

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS / UNIS-MG

ENGENHARIA MECÂNICA

ANTÔNIO VITAL LARA JÚNIOR

HIDROGÊNIO EM UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

**Varginha - MG
2011**

FEPESMIG

ANTÔNIO VITAL LARA JÚNIOR

HIDROGÊNIO EM UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob orientação do Prof. Esp. Alexandre de Oliveira Lopes.

**Varginha - MG
2011**

FEPESMIG

ANTÔNIO VITAL LARA JÚNIOR

HIDROGÊNIO EM UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em 03/12/11


Prof. Ms Alexandre de Oliveira Lopes



Prof. Ms Luiz Carlos Vieira Guedes

OBS.:

Dedico este trabalho à minha família, minha namorada e aos meus colegas do curso, no qual passamos juntos todos esses anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para vencer esta etapa em minha vida, e também à minha família, minha namorada, meus companheiros de trabalho, colegas e professores, pelo apoio e motivação.

“Escolhe um trabalho de que gostes, e não
terás que trabalhar nem um dia na tua vida”

Confúcio

RESUMO

Este trabalho objetiva-se a apresentar os principais conceitos sobre a tecnologia que promete revolucionar o grupo de energias que são utilizadas atualmente no mundo, principalmente o setor de energia elétrica. Esta tecnologia é a célula a combustível, cujo estudo se dará, de forma básica, sobre o seu funcionamento, os principais tipos de células (PEMFC, DMFC, SOFC, MCFC, PAFC, AFC, DEFC), as aplicações e particularidades. Contudo, não se pode falar de células a combustível sem citar o elemento que será a base de toda esta revolução, o hidrogênio, sobre o qual serão abordadas as principais características, propriedades e formas de produção.

Palavras chave: Célula a combustível, hidrogênio, energia, tecnologia.

ABSTRACT

This work is intended to present the main concepts about the technology that promises to revolutionize the group of energies that are currently used in the world, mainly the electric energy sector. This technology is the fuel cell, whose study will be, basically, about its operation, the main types of cells (PEMFC, DMFC, SOFC, MCFC, PAFC, AFC, DEFC), the applications and particularities. However, we cannot speak about fuel cells without mentioning the element that will be the base of all this revolution, the hydrogen, in which it will be discussed the main features, properties and forms of production.

Key words: *Fuel cell, hydrogen, energy, technology.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Matriz energética mundial e do Brasil	11
Figura 02: Painel fotovoltaico da Estação Espacial Internacional	14
Figura 03: Matriz de energia elétrica brasileira - 2010	15
Figura 04: Modelo esquemático da eletrólise.....	21
Figura 05: Cilindros de hidrogênio em um automóvel.....	23
Figura 06: Hidreto metálico.....	25
Figura 07: Célula a combustível de 100 W	26
Figura 08: Esquema de funcionamento de uma célula a combustível.....	27
Figura 09: Primeiro ônibus brasileiro movido a hidrogênio.....	32
Figura 10: AUTONomy da GM	33
Figura 11: Laptop da Fujitsu com célula a combustível.....	33

SUMÁRIO

1 INTRUDUÇÃO.....	10
2 A UTILIZAÇÃO DA ENERGIA NO BRASIL E NO MUNDO	11
2.1 Fontes de energia não renováveis.....	11
2.2 Fontes de energia renováveis.....	13
2.3 Matriz de energia elétrica brasileira.....	15
3 FORMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	15
3.1 A geração centralizada	16
3.2 A geração distribuída	16
4 A O HIDROGÊNIO.....	17
5 A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	20
5.1 A eletrólise	20
5.2 Os biocombustíveis	22
6 ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO.....	22
7 AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	25
7.1 Funcionamento de uma célula a combustível.....	27
7.2 Tipos de células a combustível.....	28
7.3 Aplicações	31
8 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

No século XVIII, a Inglaterra tornou-se uma grande potência através do uso do carvão como fonte de energia, o que deu impulso à Primeira Revolução Industrial. Mais tarde, no século XX, os EUA viriam a se tornar a maior potência mundial até os dias atuais, desta vez explorando a energia contida no petróleo, descoberto no final do século XIX. Sendo assim, estes países se tornaram grandes potências porque souberam utilizar suas fontes energéticas.

Porém, essas fontes causaram e ainda causam grande poluição no meio ambiente, e ainda, a natureza impõe limites quanto à utilização de seus recursos. Então, diante deste cenário, o mundo percebeu a necessidade da busca de fontes alternativas de energia, surgindo assim uma nova fase neste setor, como ocorreu com o carvão e o petróleo. Mas agora, preocupados com o planeta, buscam fontes de energia que sejam mais limpas e se possível, renováveis.

Ainda não foi descoberta nenhuma nova fonte abundante de energia no planeta como ocorreu no passado, contudo as pesquisas estão voltadas para as melhorias tecnológicas na utilização das fontes energéticas. Sendo assim, nessa nova fase haverá diversas fontes principais de energia, a maioria renovável e equipamentos para sua geração. A energia será gerada próxima ao local de consumo ao invés da produção acontecer em grandes centrais, eliminando assim os custos referentes à transmissão.

Diante desta fase de busca por novas fontes energéticas, o hidrogênio aparece como uma forte tendência, pois é a fonte de energia mais abundante do universo e uma forma limpa de energia quando obtido por fontes renováveis. E em parceria com o hidrogênio está a célula a combustível (CaC), uma tecnologia capaz de gerar energia elétrica e térmica com alta eficiência, silenciosamente, emitindo apenas vapor de água na atmosfera quando utiliza hidrogênio como combustível. Juntos, hidrogênio e célula a combustível prometem uma nova revolução, iniciando assim uma nova fase de energias, a era do hidrogênio.

2 A UTILIZAÇÃO DA ENERGIA NO BRASIL E NO MUNDO

São várias as fontes de energia utilizadas hoje no mundo, podendo-se destacar o petróleo, a biomassa, a hidráulica, o gás natural, o carvão mineral e a nuclear. Dentre elas o petróleo é fonte de energia que ocupa a maior parcela, tanto no Brasil quanto mundialmente. Porém o petróleo é uma fonte de energia não renovável e a sua utilização na extração da energia gera agentes poluidores ao meio ambiente.

