

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS
ENGENHARIA MECÂNICA
EDUARDO RODRIGUES REZENDE

Biblioteca Monsenhor Domingos Prado Fonseca
N. Class. 622.042
Cutter B.407h
Ano/Ed. 2010

SISTEMA DE BIBLIOTECAS
FEPESMIG
BIBLIOTECA MONSENHOR DOMINGOS PRADO FONSECA

HIDROGÊNIO – CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Varginha - MG

2010

EDUARDO RODRIGUES REZENDE

HIDROGÊNIO – 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 a obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Varginha - MG

2010

EDUARDO RODRIGUES REZENDE

HIDROGÊNIO – 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 a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico pela banca Examinadora composta pelos membros: Prof. Esp. Márcio de Santana, Prof. Ms. Alexandre Soriano e Prof. Esp. Alexandre Lopes

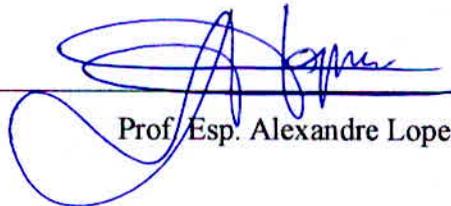
Aprovado em 20/11/2012



Prof. Esp. Márcio de Santana



Prof. Ms. Alexandre Soriano



Prof. Esp. Alexandre Lopes

OBS.:

Dedico esse trabalho a minha família, amigos, professores e todos que contribuíram de alguma forma para realização desse trabalho.

Agradeço a minha família que me ajudou durante todo esse tempo. Agradeço aos amigos e colegas de faculdade por todas as ajudas que me deram, incentivos e conhecimentos compartilhados. Agradeço também aos professores por todo conhecimento transmitido que ajudaram no desenvolvimento desse trabalho.

"Os desafios podem ser os degraus numa escada ou pedras no caminho. Depende de como você os encara".

Frank A. Clark

RESUMO

Devido aos problemas com meio ambiente enfrentados hoje em dia, em um futuro próximo, novas tecnologias de geração de energia limpa deverão ganhar espaço em vários setores, principalmente aos que afetam mais o meio ambiente, como o transporte e a geração de energia. A tecnologia com base no hidrogênio e nas células a combustível apresenta vários aspectos positivos que as tornam excelentes candidatas a ganhar espaço em vários setores, como já podemos presenciar várias empresas desenvolvendo produtos com essa tecnologia.

Nesse trabalho vamos estudar as características e propriedades do hidrogênio, as vantagens e desvantagens em relação aos outros combustíveis, modo de produção, transporte e armazenagem do hidrogênio e os principais problemas enfrentados nesses processos. Vamos ver o que são células a combustível, como elas funcionam, quais são os componentes que as compõem, quais as principais tecnologias, onde podem ser aplicadas e as vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

Palavras-chaves: Hidrogênio, Células a Combustível, Energia Alternativa.

ABSTRACT

Due to the problems with the environment faced today, in the near future, new technologies for clean power generation will gain space in various sectors, especially those that most affect the environment, such as transportation and power generation. The technology based on hydrogen and fuel cells presents several positive aspects that make them excellent candidates to gain space in various sectors, as we can witness several companies developing products with this technology.

In this work we will study the characteristics and properties of hydrogen, the advantages and disadvantages compared to other fuels, mode of production, transport and storage of hydrogen and the main problems faced by these processes. Let's see what are fuel cells, how they work, what are the components that compose it, what are the main technologies, where can be applied and the advantages and disadvantages of each technology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Figura 01: Tabela Periódica.....	15
Figura 02: Matriz Energética do Brasil e do Mundo.....	21
Figura 03: Matriz de Oferta de Energia Elétrica – 2007.....	21
Figura 04: Porcentagem de Carbono/Hidrogênio presentes em algumas fontes de energia	24
Figura 05: Comparativo do processo de descarbonização de algumas fontes de energia....	24
Figura 06: Formas de produção do hidrogênio.....	31
Figura 07: Modelos de células a combustíveis da Intelligent Energy.....	36
Figura 08: Diagrama da Célula a Combustível.....	36
Figura 09: Processo de funcionamento 1 da Célula a Combustível.....	38
Figura 10: Processo de funcionamento 2 da Célula a Combustível.....	38
Figura 11: Processo de funcionamento 3 da Célula a Combustível.....	39
Figura 12: Processo de funcionamento 4 da Célula a Combustível.....	40
Figura 13: Pilha de Células a Combustível.....	41
Figura 14: Esquema funcionamento da Célula conhecida como PEMFC.....	43
Figura 15: Esquema funcionamento da Célula conhecida como DMFC.....	44
Figura 16: Esquema funcionamento da Célula conhecida como PAFC.....	46
Figura 17: Esquema funcionamento da Célula conhecida como SOFC.....	47
Figura 18: Esquema funcionamento da Célula conhecida como MCFC.....	49
Figura 19: Esquema funcionamento da Célula conhecida como AFC.....	50
Figura 20: Autonomy, carro conceito da GM.....	56
Figura 21: Laptop com célula a combustível da Fujitsu Laboratories e Célula a Combustível portátil da Voller Energy.....	57
Figura 22: Célula a combustível H-5000 da Horizon Fuel Cell Technologies.....	58
Figura 23: Diagrama sistema auto-sustentável.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Fontes de Energia e Equipamentos de Geração de Energia.....	19
Tabela 02 – Poder calorífico de diferentes combustíveis.....	26
Tabela 03 – Comparativo das Principais Tecnologias de Células a Combustível.....	54

SUMÁRIO

INTODRUCÃO	13
1 OBJETIVO	14
1.1 Objetivos Específicos	14
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	15
2.1 Hidrogênio	15
2.2 Células a Combustível	16
2.2.1 Membrana de troca de prótons (PEMFC).....	16
2.2.2 Metanol direto (DMFC).....	17
2.2.3 Ácido fosfórico (PAFC).....	17
2.2.4 Óxido sólido (SOFC).....	18
2.2.5 Carbonato fundido (MCFC).....	18
2.2.6 Alcalina (AFC).....	18
3 DESENVOLVIMENTO	19
3.1 Geração de Energia	19
3.1.1 Era do Carvão e do Petróleo.....	19
3.1.2 Principais Fontes de Energia.....	20
3.1.2.1 Petróleo.....	22
3.1.2.2 Carvão.....	22
3.1.2.3 Gás Natural.....	22
3.1.2.4 Biomassa.....	23
3.1.2.5 Hidrelétricas.....	23
3.1.3 Comparativo Carbono X Hidrogênio.....	23
3.2 O Hidrogênio	25
3.2.1 Características do Hidrogênio.....	25
3.2.2 Produção.....	27
3.2.2.1 Eletrólise da água.....	28
3.2.2.2 A partir de fontes fósseis.....	29

