel Processing for Fuel Cell Power Systems**. Fuel Cells Bulletin, n. 12, september 1999.
- 3 CARRETTE, L.; FRIEDRICH, K. A.; STIMMING, U. **Fuel Cells-Fundamentals and Applications**, FUEL CELLS, v. 1, n. 1, 2001.
- 4 **Células de Combustível**. Disponível em: <<http://educar.sc.usp.br/quimapoio/cell.html>>.
- 5 ELETROCELL. Disponível em: <www.electrocell.com.br/oque.htm>.
- 6 FRANCO, E. G.; LINARDI, M.; COLOSIO, M. A.; BRARBOZA, J. **Fuel Cells and Ethanol: a technological Advantage**. SAE Technical Paper Series, 2003-01-3623.
- 7 **Fuel Cell Vehicles** (From Auto Manufacturers). Disponível em:

<<http://www.fuelcells.org/info/charts/carchart.pdf>>.

- 8 **Hidrogênio: Propriedades.** Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/teaching/info/e001.html>>.
- 9 JOST, K. Fuel-Cell Concepts and technology. **Automotive Engineer International Magazine**, March 2000.
- 10 LINDSTRÖM, B. **Development of a Methanol Reformer for Fuel Cell Vehicles.** KTH-Kungliga Tekniska Högskolan, Department of Chemical Engineering and Technology. Stockholm, 2003.
- 11 **Mark 902 fuel cell module.** Disponível em: < http://www.ballard.com/pdfs/Mark_902.pdf >
- 12 THOMAS, S.; ZALBOWITZ, M. **Fuel Cells - Green Power:** Los Alamos National Laboratory
- 13 **Tipos de Células de Combustível (Fuel Cells 2000).** Disponível em:
<[http://www.worldwide.fuelcells.org /po_base.cgim?template=po_fctypes#alkaline](http://www.worldwide.fuelcells.org/po_base.cgim?template=po_fctypes#alkaline)>.
- 14 U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Fuel Cell Handbook** (Sixth Edition). EG&G Technical Services, Inc. Science Applications International Corporation, 2002.

FUEL CELLS VEHICLES UTILIZATION

Key-words: fuel, cells, projects, hydrogen

ABSTRACT

This contribution details instructions for the design, construction and utilization of fuel cell vehicles. The reason of this paper is the economy due to hydrogen use. This economy concerns energy system containers, distribution and economic utilization of hydrogen fuel. Nowadays the energetic matrix is based mainly on fossil fuel, the petroleum. A great change in this field is required for two basics important reasons: the environmental questions and the energetic efficiency. In the ambient aspect, the hydrogen is one of the cleanest option and the unique fuel to substitute the electricity, as far as pollution is concerned.