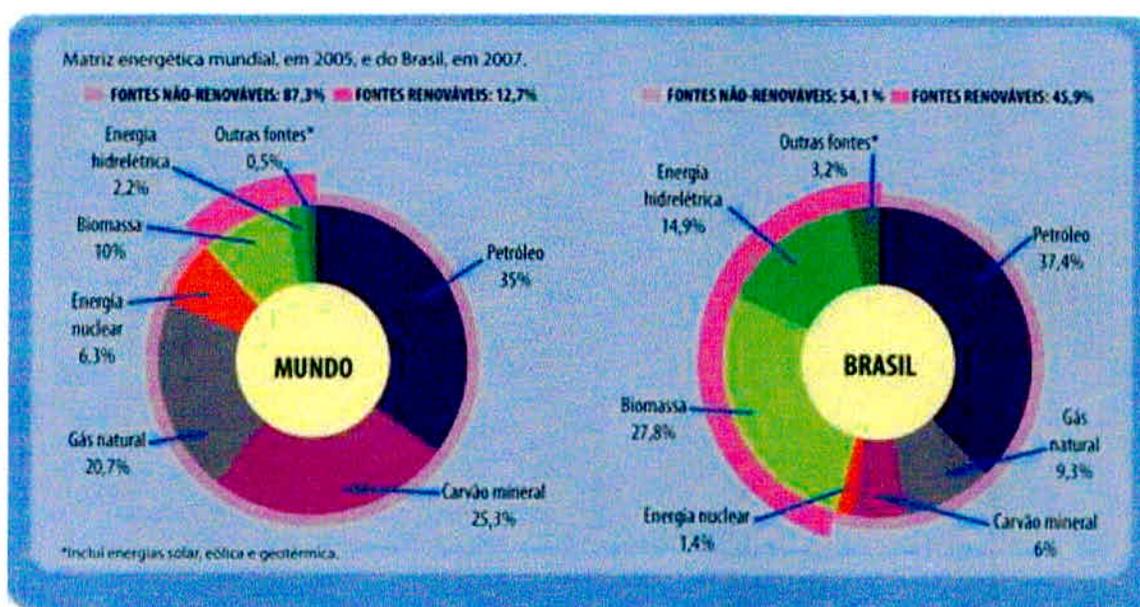


Figura 1 – Matriz energética mundial e do Brasil
Fonte: Série sobre energia – Revista Escola Abril

Pode-se observar que uma grande parcela da matriz energética do Brasil, cerca de 45,9%, provém de fontes renováveis, uma vantagem com relação à média mundial que é de apenas 12,7%. Isso mostra que o Brasil apresenta um grande potencial para o futuro com relação à utilização de energias renováveis em busca de um desenvolvimento sustentável.

2.1 Fontes de energia não renováveis

- a) **Petróleo:** é a principal fonte de energia no mundo hoje, principalmente para o setor de transportes. Participa com cerca de 35% na utilização de energia mundial. No Brasil a

sua participação é de 37,4% ocupando também a maior parcela. É processado através de refinarias de onde se extraem os seus subprodutos para serem utilizados na indústria ou pela população, como por exemplo no abastecimento de automóveis com a gasolina.

Porem esta fonte de energia é limitada, estima-se que a reserva mundial de petróleo deverá se esgotar por volta de 2050 e no Brasil a reserva deverá durar até 2025 (GOMES NETO, 2005);

- b) **Carvão Mineral:** é uma fonte abundante de energia. Foi o responsável pelo impulsionamento da Primeira Revolução Industrial e é até hoje muito utilizado como fonte energética, representando cerca de 25,3% da matriz energética mundial só perdendo para o petróleo. Contudo, o carvão mineral, semelhante ao petróleo, é também muito poluente. No Brasil o uso do carvão mineral gira em torno de 6%, é o maior recurso fóssil do país, mas o carvão brasileiro além de ser grande poluente, tem um baixo valor energético;
- c) **Gás Natural:** encontrado no subsolo através de jazidas de petróleo, é o resultado da degradação da matéria orgânica e uma das fontes de maior quantidade de hidrogênio. A utilização do gás natural mundialmente é cerca de 20,7% sendo que no Brasil o uso do gás natural em 2007 era de 9,3%, mas este número vem aumentando devido aos investimentos realizados principalmente pela Petrobrás;
- d) **Energia Nuclear:** é uma forma muito eficiente de se gerar energia, pois com pouco combustível consegue-se obter uma grande capacidade energética de forma limpa, emitindo apenas vapor de água. Mas o problema desta fonte de energia está no armazenamento dos resíduos atômicos, que deve ser em locais especiais e por vários séculos, e também no risco de se ocorrer um acidente nuclear levando à contaminação de uma grande área ao redor da usina, podendo ocorrer a morte de centenas de pessoas. Mundialmente o uso da energia nuclear é cerca de 6,3% e no Brasil essa parcela corresponde à 1,4%;

2.2 Fontes de energia renováveis

- a) **Biomassa:** é fonte energética constituída por elementos orgânicos como os resíduos agrícolas, a lenha, o carvão vegetal, a cana de açúcar e o milho. As formas de se extrair a energia da biomassa são diversas, podendo ser através da queima direta utilizando o calor numa caldeira, também pode-se usar o gás metano (CH_4) formado pela fermentação da biomassa ou pela transformação desta em álcool etílico ou biodiesel. Mundialmente a biomassa participa com cerca de 10% da matriz energética, enquanto que para o Brasil a biomassa representa uma parcela bem mais significativa, cerca de 27,8%, quase três vezes mais que a média mundial.
- b) **Hidrelétrica:** No uso desta fonte de energia o Brasil apresenta grande vantagem com relação a muitos países, porque possui uma extensa malha hidrográfica. Enquanto que no mundo a utilização desta fonte gira em torno de 2,2%, no Brasil o uso das hidrelétricas é cerca de 14,9%, mais de seis vezes a média mundial.

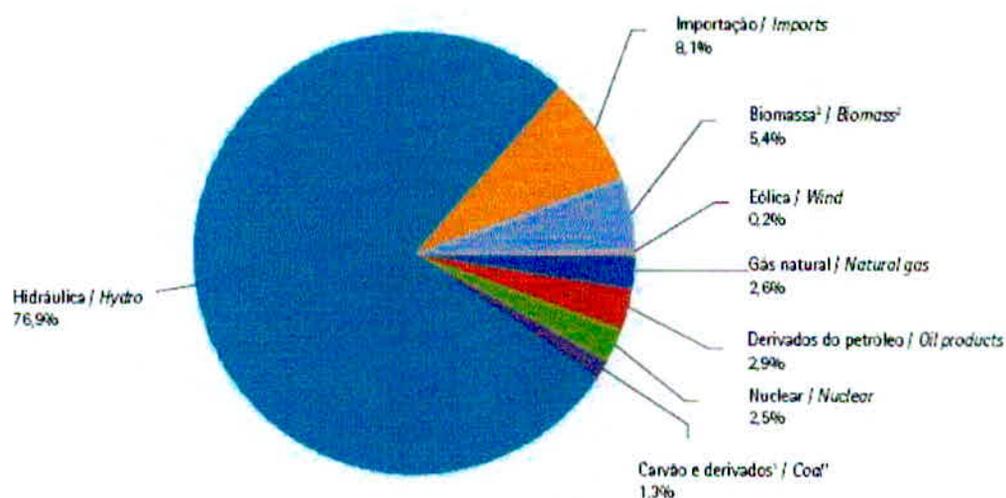
Este número favorece muito o Brasil, pois no futuro as hidrelétricas poderão também produzir hidrogênio para o uso em células a combustível.

Há também outras fontes de energia renováveis que ocupam hoje uma pequena parcela na matriz energética. No entanto, estudos estão sendo realizados sobre estas fontes energéticas, o que leva há uma grande tendência de que no futuro sejam muito utilizadas. São elas:

- c) **Eólica:** é a energia originada do deslocamento das massas de ar resultante da diferença de pressão e temperatura entre duas regiões. A captação da energia cinética dos ventos é realizada, por exemplo, através dos chamados moinhos de vento que podem transformar esta energia em mecânica ou elétrica.
- d) **Geotérmica:** é a utilização da energia térmica contida no interior da Terra. Esta energia é transmitida até à superfície através da condução. É classificada em: **alta temperatura (acima de 150°C)** relacionada à áreas de atividades vulcânicas, sísmicas ou magmáticas, podendo-se usar esta energia para o aquecimento de água e geração de vapor; Há também áreas onde existe água contida em rochas porosas em grande

2.3 Matriz de energia elétrica brasileira

A seguir é demonstrado como é o cenário brasileiro quanto à utilização das fontes energéticas para a geração de energia elétrica.