3.2.2.3 A partir dos bicomcombustíveis.....	30
3.2.3 Distribuição e Transporte.....	31
3.2.4 Armazenamento.....	32
3.2.4.1 Na forma líquida.....	33
3.2.4.2 Na forma de gás comprimido.....	33
3.2.4.3 Em hidretos metálicos.....	34
3.2.4.4 Em nanofibras de carbono.....	34
3.2.4.5 Tetraborohidreto de sódio.	35
3.3 Células a Combustível.....	35
3.3.1 Conceitos Básicos.....	36
3.3.2 Tecnologias de Células a Combustível.....	41
3.3.2.1 Membrana de Troca De Prótons.....	42
3.3.2.2 Metanol Direto.....	43
3.3.2.3 Ácido Fosfórico.....	45
3.3.2.4 Óxido Sólido.....	46
3.3.2.5 Carbonato Fundido.....	48
3.3.2.6 Alcalina.....	50
4 RESULTADOS OBTIDOS.....	52
4.1 Hidrogênio.....	52
4.2 Células a Combustível.....	52
4.2.1 Comparativo das Tecnologias.....	53
4.2.2 Principais Aplicações.....	55
4.2.2.1 Transportes.....	55
4.2.2.2 Portáteis.....	56
4.2.2.3 Geradores.....	57
4.3 Sistema Auto-Sustentável.....	59
CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

INTRODUÇÃO

Hoje em dia a poluição pode ser considerada uns dos assuntos com maior repercussão mundial, preocupando a todos que procuram soluções para amenização desse problema. Um dos setores que mais contribuem com esse problema é a geração de energia e transportes, porem ambos são fundamentais hoje em dia. Cada vez mais tem se pesquisado e investido em um meio de mudar esse cenário no nosso planeta, substituindo as fontes de energia poluidoras e/ou não renováveis, como petróleo, gás natural, carvão e urânio, por fontes não ou menos poluidoras e/ou renováveis como, biomassa, energia eólica, solar e água. O mesmo podemos falar sobre os combustíveis usados na geração de energia, no caso desse trabalho vamos abordar sobre o hidrogênio e as células a combustível.

O hidrogênio apresenta um potencial muito grande para substituição dos tradicionais combustíveis fósseis como um combustível limpo, reduzindo e até não poluindo. Porem mesmo com várias vantagens, ainda são encontradas dificuldades em sua produção em larga escala, armazenagem e transporte, como vamos falar nesse trabalho. A tecnologia que vamos abordar, para utilização desse combustível, hidrogênio, é chamada de células a combustível, que apresentam uma boa eficiência.

As células a combustível são dispositivos que transformam energia química em energia elétrica de maneira silenciosa, eficiente como veremos nesse trabalho o funcionamento e apresentar as principais tecnologias desenvolvidas. Hoje em dia essas tecnologias já estão sendo desenvolvidas e usadas em vários setores, como na própria geração de energia, no transporte e aplicações portáteis. Porem tem um grande barreira, que é o alto custo, atualmente a maioria das pesquisas e estudos estão focadas na procura de novas matérias e processos de fabricação das células.

1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é mostrar as propriedades, características, segurança e vantagens do hidrogênio assim como as tecnologias e meios de produção, transporte e armazenamento do mesmo. Em relação às células a combustível, apresentar um pouco sua história, conceitos, componentes e funcionamento básico. Existem várias tecnologias de células a combustível, dependendo da aplicação. Nesse trabalho vamos apresentar as principais tecnologias e as principais aplicações.

1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho em relação ao hidrogênio são:

- Pesquisar como é obtido o hidrogênio.
- Pesquisar os meios de transportar o hidrogênio.
- Pesquisar como pode ser armazenado o hidrogênio.

Em relação às células a combustível são, pesquisar o funcionamento das mesmas, algumas características e principais aplicações de seis (6) tecnologias mais conhecidas e estudadas, que são:

- Membrana de troca de prótons (PEMFC)
- Metanol direto (DMFC)
- Ácido fosfórico (PAFC)
- Óxido sólido (SOFC)
- Carbonato fundido (MCFC)
- Alcalina (AFC)

E mostrar um exemplo de um sistema auto-sustentável de energia elétrica utilizando fontes de energia renováveis e não poluidoras, assim como as tecnologias para geração de energia, como as células a combustível.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Hidrogênio

O elemento químico hidrogênio, conhecido pelo símbolo H, é o primeiro elemento químico da tabela periódica, figura abaixo, não pertencendo a nenhum grupo da tabela, por possuir propriedades distintas.

Legenda:

- Metals Alcalinos
- Metals Alcalinoterricos
- Metals de transição
- Lantanídeos
- Actínídeos
- Outros metais
- Não-Metals
- Gases nobres

Propriedades físicas:

- H — Gasoso
- C — Sólido
- Hg — Líquido
- Rf — Desconhecido

1A	2A	Elementos de transição										3A	4A	5A	6A	7A	8A	
1	2											13	14	15	16	17	18	
H	He											B	C	N	O	F	Ne	
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
Na	Mg											Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uu	Uub	Uut	Uuq	Uur	Uus	Uu	Uuo	Uu	
		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw		

Figura 01: Tabela Periódica

Fonte: <http://www.tabela.oxigenio.com/>

“O hidrogênio é o mais simples e mais conhecido elemento do Universo! Está presente em quase tudo, inclusive em você! Ele compõe 75% da massa do universo e 90% de suas moléculas, como a água (H₂O) e as proteínas nos seres vivos. No planeta Terra, compõe aproximadamente 70% da superfície terrestre.

No seu estado natural e sob condições ambientes de temperatura e pressão, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro, insípido e muito mais leve que o ar. Ele também pode estar no estado líquido, ocupando um espaço 700 vezes menor do que se estivesse em forma de gás! Mas ele tem que estar armazenado numa temperatura de -253°C , em sistemas de armazenamento conhecidos como “sistemas criogênicos”. Acima dessa temperatura, o hidrogênio não pode ser liquefeito, mais pode ser armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão.” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 87)

“As misturas dos gases hidrogênio e oxigênio são inflamáveis, ate mesmo explosivos, dependendo da concentração. Quando queimados com oxigênio puro, os únicos sub-produtos são calor e a água. Quando queimado com ar, constituído por cerca de 68% de nitrogênio e 21% de oxigênio, alguns óxidos de nitrogênio (NOX)

são formados. Ainda assim, a queima de hidrogênio com ar produz menos poluentes atmosféricos que os combustíveis fósseis (petróleo, carvão).” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 87)

2.2 Células a Combustível

É um dispositivo eletroquímico que faz a conversão da energia química presentes nos combustíveis em energia elétrica.

“A célula a combustível é uma tecnologia que utiliza a combinação química entre os gases oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2) para gerar energia elétrica, energia térmica (calor) e água!” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 93)

Há muitos anos o homem descobriu que, passando eletricidade através da água podiam-se obter os gases hidrogênio e oxigênio, que constituem a água. Em 1839, um físico inglês chamado Willian Grove tentou fazer o processo reverso, ou seja, combinar o hidrogênio com o oxigênio de modo que se obtenha eletricidade e água. Ele foi feliz na sua invenção chamada de “bateria a gás”, porém naquela época ela não tinha muita aplicação prática. O nome célula a combustível foi criado, em 1889, por dois cientistas, Ludwig Mond e Charles Langer, onde eles tentaram tornar a célula a combustível uma invenção prática, porém também não obtiveram muito êxito.

Só na década de 30 que a célula a combustível começou a aparecer, sendo desenvolvidas algumas aplicações práticas, alguns anos depois esse invento foi de grande importância para os projetos espaciais da NASA, devido ao baixo peso, boa eficiência e grande densidade de energia.

Hoje já existem várias tecnologias das células a combustível, porém algumas estão sendo mais pesquisadas, desenvolvidas e aplicadas em diversos setores.

2.2.1 Membrana de troca de prótons (PEMFC)

“A sigla PEMFC deriva do nome em inglês “Proton Exchange Membrane Fuel Cell”. Em português quer dizer “Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons”. Como o próprio nome já diz, esta tecnologia utiliza uma membrana plástica, sólida, que tem a capacidade de transportar as cargas positivas quando esta úmida” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 155)

“Esta tecnologia foi inventada pela General Electric nos anos 50, e utilizada pela NASA em seus projetos espaciais como o Gemini e Apollo.” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 155)

“A tecnologia PEMFC é conhecida como uma célula a combustível de baixa temperatura, pois opera entre 60 a 140°C. A vantagem em operar em temperatura mais baixa é que o início de funcionamento da célula a combustível é mais rápido que em outras tecnologias. Isto é bom para os veículos.” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 155)

2.2.2 Metanol direto (DMFC)

A sigla DMFC deriva do nome em inglês “Direct Metanol Fuel Cell”, em português se traduz em “Célula a Combustível de Metanol Direto”. Diferentemente das outras tecnologias, onde o nome é dado devido ao eletrólito usado, nessa o nome deve-se ao fato de usar metanol diretamente nas células.

“[...] A diferença principal é que esta tecnologia utiliza o metanol (um tipo de álcool – CH₃OH), ao invés de hidrogênio puro.” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 156)

“Esta é a tecnologia preferida para ser utilizada em equipamentos portáteis como telefones celulares, laptops, MP3 players, câmeras digitais e geração de energia portátil de até 1 a 2 kW.” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 156)

2.2.3 Ácido fosfórico (PAFC)

“A sigla PAFC deriva do nome em inglês “Phosphoric Acid Fuel Cell”. Em português significa “Célula a Combustível de Ácido Fosfórico”. Como o nome sugere, estas células utilizam ácido fosfórico líquido (H₃PO₄) como eletrólito.” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 157)

“Esta é a tecnologia mais avançada comercialmente, com mais de 260 unidades instaladas em todo o mundo, desde hospitais, hotéis, centros comerciais, escolas, aeroportos e até estações de tratamento de esgoto e água. Está presente no Brasil, nas cidades de Curitiba e Rio de Janeiro. (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 156)

2.2.4 Óxido sólido (SOFC)

“A sigla SOFC deriva do nome em inglês “Solide Oxide Fuel Cell”. Em português significa “Célula a Combustível de Óxido Sólido”. O nome realmente assusta, mais na realidade é um material cerâmico e sólido (feito geralmente de óxido de zircônia e de ítrio) que permite a passagem dos íons.[...]” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 158)

“Esta tecnologia é outra grande promessa entre as tecnologias de células a combustível, desde a geração de energia em residências (potências de 5 a 10 kW) até em indústrias (potências de 250 a 500 kW). [...]” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 157)

2.2.5 Carbonato fundido (MCFC)

“A sigla MCFC deriva do nome em inglês “Molten Carbonate Fuel Cell”, que em português significa “Célula a Combustível de Carbonato Fundido”. Carbonato fundido são sais como o carbonato de sódio, lítio ou potássio – ou a combinação destes – que se fundem em alta temperatura (ficam no estado líquido) e geram íons de carbonato (CO_3^{2-}). [...]” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 158)

2.2.6 Alcalina (AFC)

“A sigla AFC significa “Alkaline Fuel Cell”, que em português é traduzida por “Célula a Combustível Alcalina”. [...]” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 159)

“Esta é a tecnologia que vem sendo utilizada por muitos anos para aplicações espaciais da NASA. Ela foi desenvolvida pelo britânico Francis Bacon em 1930, e utilizava eletrólitos alcalinos ao invés de eletrólitos ácidos (experiência de William Grove, precursor das células a combustível).” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 159)

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Geração de Energia

Hoje em dia conhecemos várias fontes de energia e equipamentos que convertem a energia química contida nos combustíveis, em energia útil seja na geração de eletricidade, calor (térmica) ou mecânica (movimento). Abaixo segue tabela de exemplos de fontes de energia e equipamentos que fazem geração de energia, seja termicamente ou mecanicamente.

Tabela 01 – Fontes de Energia e Equipamentos de Geração de Energia

Fontes de Energia	Equipamentos de Geração de Energia Térmica (calor) ou Mecânica (movimento)
Petróleo e Derivados (gasolina, metanol, diesel, nafta, óleos combustíveis)	Motores a Combustão
Biogás	Painel Solar Fotovoltaico (eletricidade)
Gás Natural	Turbina a gás/gás natural
Biodiesel	Termogeradores
Carvão	Turbinas a vapor
Etanol	Geradores
Urânio (Energia Nuclear)	Turbinas Hidráulicas (Usinas Hidrelétricas)
Energia Hidráulica	Baterias
Energia Solar	Turbinas Eólicas (Aero geradores)
Biomassa	Células a Combustível
Energia Eólica (Vento)	Painel Solar (Aquecimento)

Fonte: Copilada pelo autor

3.1.1 Era do Carvão e do Petróleo

A Primeira Revolução Industrial deu início a partir do surgimento de algumas invenções, devido ao aparecimento de grandes jazidas de ferro e carvão, a energia e o ferro abundantes foram os principais fatores dessa revolução. Esses fatores possibilitaram a invenção da máquina a vapor, que utilizava a energia da queima do carvão para impulsionar

máquinas e gerar energia. Nessa época já se começaram os grandes impactos ambientais, a poluição, gerada na queima do carvão e da lenha, nas regiões onde utilizavam e florestas destruídas para o abastecimento das atividades.