Notas/ Notes:

¹ Inclui gás de coqueria / Includes coke gas.

² Biomassa inclui lenha, bagaço de cana, licores e outras recuperações / Biomass includes firewood, sugar cane bagasse, black liquor e other wastes.

Figura 3 – Matriz de energia elétrica brasileira - 2010.

Fonte: Balanço Energético Nacional 2010

Nota-se que a predominância na geração de energia elétrica no Brasil é de origem renovável, cerca de 90%, somando-se as parcelas de hidráulica que participa com 76,9%, a biomassa e também as importações, que segundo dados do BEN 2010 são essencialmente de origem renovável. Esses números são outra vantagem do Brasil com relação ao mundo, onde a geração de energia elétrica se concentra em fontes não renováveis como o carvão mineral, gás natural, nuclear e petróleo.

3 FORMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A forma como geramos a energia hoje também é um assunto que merece um enfoque especial. Hoje temos predominante no mundo o sistema de geração centralizada, que apesar

de ser muito utilizado, apresenta também algumas desvantagens, como os custos para a transmissão da energia. Por isso, estudos estão sendo dirigidos para uma outra alternativa, a geração distribuída, que deve ser uma tendência nos próximos anos.

As duas formas de geração apresentam características diferentes, vantagens e também suas desvantagens, sendo assim apresentadas de forma individual.

3.1 A geração centralizada

Esta é a forma de geração de energia predominantemente usada nas últimas décadas, caracterizada pelas grandes centrais produtoras de energia elétrica e os sistemas de linhas de transmissão.

A energia elétrica é produzida nessas grandes centrais, como por exemplo uma hidrelétrica ou termoelétrica. Contudo, as centrais elétricas geralmente estão longe dos centros urbanos, os quais consomem parte considerável desta energia. Sendo assim, são utilizadas as linhas de transmissão para que a energia elétrica chegue às indústrias, hospitais e residências destes centros urbanos e demais localidades. Mas a desvantagem deste sistema é que nas linhas de transmissão há perdas de energia por calor, risco de rompimento dos cabos, queda de torres e também a falta de água no reservatório das hidrelétricas, comprometendo assim o fornecimento da energia.

Especialistas afirmam que se gasta um determinado valor para produzir uma certa quantidade de energia, e um valor semelhante para transportá-la até o consumidor final (GOMES NETO, 2005).

3.2 A geração distribuída

Diante deste cenário atual, onde se predomina a geração centralizada, ações estão sendo realizadas em todo o mundo para tornar as formas de geração e uso da energia mais eficientes. Uma dessas formas é a geração da energia próxima ou no próprio local de consumo, chamada de geração distribuída. No futuro, locais como shoppings, indústrias e as próprias residências poderão gerar a energia para o seu próprio consumo, esta é uma tendência

nos próximos anos, principalmente com o uso da tecnologia das células a combustível.

Contudo, as grandes centrais produtoras de energia elétrica são de grande importância para os países, principalmente na economia destes. A geração distribuída ajudará a aliviar a sobrecarga e a dependência nas centrais de produção, podendo ser utilizada durante blecautes, horários de pico ou até mesmo na substituição do fornecimento de energia pela rede elétrica, como já acontece em algumas indústrias, hospitais e comunidades.

Uma vantagem da geração distribuída é o tempo para a construção das pequenas usinas, ao contrário das grandes centrais que levam anos para serem construídas, e também a facilidade na obtenção do licenciamento ambiental e financiamentos.

Equipamentos como turbinas, células fotovoltaicas, geradores a diesel, células a combustível, também as pequenas hidrelétricas e os sistemas de energia eólica serão formas de geração de energia próximas ou no local de consumo. Dentre estes, a célula a combustível apresenta forte tendência, pois em conjunto com o hidrogênio, ela é uma forma de se gerar energia de maneira eficiente, silenciosa e não poluente. Nos próximos anos as residências poderão ter pequenas estações de células a combustível gerando energia elétrica necessária para o próprio consumo. É a era do hidrogênio.

4 O HIDROGÊNIO

O hidrogênio (do grego (*hydro*) água, e (*genes*), gerar) é o mais abundante entre os elementos químicos. Constitui aproximadamente 75% da massa do universo, e compõe aproximadamente 70% da superfície terrestre. No seu estado natural apresenta-se na forma molecular e diatômica (H_2) como um gás, nas condições normais de temperatura e pressão. Este gás é incolor, inodoro, insípido, inflamável, não metálico, insolúvel em água e menos denso que o ar. Para o que seja obtido o seu estado líquido a sua temperatura deve estar a aproximadamente $-253^\circ C$ ocupando assim um volume 700 vezes menor do que em forma de gás. Em temperaturas maiores somente se apresentará no estado gasoso mas podendo ser armazenado em cilindros de alta pressão em forma de gás comprimido.

É um elemento muito ativo quimicamente, sendo assim, é raramente encontrado na forma única de gás (H_2). Estará sempre associado a outros compostos como petróleo, carvão, gás natural, proteínas, dentre outros. Também está presente na água, elemento que compõe $\frac{3}{4}$ da superfície do planeta Terra, combinando com o oxigênio e formando a molécula de H_2O .

Na tabela periódica, seu símbolo é H, possui número atômico 1 e é colocado no grupo 1 (ou família 1A) porque possui apenas 1 próton, mas não se enquadra claramente em nenhum grupo.

Informações gerais do hidrogênio		
Símbolo químico	H ₂	
Massa atômica	1,00794(7) u	
Configuração eletrônica	1s ¹	
Estado da matéria na CNTP	Gasoso	
Ponto de fusão	-258,98 °C	
Ponto de ebulição	-252,73 °C	
Temperatura de auto ignição	584 °C	
Volume molar	11,42 x 10 ⁻⁶ m ³ /mol	
Densidade (0°C e 1 atm)	0,0899 kg/m ³	
Menor valor calorífico (H₂ líquido)	33,33 kWh/kg	119,99 MJ/kg
Maior valor calorífico (H₂ líquido)	39,41 kWh/kg	141,86 MJ/kg
Limite de inflamabilidade no ar	Inflamável entre as concentrações: 4,0% a 75% de H ₂ por volume.	

Quadro 1: Informações sobre o hidrogênio.

Fonte: Adaptação - Hidrogênio, Evoluir sem Poluir

O gás hidrogênio é inflamável, quando queimado com oxigênio puro tem-se como subprodutos somente calor e água. Quando queimado com ar formam-se também alguns óxidos de nitrogênio, pois o ar possui uma composição de 68% de nitrogênio e 21% de oxigênio, e mesmo assim essa queima é menos poluente do que a queima de combustíveis fósseis como o carvão e o petróleo.

Por possuir um baixo peso, capacidade de compactação e de grande armazenamento de energia, características que não são encontradas em outros combustíveis, o hidrogênio é utilizado pela NASA em seus projetos espaciais para a propulsão dos foguetes, e quando usado para geração de energia elétrica em células a combustível a água que resulta do processo é consumida pelos astronautas. No mundo, o hidrogênio produzido é utilizado, em grande parte, na fabricação de fertilizantes, na conversão de óleo líquido em margarina, na fabricação de plásticos e no resfriamento de máquinas como geradores e motores. Mas atualmente o mundo tem estudado o hidrogênio como uma grande fonte de energia e pesquisas estão sendo realizadas para o seu uso na geração de energia elétrica, térmica e de água pura através das células a combustível.