Já na Segunda Revolução Industrial, surgiu o petróleo que é uma fonte de energia mais prática e fácil de manusear, com isso foram surgindo novas invenções e descobertas, como o plástico. O motor a combustão veio a impulsionar o consumo de petróleo, incentivando a sua extração.

“Os automóveis foram a chave que abriu as portas para o consumo de energia, seja através da gasolina obtida do petróleo, seja através de usinas a carvão, gás natural ou hidrelétricas para a produção de suas peças.” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 38)

No Brasil, poucas foram as tentativas e incentivos, no início, para encontrar petróleo nas nossas terras, os investimentos eram para a geração de eletricidade através das hidrelétricas.

3.1.2 Principais Fontes de Energia

Com o passar do tempo, foram se tornando necessário buscar novas fontes de energia de acordo com a disponibilidade de cada região, no Brasil, por exemplo, que é um país de grandes dimensões, são utilizadas várias fontes de energia. A preocupação inicial em se procurar novas fontes de energia, foi de não se depender de apenas uma, para não correr o risco da escassez dessa fonte, mais pra frente perceberam que a maior preocupação seria o impacto causado ao meio ambiente.

Na figura apresentada abaixo, vemos as participações de determinadas fontes de energia, utilizadas na geração de energia, nos transportes e nas indústrias e a comparação entre a utilização das mesmas no Brasil e no Mundo.

Matriz energética

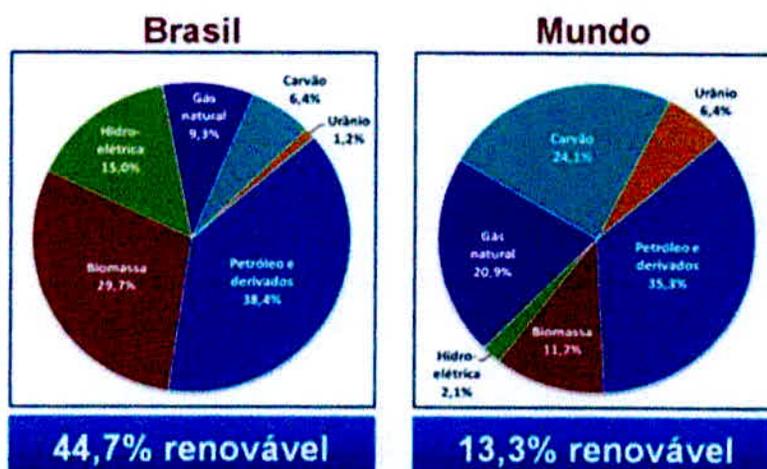


Figura 02: Matriz Energética do Brasil e do Mundo

Fonte: http://www.fAAP.br/faculdades/economia/ciencias_economicas/semana_2007.asp

MATRIZ DE OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA - 2007 (% e TWh)

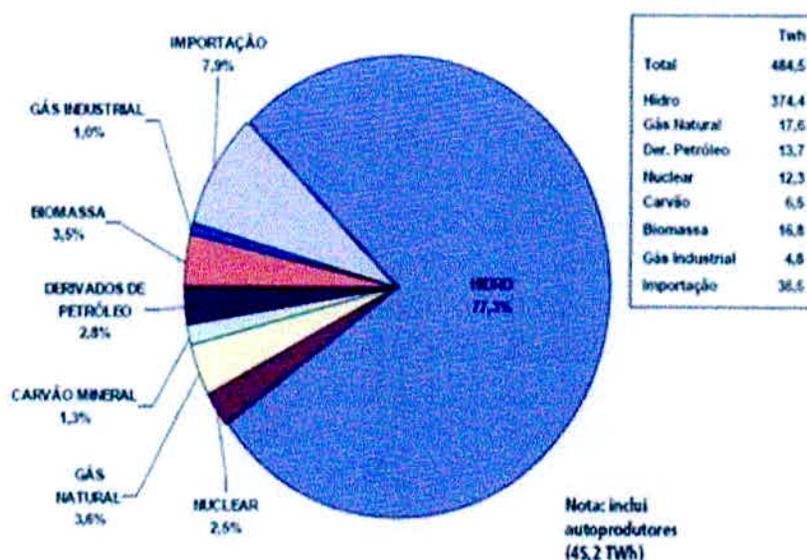


Figura 03: Matriz de Oferta de Energia Elétrica – 2007

Fonte: <http://cienciasinature.blogspot.com/2010/05/matriz-energetica-parte-2.html>

O Brasil se destaca pelo fato de utilizar um percentual maior que a média mundial em utilização de fontes renováveis, só na geração de energia elétrica, as hidrelétricas são responsáveis por 77,3% como mostra a figura acima.

3.1.2.1 Petróleo

De acordo com o que diz Emilio Hoffmann Gomes Neto em seu livro Hidrogênio Evoluir sem Poluir, p 56 “O petróleo é, ainda hoje, a principal fonte de energia do planeta, principalmente para o transporte. Ou seja, ainda estamos na Era do Petróleo.” Vemos que muito se progrediu porém ainda estamos dependentes do petróleo, devido ao fato da já existente infra-estrutura do petróleo, como no caso do setor de transportes que existe desde várias refinarias para a produção do combustível utilizado, o transporte para os centros de distribuição e os postos de combustíveis, para o uso do consumidor. Porém essa fonte de energia um dia esgotará, estima-se que por volta de 2050 a reserva mundial acabará já no Brasil deve durar até 2025.

3.1.2.2 Carvão

O carvão é uma fonte abundante de energia, pois além do carvão mineral tem também o carvão vegetal, obtido através da queima da madeira, é uma fonte muito barata, por isso é ainda muito utilizada. Os impactos ambientais causados por essa fonte são grandes, poluem o meio ambiente, mais até do que o petróleo e seus derivados e outro impacto é a devastação de florestas com o corte de árvores para a produção da lenha e do carvão.

3.1.2.3 Gás Natural

No início do século XX começou a ser utilizado em grandes quantidades e estima-se um aumento da participação dessa fonte nos próximos anos, devido ao fato de ser menos poluente e uma das fontes com maior quantidade de hidrogênio o que servirá para produção do hidrogênio. Porém, como o petróleo e o carvão mineral, é esgotável e de acordo com as reservas e produção mundial, deverá durar por aproximadamente mais 60 anos.

3.1.2.4 Biomassa

É uma fonte orgânica que abrange os derivados recentes de organismos vivos utilizados como combustíveis ou para a sua produção. Obtém-se a energia através da combustão do material orgânico, da formação do gás metano pela fermentação da biomassa e a sua transformação em álcool etílico ou biodiesel. É um recurso natural renovável, de baixo custo, há o reaproveitamento dos resíduos e é menos poluente que combustíveis fósseis.

3.1.2.5 Hidrelétricas

As hidrelétricas têm uma participação energética pequena no mundo, já no Brasil é bem significativa, só na geração de energia elétrica é responsável por mais de 70%. O impacto ambiental gerado se deve pelo alagamento causado pela construção da barragem, onde se forma uma represa, podendo, ou não, prejudicar a fauna e a flora da região. As hidrelétricas podem vir a ser grandes produtoras de Hidrogênio, aumentando sua participação.

3.1.3 Comparativo Carbono X Hidrogênio

Comparando as principais fontes de energia verificamos uma relação entre suas composições atômicas, destacando o carbono que é um dos principais poluentes do meio ambiente e o hidrogênio que é o nosso objeto de estudo. Átomos de carbono, em maior parte, compõem a lenha e o carvão, por isso o fato de serem fontes energéticas sólidas e de poluírem mais. O petróleo é menos poluente que o carvão e a lenha, pelo fato de apresentarem mais átomos de hidrogênio em relação aos de carbono, fator esse que explica também a sua consistência líquida. O gás natural que começou a ser utilizado no início do século XX, tem uma relação de 4 para 1, a quantidade de hidrogênio é 4 vezes maior que a de carbono, como é composto o metano (CH_4) e é menos poluente devido a sua maior porcentagem de hidrogênio.

Na figura abaixo vemos um comparativo da razão Carbono/Hidrogênio em algumas principais fontes de energia e combustíveis.

A RAZÃO CARBONO/HIDROGÊNIO DE VÁRIAS FONTES DE ENERGIA

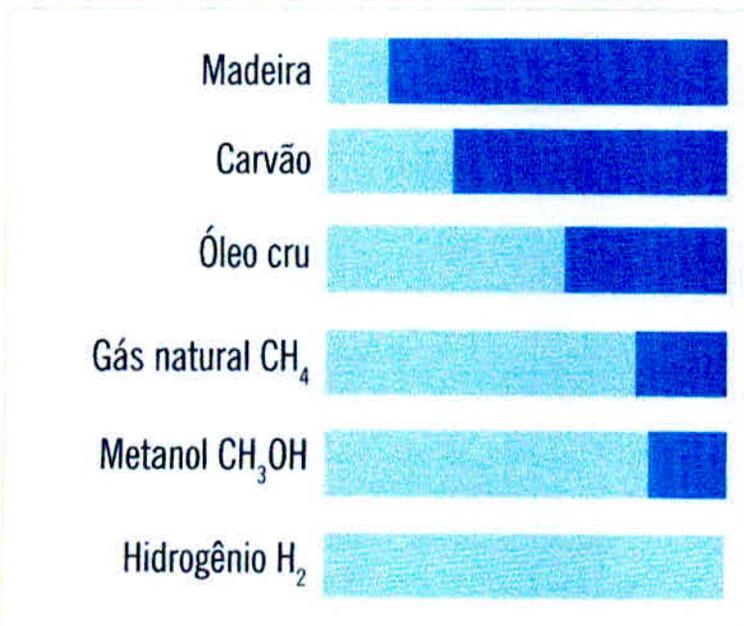


Figura 04: Porcentagem de Carbono/Hidrogênio presentes em algumas fontes de energia
Fonte: HOFFMANN, Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir. p.227

Devido aos problemas e a preocupação ambiental, as fontes de energia estão tendendo a um processo de “descarbonização”, onde temos cada vez menos átomos de carbono e mais de hidrogênio, portanto é um processo natural de que cheguemos à “Era do Hidrogênio”.

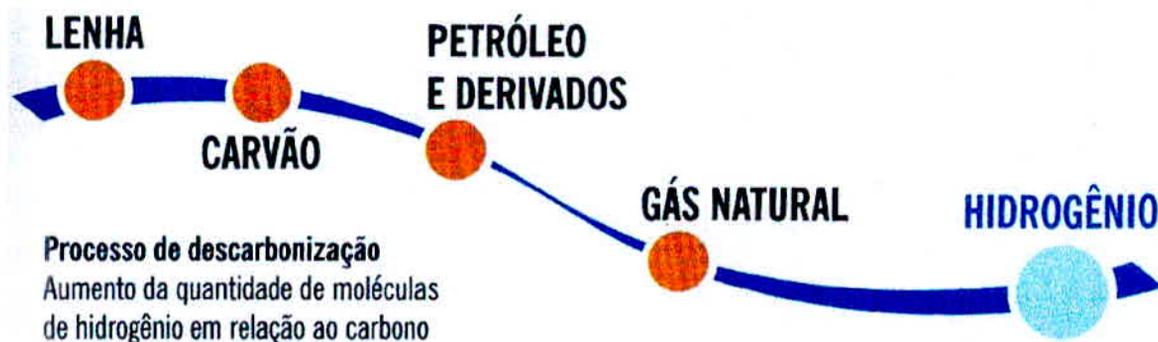


Figura 05: Comparativo do processo de descarbonização de algumas fontes de energia
Fonte: HOFFMANN, Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir. p.53

A figura abaixo mostra uma linha de evolução, onde da esquerda para a direita temos um processo de “descarbonização”, como citado acima.

3.2 O Hidrogênio

O hidrogênio é o mais simples de todos os elementos químicos, pois é constituído de um próton e um elétron que gira ao seu redor. Compondo aproximadamente 70% da superfície terrestre, é o elemento mais abundante no universo e presente em grande quantidade na natureza, só que não encontrado em sua forma elementar (H) somente encontrado em sua formula molecular o gás hidrogênio (H_2), e em combinação com outros elementos, em especial com a água.

O hidrogênio molecular, o gás mais leve que se conhece, é incolor, inodoro, insípido e insolúvel em água. Sua densidade é 14 vezes menor que a do ar. Ao esfriá-lo com ar liquefeito e comprimi-lo fortemente, obtêm-se hidrogênio líquido, que entra em ebulição a $-253^\circ C$ à pressão atmosférica.

A queima do hidrogênio com oxigênio puro resulta em calor e água como subproduto, já se for utilizado ar ao invés de oxigênio puro, devido o ar ser constituído por cerca de 68% de nitrogênio e 21% de oxigênio, são formados alguns óxidos de nitrogênio (NOX), mesmo assim produzindo muito menos poluentes que os combustíveis fosseis.