Segundo algumas teorias estabelecidas pela física, o hidrogênio teria se originado no

início da formação do Universo, 15 bilhões de anos atrás, através de uma grande explosão, o Big Bang. Após a explosão, em uma temperatura muito quente, partículas moviam-se em todas as direções e algumas se chocavam produzindo outras partículas. Posteriormente o Universo foi esfriando e foi nesse meio, através de um pequeno excesso de matéria presente, que se formaram as galáxias, as estrelas e os planetas. E assim no início do Universo, através de partículas de quarks, formou-se um núcleo simples composto de apenas um próton, o núcleo do Hidrogênio que minutos depois já estava presente em mais de três quartos de toda a matéria e serviu de base para a composição química de todo o Universo. Depois de 300.000 anos aproximadamente, a temperatura ficou fria e os elétrons presente no espaço combinaram com o núcleo e formaram átomos estáveis, esses átomos se combinaram e formaram as moléculas, como a de água (H₂O).

Por ser um gás inflamável, o hidrogênio é perigoso e precisa ser manuseado com segurança. Sendo assim o local de manuseio ou armazenamento precisa ser ventilado pois o hidrogênio é muito explosivo em espaços confinados. Porém, com relação a outros combustíveis, ele é mais seguro em muitas situações. O hidrogênio ainda apresenta várias vantagens, assim descritas:

- **Alto coeficiente de difusão;** Se dispersa rapidamente no ar, raramente ocorrendo a sua explosão ao ar livre. A sua queima é mais rápida que a da gasolina ou a do GLP, que acumulam no chão, o que não ocorre com o hidrogênio;
- **Não entra em detonação ao ar livre;**
- **Não é tóxico** (mas pode ser asfíxiante se consumir todo o oxigênio de um ambiente fechado);
- **Não é radioativo;**
- **Não é corrosivo;**
- **Não apresenta risco ambiental se ocorrer vazamento durante o seu transporte,** ao contrário do caso de vazamento de óleo em navios petroleiros;
- **Não é cancerígeno;**
- **Não entra em auto-ignição em temperatura ambiente;**
- **No caso de ignição ao ar livre, geralmente queima antes de atingir o valor limite para ocorrer a explosão.**
- **Não produz produtos perigosos de decomposição.**

Os cilindros de armazenamento de hidrogênio são muitos resistentes, projetados para

suportarem até 3 vezes a pressão de trabalho. E mesmo no caso de impactos, em uma situação de acidente com um veículo, os cilindros utilizados são muito resistentes.

5 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

A produção de hidrogênio é aproximadamente de 500 bilhões de metros cúbicos por ano, em pressão ambiente (GOMES NETO, 2005). Porém a sua utilização não é para a produção de energia elétrica, mas para a fabricação de produtos químicos como plásticos e amônia; resfriamento de máquinas e na indústria eletrônica. E a maior parte do hidrogênio produzido hoje é a partir de fontes de energia convencionais e poluentes como: gás de carvão gaseificado; gás natural; reforma de petróleo.

Para que se torne uma fonte de energia sustentável, a produção de hidrogênio deve acontecer a partir de fontes renováveis como a gaseificação da biomassa ou eletrólise, sendo esta última um método que poderá ser muito utilizado por países como Brasil e Canadá pelo fato de serem grandes produtores de energia elétrica a partir de hidrelétricas. A eletrólise também pode ser realizada através de outras fontes renováveis como a energia eólica ou solar. O Brasil poderá também produzir hidrogênio utilizando o álcool da cana-de-açúcar, o biodiesel a partir da soja, girassol, entre outras plantas, ou até mesmo produzi-lo através da gaseificação da biomassa e do lixo urbano, obtidos em aterros sanitários e estações de esgoto.

5.1 A eletrólise

A palavra eletrólise eletro (eletricidade) e lisis (decomposição) significa “quebra pela eletricidade”, um processo em que separa os elementos químicos de um composto através do uso da eletricidade. Primeiramente, pode-se realizar a decomposição do composto em íons (ionização), e assim conduzir a passagem de uma corrente elétrica através desses íons, obtendo os elementos químicos. No caso da eletrólise da água (também chamada de hidrólise) ocorre a quebra da molécula de água (H_2O) pela passagem de corrente elétrica através de eletrodos imersos em uma solução iônica (eletrólito), formando assim os gases hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). A eletrólise é o processo contrário ao de uma célula a combustível ou

pilha.

A tensão necessária para quebrar a molécula de água dever ser maior que 1,23 volts, sendo assim utiliza-se geralmente uma tensão de 1,5 volts aplicada entre os eletrodos, imersos no eletrólito, e como resultado tem-se a produção do gás oxigênio no eletrodo positivo (ânodo) e gás hidrogênio no eletrodo negativo (cátodo). Esta tensão necessária para a quebra da molécula de água varia de acordo com a temperatura e pressão.

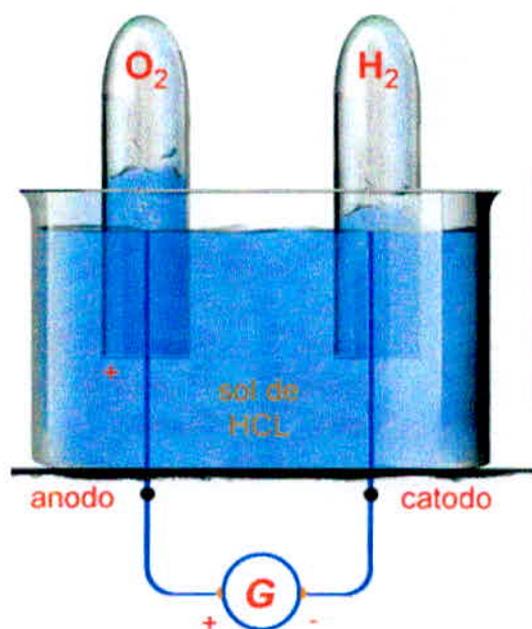


Figura 4 – Modelo esquemático da eletrólise.
Fonte: <http://efisica.if.usp.br>

Atualmente somente 1% da produção mundial de hidrogênio é gerada a partir da eletrólise da água. Isto se deve ao custo da eletricidade, que geralmente equivale a dois terços do custo operacional da produção do hidrogênio. Sendo mais caro que outros métodos e fontes de hidrogênio, como o gás natural. Isto deverá mudar em breve.

Se desejarmos utilizar o hidrogênio como combustível para a geração e armazenamento de energia, temos que produzi-lo em grande quantidade e, se possível, sem emissão de poluentes. A produção de hidrogênio através da eletrólise deveria ser tão barata quanto a sua produção através do gás natural. (GOMES NETO, 2005, p. 115).

A produção de hidrogênio por eletrólise também pode ser realizada através da energia solar, uma fonte abundante, limpa e renovável. A captação é realizada através dos painéis fotovoltaicos que transformam a energia solar em eletricidade, possibilitando assim o uso desta energia elétrica gerada para a realização da eletrólise da água, produzindo o hidrogênio sem emissão de poluentes e gases causadores do efeito estufa, como o CH_4 e CO_2 . Porém, os painéis fotovoltaicos apresentam um elevado custo e baixa eficiência energética, mas os

estudos voltados para esta tecnologia estão fazendo com que a sua eficiência aumente e o seu custo reduza cada vez mais.