3.2.1 Características do Hidrogênio

Podemos destacar vários benefícios, para o meio ambiente, da utilização do hidrogênio como combustível no lugar dos combustíveis fosseis como o petróleo:

- Emissões nulas se forem utilizado hidrogênio e oxigênio puros;
- Podem existir emissões provenientes da produção de hidrogênio;
- Por cada 25 kg de hidrogênio utilizado, evita-se o consumo de um barril de petróleo;
- Por cada 1 kg de hidrogênio utilizado em vez de petróleo, 3 kg de carbono (CO_2) são evitados.

O hidrogênio tem a mais alta energia por unidade de peso comparativamente com qualquer combustível, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais leve e não tem os pesados átomos do carbono, pela razão do baixo peso, tem sido usado intensamente nos programas espaciais onde o peso é crucial. Durante a reação do hidrogênio é liberada uma quantia de

energia cerca de 2,5 vezes maior do que o poder de combustão de um hidrocarboneto (gasolina, gásóleo, metano, propano, etc.). Assim, para satisfazer um consumo energético, a massa de hidrogênio necessária é apenas aproximadamente uma terça parte da massa de um hidrocarboneto, como podemos ver na tabela abaixo de “Poder calorífico de diferentes combustíveis”.

Tabela 02 – Poder calorífico de diferentes combustíveis.

Combustível:	Valor do Poder Calorífico Superior (a 25°C e 1 atm)	Valor do Poder Calorífico Inferior (a 25°C e 1 atm)
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Fonte: SANTOS, Fernando Miguel Soares Mamede dos. Combustível “Hidrogênio” p. 253.

Outra característica interessante do hidrogênio é em relação a sua segurança, muitas pessoas pensam que por ele ter um poder calorífico grande, ele é um gás que oferece menos segurança em relação aos outros combustíveis. O fato de ser um gás perigoso, inflamável e explosivo é verdade, porem comparado a outros combustíveis em muitas situações, ele é mais seguro. Quando em espaços confinados, oferece perigo de explosão, fato que é significativo quando se projeta a arquitetura do local onde é armazenado e manuseado. Ao ar livre o hidrogênio tem a vantagem de dispersar rapidamente pelo ar, pelo fato dele ter um coeficiente de difusão alto, portanto nessa situação raramente ocorre explosão e também a queima ocorre mais rapidamente. De acordo com alguns estudos experimentais, comparando com o querosene, o fogo do hidrogênio duraria 10 vezes menos, produziria menos calor, e não se propagaria tanto.

Principais características de segurança do hidrogênio:

- Não entra em detonação ao ar livre;
- Não é tóxico;
- Não é radioativo;

- Não é corrosivo;
- Não contamina a água;
- Não é cancerígeno;
- Não entra em auto-ignição na temperatura ambiente;
- Não produz produtos perigosos de decomposição.

Mais quando pensamos em substituir o hidrogênio dos demais combustíveis fósseis na utilização como combustível em veículos automotores, primeiramente nos deparamos com alguns problemas enfrentados principalmente no processo de produção, transporte e armazenagem, para poder substituir a altura a rede já existente de combustíveis fósseis.

3.2.2 Produção

“A produção de hidrogênio em grandes quantidades é um dos maiores desafios a serem vencidos, mas não será por falta de fontes de hidrogênio!” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 114)

O hidrogênio conhecido desde há centenas de anos como um gás que se obtém quando ácido sulfúrico diluído é posto em contacto com o ferro, sendo inflamável no ar. Na época foi descoberto que o gás hidrogênio se forma pela ação de ácidos como o clorídrico ou o ácido sulfúrico em contacto com metais como zinco e o ferro, mais essa não é a única maneira de se produzir ou obter o hidrogênio.

No nosso meio não existe o hidrogênio livre, estando sempre associado a outros elementos e para ser obtido “puro” é necessário gastar energia na dissociação de uma fonte primária. Sendo assim, o hidrogênio não é uma fonte primária de energia, mas sim, uma fonte intermediária, por isso não deve ser referido como uma fonte energética, pois é apenas um vector energético, isto é, uma moeda de troca.

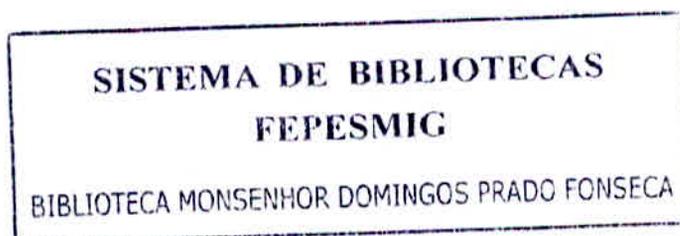
Atualmente a produção de hidrogênio é principalmente utilizada para o processamento de combustíveis fósseis, em fabricação de produtos químicos, usado em sistemas de resfriamento de motores e geradores e na indústria eletrônica. E de onde vem essa maior parte da produção do hidrogênio? A maior parte é produzida a partir de fontes de energia

convencionais e poluentes como o gás de carvão gaseificado, gás natural e pela reforma de petróleo e seus derivados.

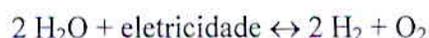
A escolha do melhor método de produção do hidrogênio depende da quantidade que queremos produzir e do seu grau de pureza. Porém devemos pensar que é importante pesquisar e promover a produção do mesmo a partir de fontes renováveis, para que realmente se torne uma forma de geração de energia sustentável, segundo dados do Departamento de Energia dos EUA, aproximadamente 5% do hidrogênio produzido é através de fontes renováveis.

Os processos de produção do hidrogênio necessitam de energia sob alguma forma como calor, luz ou eletricidade de forma a que se inicie o processo, através de reação química com metais como o zinco ou pela ação de microorganismos que produzem hidrogênio nas suas atividades metabólicas.

3.2.2.1 Eletrólise da água



É utilizada energia elétrica para se separar as moléculas da água (H_2O) formando hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) de acordo com a equação abaixo, tendo um rendimento global do processo na ordem dos 95%.



É um processo relativamente simples, onde se é aplicado uma tensão de aproximadamente 1,5 volts através de 2 eletrodos que ficam submersos na água, no eletrodo positivo é produzido o gás oxigênio e no eletrodo negativo o gás hidrogênio. No final dos anos 80 e nos anos 90, foi inventado um método de obtenção do hidrogênio por eletrólise da água usando um eletrolisador com uma(s) membrana(s) de troca de prótons (PEM – Próton Exchange Membrane) que utiliza uma membrana plástica, como nas células a combustível.

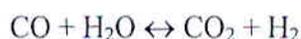
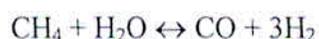
A energia elétrica poderá vir de fontes renováveis, como a energia solar, eólica, hídrica, maremotriz, geotérmica, etc. Com este tipo de fontes renováveis o uso da eletrólise tem como vantagem ser uma forma de produzir hidrogênio perfeitamente limpa. Mas também tem aspectos negativos, como serem necessárias grandes quantidades de energia, sendo que em geral as fontes de energia usadas são não renováveis e conseqüentemente poluidoras.