Outra forma de se produzir hidrogênio por eletrólise é aproveitando o potencial das hidrelétricas. Estas centrais apresentam potencial para produção deste combustível de forma limpa, sem a emissão de poluentes, além de que se pode aproveitar o excesso de água, durante as estações chuvosas, para a produção de hidrogênio a custos mais baixos. Esta alternativa é de grande interesse para o Brasil, pois possui uma grande malha hidrográfica e produz a maior parte de sua energia elétrica através de hidrelétricas.

5.2 Os biocombustíveis

Esta é a forma de produção do hidrogênio através dos chamados biocombustíveis, obtidos a partir de aterros sanitários, gaseificação da biomassa, álcool da cana-de-açúcar, dentre outros. Nos aterros sanitários a ação de microorganismos no lixo produz um gás que contém boa parte de metano, um composto rico em hidrogênio, que pode ser usado para a produção de energia.

A biomassa por sua vez, uma fonte de energia renovável, pode ser obtida através do bagaço da cana-de-açúcar, bambu, lenha e demais resíduos agrícolas. A gaseificação da biomassa consiste na conversão deste combustível em gases, através da combinação de processos de reações químicas, obtendo assim o biogás, que apesar de ser pobre em metano quando obtido através da biomassa, este gás pode também ser usado para a produção de hidrogênio.

6 ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO

Um dos desafios para o sucesso do hidrogênio e das células a combustível, e principalmente no uso desta tecnologia em veículos, está no armazenamento do hidrogênio que é um combustível na forma de gás em temperatura ambiente. Sendo assim, estudos buscam a otimização dos métodos de armazenamento, fazendo com que se possa armazenar a maior quantidade de energia possível com o mínimo de peso, volume e custo. A necessidade

de se desenvolver métodos que permitam uma maior capacidade de armazenamento do hidrogênio está diretamente ligada com a autonomia de veículos e demais equipamentos, como notebooks e celulares, que possam fazer uso das células a combustível no futuro.

O hidrogênio é um elemento de baixa densidade, constituído de uma molécula muito pequena, podendo assim escapar de tanques de armazenamento mais facilmente que outros combustíveis. Por isso, a segurança é outra questão importante que se deve considerar. O hidrogênio, desde sua produção, transporte e consumo, deve ser armazenado de forma segura, principalmente no uso deste combustível em veículos e em residências para a geração de energia elétrica. Sendo assim, existem sistemas de armazenamento diferenciados e com características diferentes, apresentados a seguir:

- a) **Hidrogênio comprimido:** é o sistema de armazenamento de hidrogênio mais comum, utilizado pelos veículos pioneiros que utilizam células a combustível. Neste método, o hidrogênio é armazenado em forma de gás, utilizando-se cilindros de grandes volumes e para altas pressões. A tendência destes cilindros é que sejam menores e com maior capacidade de armazenamento, com isso a pressão de trabalho aumenta, necessitando assim de cilindros mais resistentes.

Atualmente as pressões mais utilizadas para armazenamento em veículos são de 3600 psi (250 bar) a 500 psi (350 bar) (GOMES NETO, 2005). Contudo, para se obter cilindros mais resistentes, é necessário que se use nestes equipamentos uma quantidade maior de metal, aumentando assim o seu peso. Para isso há cilindros que utilizam outros materiais, como plásticos e fibras de carbono ultra-resistentes, que são bem mais leves que os cilindros de metal.

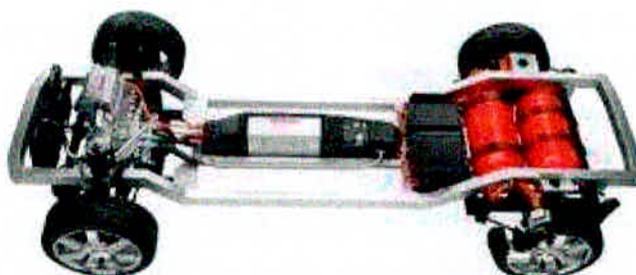


Figura 5 – Cilindros de hidrogênio em um automóvel.
Fonte: <http://planetasustentavel.abril.com.br>

A principal desvantagem deste sistema de armazenamento é o alto consumo de energia para a compressão do gás hidrogênio, quanto maior a pressão, maior é a energia necessária para o processo de compressão. Este é um problema que precisa ser estudado, pois a tendência para os cilindros é que estes trabalhem com maiores pressões para que se armazene uma quantidade maior de energia.

- b) **Hidrogênio líquido:** este sistema consiste no armazenamento de hidrogênio no estado líquido, permitindo assim uma maior quantidade deste combustível em um mesmo volume de tanque e evitando também ter que se trabalhar com altas pressões como no caso do hidrogênio comprimido. Contudo, para se armazenar o hidrogênio na forma líquida é necessário utilizar sistemas criogênicos para que ele esteja a -253°C , o que gera também uma demanda de energia.

Estes sistemas criogênicos são construídos de forma esférica, tendo em volta destes tanques uma parede isolante separada por um espaço com vácuo, evitando assim a troca de calor do tanque com o meio ambiente.

As vantagens do hidrogênio líquido é que ele apresenta uma maior concentração de energia que a gasolina por exemplo; e há uma economia de custos com relação ao seu transporte comparado com o hidrogênio comprimido, pois armazena mais energia para um mesmo volume.

- c) **Armazenamento em “esponjas”:** Este sistema de armazenamento é similar a uma esponja absorvendo água, onde o gás hidrogênio é absorvido por um outro elemento sólido, que pode ser um hidreto metálico, um nanotubo ou nanofibra de carbono, uma microesfera de vidro ou um polímero, Este sistema de armazenamento apresenta a vantagem de ser mais seguro e trabalhar com baixas pressões.

O funcionamento deste sistema em geral consiste em fazer com que o hidrogênio entre em contato com a superfície do material sob alta pressão, como no caso dos hidretos metálicos, ou alta temperatura, no caso das microesferas de vidro. Nessas condições o hidrogênio se infiltra no material e através de uma ligação química forma-se uma mistura sólida. Após este processo o hidrogênio pode ficar armazenado sob baixas pressões e temperaturas e para ser liberado deve-se aquecer a mistura sólida para quebrar as ligações químicas entre o hidrogênio e o material.

A quantidade de armazenamento deste sistema, no caso dos nanotubos de carbono, varia de 5% a 10% de hidrogênio em relação ao peso total, e nas nanofibras

de carbono a capacidade de armazenamento de hidrogênio pode chegar a 70% em relação ao peso total, o que representaria uma grande autonomia para veículos movidos por células a combustível.



Figura 6 – Hidreto metálico.

Fonte: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br>

- d) **Tetraborohidreto de Sódio (NaBH_4):** Este elemento é um sal branco e seco que contém grande quantidade de hidrogênio. O processo consiste em se dissolver este sal em água produzindo assim um combustível líquido, depois com o uso de um catalisador, é produzido o hidrogênio e também um resíduo chamado de “bórax”. No caso de um veículo que usa célula a combustível, a energia do hidrogênio é convertida em energia elétrica e o bórax produzido como resíduo é mantido no veículo até ser removido em um posto de combustível durante o reabastecimento do veículo com o tetraborohidreto. O bórax que foi removido é então reconvertido em NaBH_4 .