No Brasil esse processo de obtenção do hidrogênio é apontado como o mais interessante, devido ao fato de possuir um grande potencial hidráulico. Várias empresas, concessionárias de energia elétrica através das hidrelétricas, estão começando a pesquisar a viabilidade econômica de se produzir hidrogênio a partir da água utilizando os reservatórios das grandes usinas hidrelétricas brasileiras. Nos períodos de grande oferta de água nos reservatórios, é desperdiçada energia devido ao fato desse volume de água ser superior à capacidade de armazenamento de energia, pois não tem como ser consumida, essa água é “vertida”, passa livremente nas comportas. Portanto o hidrogênio poderia ser produzido nesses períodos e fora dos horários de grande consumo.

3.2.2.2 A partir de fontes fósseis

É atualmente de onde é obtido, em maior parte, o hidrogênio, a partir de fontes como o petróleo, gás natural e carvão. Existem duas formas de produzir o hidrogênio que são mais comuns, a reforma a vapor e oxidação parcial.

A reforma a vapor consiste basicamente na reação entre o metano (CH_4), por exemplo, e o vapor de água, produzindo hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2) conforme as reações abaixo:



O processo consiste em misturar o vapor, cerca de 950 °C, com o gás natural, convertendo em uma rica mistura de hidrogênio e monóxido de carbono. Esse monóxido de carbono ainda pode ser combinado com água, formando mais hidrogênio e dióxido de carbono. É um dos processos mais eficientes cerca de 70% a 80% de eficiência.

A oxidação parcial é parecida como a anterior diferenciando-se no fato de que se adiciona oxigênio ou ar nas reações e também de poder utilizar combustíveis mais pesados para a produção do hidrogênio, como o petróleo e o carvão gaseificado.

Porém este método tem algumas desvantagens. A produção de hidrogênio com este método, para responder a um consumo posterior fica mais cara por unidade energética, do que se o combustível primário for simplesmente usado por combustão. Este método só se aplica

aos combustíveis fósseis que são uma fonte não renovável de energia e um dia irão deixar de ser usados como fonte de energia e o fato de se libertar dióxido de carbono para o meio ambiente.

3.2.2.3 A partir dos bicomustíveis.

Esse método é muito interessante devido aos inúmeros meios de se produzir hidrogênio, como a partir de aterros sanitários, da gaseificação da biomassa, no álcool, nos excrementos dos animais e no próprio lixo orgânico em casa.

O lixo orgânico produzido em casa e que é jogado em aterros sanitários, produz um gás, conhecido como biogás, que normalmente contém metano, dióxido de carbono, nitrogênio, e um pouco de hidrogênio e oxigênio. O metano é prejudicial ao meio ambiente, causando problemas como o efeito estufa, e mais da metade do gás produzido nos aterros sanitários contém metano, portanto aproveitar esse gás para produção do hidrogênio, além de gerar energia, protege o meio ambiente. O hidrogênio é obtido através do metano pelo processo de reformar a vapor já citado nesse trabalho.

Dentro da biomassa temos o bagaço da cana-de-açúcar, bambu, lenha e outros resíduos agrícolas, o uso deste meio contribui para diminuir o problema do efeito estufa. A biomassa quando convertida em combustível líquido que é o álcool, etanol, pode se utilizada para produção do hidrogênio através de catalisadores que estão sendo desenvolvidos, para que permitam a obtenção e a purificação do hidrogênio. A maior dificuldade na extração do hidrogênio a partir do álcool está em quebrar as ligações químicas de hidrogênio e carbono. Já a conversão da biomassa em gás, conhecida também como biogás, é um processo no qual o combustível sólido é convertido em gases pela combinação de processos de reações químicas. O biogás proveniente da biomassa é mais pobre em metano.

O Brasil é um dos países com maior potencial para aproveitar este meio de produção do hidrogênio, já que mais de 1/4 da sua energia é a partir desta fonte.

Existe um grande desafio nesse método que são as diferentes características de cada combustível, o que diferencia o processo em cada, e a necessidade de equipamentos extra para a conversão e a purificação.

A figura abaixo mostra esquematicamente todas as formas de produção do hidrogênio, onde algumas foram descritas nesse capítulo.

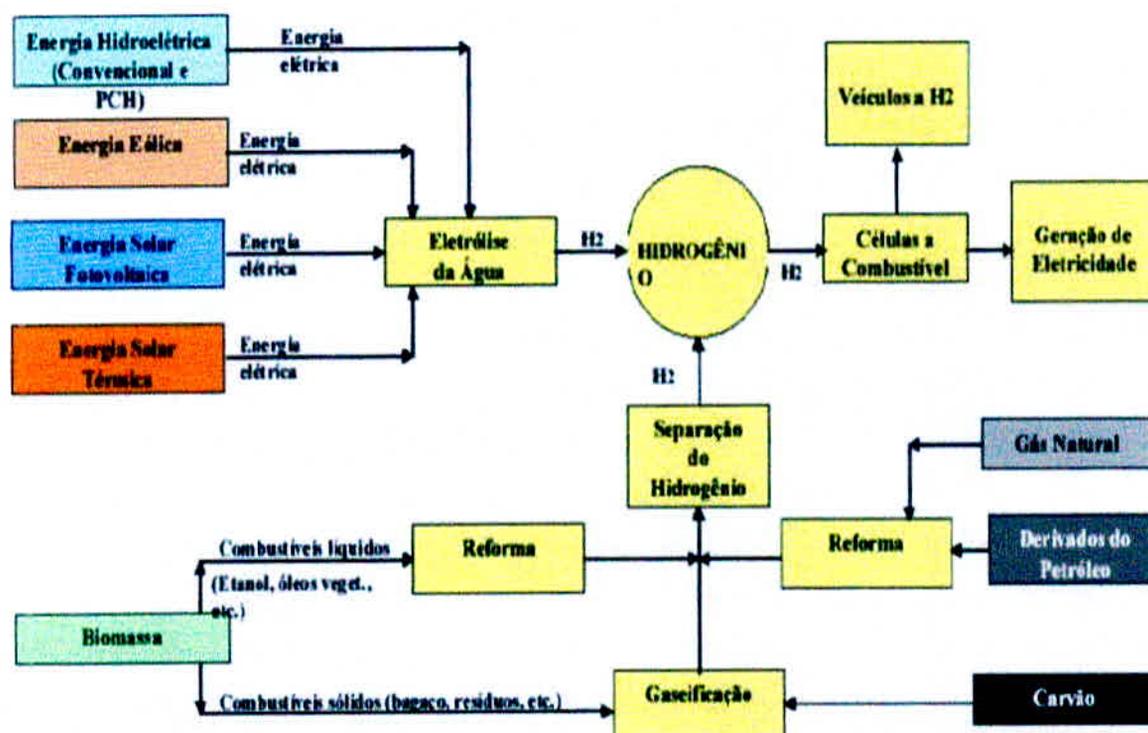


Figura 06: Formas de produção do hidrogênio

Fonte: RAlA, Maria de Fátima Ribeiro. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA I, Célula a Combustível. p. 11

3.2.3 Distribuição e Transporte

O hidrogênio pode ser produzido em grandes quantidades em fábricas especializadas, ou em pequenas quantidades no local onde é necessária, a produção em grandes quantidades beneficia da economia de escala.