A desvantagem deste método é o alto consumo de energia, contudo apresenta a vantagem de se ter maior segurança e facilidade durante o transporte e a possibilidade de se armazenar uma maior quantidade de hidrogênio em um determinado volume se comparado ao hidrogênio comprimido.

7 AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

A célula a combustível é uma tecnologia que usa a combinação química dos gases hidrogênio e oxigênio para gerar energia elétrica, energia térmica e água (GOMES NETO,

2005). A primeira célula a combustível foi desenvolvida em 1839, pelo físico inglês William Grove. Posteriormente ela foi ganhando vida através de estudos e pesquisas de outros cientistas como Ludwig Mond, Charles Langer e Francis Thomas Bacon, este último demonstrou em 1959 um sistema de célula a combustível de 5 kW para fazer funcionar uma máquina de solda. A NASA também utilizou a célula a combustível nos seus projetos Gemini e Apollo, pois precisava de um equipamento que gerasse energia com eficiência, e que utilizasse um combustível leve e com grande densidade e energia, o hidrogênio.



Figura 7 – Célula a combustível de 100 W.
Fonte: <http://www.brasilh2.com.br>

Basicamente uma célula a combustível é composta por duas placas de eletrodos porosos que permitem a passagem dos gases até o centro, onde se encontra o eletrólito. Cobrindo o eletrólito tem-se os catalisadores, que aceleram as reações e quebram as moléculas de hidrogênio.

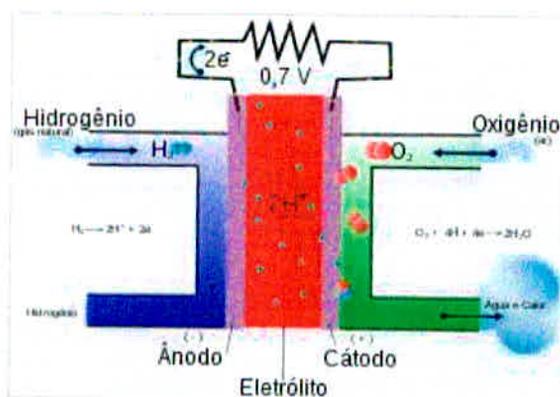
Os eletrodos têm que ser condutores de eletricidade, sendo assim, são fabricados de grafite misturados a resinas ou de metais como o aço inoxidável. O eletrólito pode ser líquido ou sólido, e tem a propriedade de permitir movimento aos prótons (H^+), e como catalisador, são usados, por exemplo, a platina ou níquel.

As células a combustível são uma grande tendência para o futuro e muito em breve estarão no dia-a-dia das pessoas, seja nos automóveis, nas residências ou em equipamentos portáteis, como por exemplo, um notebook.

7.1 Funcionamento de uma célula a combustível

O funcionamento de uma célula a combustível em geral é bem simples, de um lado da célula tem-se a entrada do gás hidrogênio (H_2) que é bombeado para o terminal negativo do eletrodo (ânodo). O gás é forçado a passar por canais de fluxo até atingir o catalisador, que ao entrar em contato com a molécula de hidrogênio, faz com que esta se separe em dois íons de hidrogênio (H^+) e dois elétrons (e^-). Os elétrons liberados passam por um circuito externo até o eletrodo positivo (cátodo), e é através desse fluxo que é extraída a energia elétrica da célula a combustível. No eletrólito, somente os íons de hidrogênio (H^+) atravessam para o outro lado da célula e os gases de hidrogênio (H_2) que não foram quebrados ficam retidos, mas são realimentados até serem quebrados.

No terminal positivo (cátodo) do outro lado da célula, o gás oxigênio (O_2), ou ar, é bombeado e forçado a passar por canais de fluxo até atingir o catalisador, onde a molécula de oxigênio combina-se com os íons H^+ que atravessaram o eletrólito e com os elétrons que passaram pelo circuito externo. Nesta reação forma-se a molécula de água (H_2O) mais uma quantidade de calor sendo então liberado apenas vapor de água pela célula a combustível.



Reação química no ânodo:
 $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$

Reação química no cátodo:
 $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Figura 8 – Esquema de funcionamento de uma célula a combustível.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

A célula a combustível é como um sanduíche. Ela é composta de fatias, sendo que cada fatia tem uma função particular.

Duas destas fatias são os eletrodos. Os eletrodos são porosos para que ocorra a passagem dos gases até a fatia do meio, o eletrólito.

Cobrindo o eletrólito, existe o que chamamos de catalisadores. Esses catalisadores servem para acelerar as reações e quebrar as moléculas de hidrogênio. (GOMES NETO, 2005, p. 94).

7.2 Tipos de células a combustível

Existem pelo menos sete tecnologias principais de células a combustível que variam em tamanho, temperatura, combustível, eletrólito e aplicações. Existem tecnologias que funcionam em temperaturas de 1000°C, interessantes para aplicações industriais, e outras em temperaturas mais baixas, de 60 a 220°C, utilizadas para equipamentos portáteis, automóveis e para geração de energia estacionária. Essas temperaturas são normalmente determinadas pelo tipo de eletrólito utilizado na célula, que varia entre as tecnologias, e cada tipo requer materiais e combustíveis particulares e também uma aplicação direcionada.

A natureza do eletrólito ou o combustível utilizado estão normalmente relacionados com o nome das tecnologias de células a combustível (PEMFC, DMFC, SOFC, MCFC, PAFC, AFC, DEFC), que agora serão descritas basicamente, apresentando suas principais aplicações, particularidades e custos.

- a) **PEMFC** – “*Próton Exchange Membrane Fuel Cell*” – Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons – Esta célula utiliza como eletrólito uma membrana plástica, sólida, que tem a capacidade de transportar cargas positivas quando está úmida. É a tecnologia mais pesquisada no mundo, bastante aplicável para automóveis, equipamentos portáteis como telefones celulares e para geração de energia em residências. Apresenta um rendimento de 35% a 55% e opera entre as temperaturas de 60 a 140°C. Por trabalhar em temperaturas mais baixas o início de funcionamento da célula é mais rápido, mas apresenta a desvantagem de ter que utilizar um excelente catalisador como a platina, um metal nobre, raro e caro, pois em baixa temperatura as reações são mais lentas.

O hidrogênio utilizado na célula PEMFC deve ser de altíssima pureza porque a platina é facilmente contaminada pelo monóxido de carbono e pelo enxofre. No caso do uso de um outro combustível como o gás natural, este deve passar por um reformador, para a obtenção do hidrogênio, e depois por um purificador para eliminação das impurezas.

Para não comprometer o funcionamento desta célula deve-se manter a membrana úmida o suficiente. Para isso são necessários sistemas de controle de temperatura, água e entrada de gases, pois ao trabalhar em temperaturas acima de 90°C a água tende a evaporar, ou se houver na membrana um excesso de água, o

oxigênio não conseguirá entrar em contato com ela.

- b) **DMFC** – “*Direct Methanol Fuel Cell*” – Célula a Combustível de Metanol Direto – O funcionamento desta célula é bastante parecido com a PEMFC. A principal diferença é que ao invés do hidrogênio, esta tecnologia utiliza o metanol (CH_3OH), um tipo de álcool, e no final do processo há a formação de água e dióxido de carbono (CO_2). O metanol ao entrar no ânodo sofre oxidação pela platina liberando os elétrons e os prótons, mas há a formação de monóxido de carbono (CO) que contamina a platina e a membrana. Para que isto não aconteça existem outras substâncias como o rutênio, que converte o monóxido de carbono em dióxido de carbono.

Esta tecnologia é também bastante aplicável para equipamentos portáteis como laptops, celulares e para geração de energia portátil de até 1 a 2 kW. A temperatura de funcionamento é de 50 a 200°C e o rendimento na geração de energia elétrica fica entre 40 a 50%.

O metanol fica diluído em água, em concentrações de até 30% não precisando ser armazenado em altíssimas pressões, e para um mesmo volume, armazena mais hidrogênio em sua estrutura do que o próprio gás hidrogênio.

- c) **PAFC** – “*Phosphoric Acid Fuel Cell*” – Célula a Combustível de Ácido Fosfórico – O funcionamento desta célula é similar ao da PEMFC, com o diferencial de utilizar ácido fosfórico líquido (H_3PO_4) como eletrólito. É a tecnologia mais avançada comercialmente, possui unidades instaladas em todo o mundo.

A temperatura de funcionamento é de 160 a 240°C. Como a temperatura é maior, ela pode tolerar algumas impurezas como o monóxido de carbono e enxofre, sendo assim, possível a utilização de combustíveis como o gás natural ou biogás. Para isso, estes gases precisam do reformador e purificador para obtenção do hidrogênio e eliminação do excesso de impurezas.

A eficiência é menor se comparada às outras tecnologias, entre 35 e 47%, pois devido ao uso do reformador, é preciso queimar parte do combustível para atingir a temperatura de reforma (450 a 550°C). E pelo fato de utilizar hidrocarbonetos como combustíveis, há a emissão de pequenas quantidades de dióxido de carbono (CO_2).

- d) **SOFC** – “*Solid Oxide Fuel Cell*” – Célula a Combustível de Óxido Sólido – Esta célula utiliza um material cerâmico e sólido, feito geralmente de óxido de zircônia e de

ítrio, que permite a passagem dos íons. Mas neste caso os íons migram do cátodo para o ânodo, onde ocorrerá a formação de água.

O funcionamento desta célula é um pouco diferente. No ânodo ocorre a liberação de elétrons que fluem através do circuito externo até o cátodo, onde os elétrons entram em contato com o oxigênio (O_2) e formam íons de oxigênio (O_2^-). E então, esses íons passam pelo eletrólito e reagem com o hidrogênio.

A temperatura de operação é de 600 a 1000°C. A vantagem de operar em alta temperatura é que esta ajuda a aumentar as reações químicas, possibilitando assim o uso de um bom catalisador como o níquel, ao invés da platina que é um metal nobre. O níquel é barato e não é tão sensível ao monóxido de carbono e ao enxofre, o que da abertura para o uso de combustíveis como o gás natural, biogás e etanol diretamente na célula. Porém, a alta temperatura faz com que o início do funcionamento da célula seja mais lento e os materiais sejam mais resistentes.

A eficiência na produção de energia elétrica é de 50 a 60%, podendo chegar até 75 a 80% se também for aproveitado o calor gerado. Há pesquisas para o uso desta tecnologia na geração de energia em residências, indústrias e aplicações em automóveis.

- e) **MCFC** – “*Molten Carbonate Fuel Cell*” – Célula a Combustível de Carbonato Fundido – Esta tecnologia utiliza sais como o carbonato de sódio, lítio ou potássio que se fundem em alta temperatura e geram íons de carbonato (CO_3^{2-}), que fluem do cátodo para o ânodo, semelhante à célula SOFC.

A temperatura de operação é de 600 a 800°C, o que dispensa o uso da platina, podendo ser usado o níquel que é um catalisador mais barato. Também não há a necessidade do uso do reformador, pois em altas temperaturas, a reforma acontece dentro da própria célula através do calor produzido por ela, o que possibilita o uso de combustíveis como o gás natural, biogás e etanol.

A eficiência é de 50 a 60% podendo chegar a 85%, se o calor for aproveitado para aquecimento ou para geração de energia elétrica através de uma turbina a vapor. A célula MCFC é uma das tecnologias mais promissoras para aplicações de grande potência, acima de 1 MW.

- f) **AFC** - “*Alkaline Fuel Cell*” – Célula a Combustível Alcalina – Esta célula utiliza como eletrólito uma solução alcalina e aquosa de hidróxido de potássio (KOH) ao

invés de eletrólitos ácidos. É a tecnologia que vem sendo usada pela NASA em suas aplicações espaciais.

A temperatura de operação é de 50 a 250°C, sendo maior a concentração do hidróxido de potássio para alta temperatura, e menor para baixa temperatura. A eficiência elétrica é de 45 a 60%, podendo chegar a 75% se o calor for aproveitado. Quanto a potência, esta pode atingir de 300 W a 5 kW.

Uma das vantagens desta tecnologia é a utilização de materiais de baixo custo, com exceção de algumas células que utilizam eletrodos de platina, paládio e ouro. Porém, apresenta como desvantagem o fato de ter que utilizar o hidrogênio e oxigênio extremamente puros. Se nestes gases estiverem presentes o monóxido ou dióxido de carbono, eles irão reagir com o hidróxido de potássio e formar carbonatos, como o carbonato de potássio (K_2CO_3), dificultando a passagem dos íons pelo eletrólito.

- g) **DEFC** - "*Direct Ethanol Fuel Cell*" - Célula a Combustível de Etanol Direto – Esta tecnologia possibilita o uso do álcool etílico (etanol) diretamente na célula, sem a necessidade da reforma deste combustível. Sendo assim, não é necessário armazenar o hidrogênio no estado gasoso, podendo também ser aproveitada a infra-estrutura já existente de postos de combustível que fornecem álcool. Porém, esta tecnologia não é muito viável tecnicamente. Há uma dificuldade em quebrar a molécula de etanol, um processo difícil e não muito rápido, o que torna a eficiência aproximadamente a metade da tecnologia DMFC.

Estudos estão sendo realizados para que se melhore a viabilidade desta tecnologia. Contudo, as principais pesquisas para o uso do etanol na geração de energia elétrica estão na reforma deste combustível para a extração do hidrogênio, e o uso deste em uma célula a combustível. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e álcool etílico (etanol), o que proporciona uma grande oportunidade ao país na pesquisa deste combustível para uso em células a combustível.

7.3 Aplicações

As aplicações para as células a combustível são diversas, podendo ser usadas no setor de transportes, em equipamentos portáteis, na geração de energia estacionária e para uso

espacial/militar. No setor de transportes, esta tecnologia poderá ser utilizada em motocicletas, automóveis, ônibus ou até mesmos em trens e aviões, reduzindo assim o consumo dos combustíveis que são utilizados hoje e também a emissão de poluentes. Na Europa e em países como o Japão, EUA, China e Austrália já existem ônibus movidos por células a combustível circulando pelas cidades. No Brasil também já se iniciaram os projetos dos primeiros ônibus CaC e híbridos, através de parcerias do governo, universidades e empresas.



Figura 9 – Primeiro ônibus brasileiro movido a hidrogênio – Apresentado em São Bernardo do Campo em 2009.

Fonte: <http://eco4u.wordpress.com>

Contudo, as maiores mudanças esperadas serão nos automóveis, pois as empresas automobilísticas estão investindo bilhões nesta tecnologia. Os veículos CaC serão mais eficientes, silenciosos e não poluentes, emitindo apenas vapor d'água ao invés de fumaça. Mas para que isto se torne realidade as células a combustível precisam apresentar um baixo custo, confiabilidade, eficiência, alta potência, segurança, entre outras.

Outras mudanças que os veículos poderão apresentar é a presença de motores elétricos nas rodas, dispensando um motor central e os sistemas de transmissão. E ainda, os sistemas de aceleração, freios e direção poderão ser acionados eletricamente substituindo os sistemas de acionamento mecânicos que são utilizados atualmente. Sendo assim, os automóveis terão mais espaço e poderão apresentar desenhos mais arrojados, diferente dos modelos convencionais que se conhece hoje.

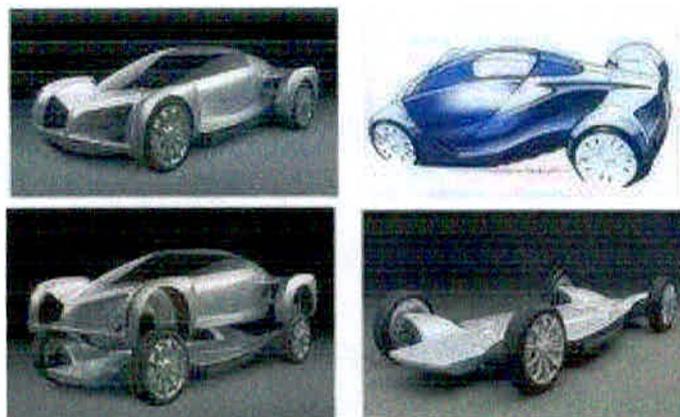


Figura 10 – AUTOnomy da GM – Modelo de automóvel sem sistema de transmissão
 Fonte: <http://www.disenho-art.com>

Em aplicações portáteis as células a combustível podem substituir as tradicionais pilhas e baterias usadas em equipamentos como telefones celulares, mp3 players, notebooks, lanternas, dentre outros. A tecnologia normalmente usada para estas aplicações é a Célula a Combustível de Metanol Direto (DMFC). A Fujitsu desenvolveu em 2004 um protótipo de micro-sistema de célula a combustível de 15 W alimentada por metanol, capaz de fazer um laptop funcionar por 8 a 10 horas. O uso desta tecnologia em equipamentos portáteis poderá apresentar grandes autonomias no futuro, por exemplo, um laptop com célula a combustível poderá passar semanas sem precisar ser recarregado.



Figura 11 – Laptop da Fujitsu com célula a combustível.
 Fonte: <http://pr.fujitsu.com>

Uma outra aplicação para as células a combustível, que poderá causar grandes mudanças no cotidiano das pessoas, é o uso desta tecnologia para a geração de energia estacionária, ou seja, as residências poderão produzir energia para o uso interno, para abastecer um veículo ou exportar energia elétrica para a rede de eletricidade pública. E o calor gerado pela CaC poderia ser aproveitado em uma residência para o aquecimento de água.

8 CONCLUSÃO

O mundo viveu no passado a era do carvão com a primeira revolução industrial, e posteriormente a era do petróleo, a qual tem se estendido até os dias de hoje. Contudo, essas fontes energéticas são limitadas pela natureza e, além disso, há também hoje uma grande preocupação como planeta, que sofreu muitas agressões durante os últimos séculos.

Sendo assim, o hidrogênio juntamente com a tecnologia da célula a combustível traz a solução para vários destes problemas, pois este é uma fonte de energia limpa quando obtido através de fontes renováveis e as células a combustível por sua vez, são capazes de gerar energia sem poluir o meio ambiente, quando usam o hidrogênio como combustível.

Ainda estamos no início desta nova revolução, e é evidente que estes novos tempos serão marcados pelo uso de fontes de energia renováveis, e o hidrogênio promete trazer muitos benefícios para a vida das pessoas e principalmente para o planeta. Contudo, para que isto aconteça grandes mudanças ocorrerão nas próximas décadas, desde pequenos equipamentos até as grandes máquinas. As fontes de energia que movem o mundo hoje serão substituídas por outras no futuro. A busca por energias limpas e renováveis é o foco do mundo, que apresenta uma visão cada vez mais consciente com relação às questões ambientais e caminha para uma nova etapa, uma nova página na história, a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2010: Ano base 2009** – Rio de Janeiro : EPE, 2010. 276 p. : 180 il. ; 23 cm. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-_BEN_-_Ano_Base/1_-_BEN_2010_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf> Acesso em: 17 out. 2011
- GIASANTI, Roberto. **Série sobre energia Plano de aula 1 – Energia no Mundo**. Disponível em: <<http://revistaescola.abril.com.br/geografia/pratica-pedagogica/questao-energia-brasil-mundo-507241.shtml>> Acesso em: 02 nov. 2011
- GOMES NETO, Emilio Hoffmann. **Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível**. Curitiba: BRASIL H2 FUEL CELL ENERGY, 2005. 240 p., il.
- LOPES, Alexandre de Oliveira; SANTOS, Jander Pereira dos. **Funcionamento das células a combustível de hidrogênio e aplicações**. Revista Interação, Varginha, v. 11, n. 11, p. 105.110, 2008/2009.
- RAIA, Maria de Fátima Ribeiro – **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA I, Célula a Combustível**. Apresentação feita para Universidade Tecnologia Federal do Paraná, UTFPR. 2010. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/fatimaraia/arquivos/Celulas-Combustivel.pdf>> Acesso em 01 de nov. 2011
- SANTOS, Fernando António Castilho Mamede dos e SANTOS, Fernando Miguel Soares Mamede dos. – **Células de Combustível**. Revista Millenium nº 29 do Instituto Politécnico de Viseu. Viseu, Portugal. Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millenium/Millenium29/21.pdf>> Acesso em: 16 abr. 2011
- <[tp://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html)> Acesso em: 30 out. 2011
- <[tp://eco4u.wordpress.com/2009/06/30/brasil-apresenta-seu-primeiro-onibus-a-hidrogenio/](http://eco4u.wordpress.com/2009/06/30/brasil-apresenta-seu-primeiro-onibus-a-hidrogenio/)> Acesso em: 13 nov. 2011
- <<http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/eletrolise/eletrolise/>> Acesso em: 20 nov. 2011
- <<http://planetasustentavel.abril.com.br/album/agua-boca-223591.shtml>> Acesso em: 10 out. 2011

<<http://pr.fujitsu.com/en/news/2004/01/26-1.html>> Acesso em: 27 nov. 2011

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Célula_a_combustível> Acesso em: 15 abr. 2011

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Gás_natural> Acesso em: 12 set. 2011

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Hidrogênio>> Acesso em: 15 abr. 2011

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Painel_solar_fotovoltaico> Acesso em: 06 nov. 2011

<<http://www.brasilh2.com.br/brh2-cac.html>> Acesso em: 03 out. 2011

<http://www.disenho-art.com/encyclopedia/concept_cars/GM_AUTONomy.html> Acesso em: 27 nov. 2011

<<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115070731>> Acesso em: 11 nov. 2011

<<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=catalisador-baixo-custo-producao-hidrogenio&id=010115110421>> Acesso em: 11 nov. 2011