A produção em pequenas quantidades pode amenizar os problemas relacionados com o transporte, com a energia, que pode ser facilmente obtida da eletricidade, do gás natural, solar e outros. Com a produção local, devido à existência não de uma grande unidade produtora, mas várias dispersas, a quantidade de equipamento utilizado na produção de hidrogênio é significativamente maior, aumentando os custos de manutenção em relação à produção em larga escala.

A infra-estrutura necessária de energia com base no hidrogênio inclui a produção, o armazenamento, as estruturas e métodos de transporte, estações de abastecimento para instalações de potências, as várias tecnologias que convertem o combustível hidrogênio em energia para edifícios, veículos e aplicações portáteis.

O transporte do hidrogênio pode ser feito por “pipelines”, que é uma rede de tubos que permitem a circulação do hidrogênio na forma gasosa dos locais onde se é produzido esse hidrogênio diretamente para as áreas industriais abastecendo as indústrias e ligações entre a produção local e os locais de consumo. Nos Estados Unidos é muito utilizado esses “pipelines” para transportar o hidrogênio. Um problema muito grande nesse processo é devido às moléculas de hidrogênio serem muito pequenas, qualquer pequenas aberturas, juntas ou soldas mal feitas podem deixar o gás escapar. Outro problema é o fato do hidrogênio poder reagir com as paredes de metal do “pipeline”, desgastando-as com o tempo e até mesmo poderem vir a aparecer aberturas, portanto deve ser utilizados tubos de plástico ou aços especiais, o que vai encarecer o processo.

O hidrogênio também pode ser distribuído sob a forma gasosa em cilindros e reboques com tanques próprios, com pressões normalizadas entre 150 a 400 bar, embora sejam possíveis pressões mais elevadas, bem como, o transporte em caminhões, vagões e barcos.

O transporte do hidrogênio na forma líquida é uma opção muito interessante, pois no estado líquido apresenta uma baixa densidade sendo mais leve, podendo então transportar e armazenar um maior volume. O problema é a energia necessária para se condensar esse hidrogênio do estado gasoso para o líquido, pois sabe-se que o ponto de condensação do hidrogênio é a -253°C na pressão atmosférica, e também que todo meio de transporte e armazenagem deverá contar com um sistema para se manter refrigerado esse hidrogênio.

Em alguns países, principalmente os mais desenvolvidos, estão investindo na construção de locais de produção e postos para distribuição e abastecimento para população, onde já se tem veículos circulando utilizando o hidrogênio como combustível.

3.2.4 Armazenamento

Há várias técnicas de armazenamento do hidrogênio desde a simples contenção do gás sobre pressão num recipiente, normalmente cilindros, até a combinação com algum metal ou gás através de reações químicas. É nesse aspecto que definiremos o sucesso dos veículos

utilizando hidrogênio como combustível, pois o objetivo é desenvolver um tanque que armazene uma grande quantidade de hidrogênio, sendo que não seja muito pesado e nem muito grande, para se obter uma boa autonomia nos veículos. Vários meios de armazenamento já são conhecidos e utilizados e muitos ainda estão sendo estudados e desenvolvidos.

3.2.4.1 Na forma líquida

Como já vimos o armazenamento na forma líquida é muito interessante devido ao fato de se armazenar um maior volume de hidrogênio num menor espaço, mais devido às propriedades de condensação é um processo que depende de equipamentos caros e gasta muita energia. Nesse processo os perigos em relação a armazenagem do gás hidrogênio comprimido são menores, pois se existir um vazamento o combustível vai ter de aquecer de forma a ir evaporando-se e vai se libertando sobre a forma gasosa mais lentamente para a atmosfera. O armazenamento do hidrogênio líquido, é feito em sistemas criogênicos, que são construídos para que não ocorra a transferência de calor do meio ambiente para dentro do tanque, que se encontra o hidrogênio líquido.

3.2.4.2 Na forma de gás comprimido

O hidrogênio na forma de gás é comprimido no interior de cilindros e tanques, é um método de armazenamento amplamente usado, quando são necessárias pequenas quantidades de gás. Este método é bom para utilizações onde o espaço disponível não é problema, podendo o hidrogênio ser comprimido em tanques ou outro tipo de recipiente próprio. A pressão de compressão do hidrogênio pode andar entre 200 e 250 bar para pequenos recipientes de armazenamento e chegando a 500-600 bar quando utilizado em larga escala.

Para a utilização em automóveis, estão sendo desenvolvidas novas formas, aproveitando os espaços disponíveis, e novos materiais, procurando armazenar com uma pressão maior. Quanto menos metal for usado, mais leve será o cilindro, é nessa perspectiva

que se estão utilizando novos materiais plásticos e fibras de carbono ultra-resistentes, chegando a ser 5 vezes mais leve que os cilindros de metal.

3.2.4.3 Em hidretos metálicos

Basicamente são ligas metálicas que possuem a propriedade de absorver o gás hidrogênio, formando o chamado hidreto metálico. O hidrogênio penetra no material, através do contato sob alta pressão, formando uma mistura sólida, as ligas metálicas são construídas de forma esponjosa, para se ter uma maior área de contato. Para que ocorra o processo contrário, ou seja, a liberação de hidrogênio dessa mistura, é necessário que o hidreto metálico seja aquecido para quebrar as ligações químicas entre o hidrogênio e o metal.

Pelo fato do hidrogênio ficar armazenado sob pressão ambiente ou até mais baixas, é considerado um processo muito seguro, porém tem a desvantagem de serem muito pesados e ocupam muito espaço, comparado com a capacidade de armazenamento de hidrogênio.

3.2.4.4 Em nanofibras de carbono

São compostas na forma de várias camadas de placas de grafite bastante finas, que quando exposto a hidrogênio a uma pressão em torno de 120 atm a temperatura ambiente, consegue absorver e reter hidrogênio 70% em relação ao peso total. Só que essas informações ainda não foram confirmadas, novos avanços são esperados para essa tecnologia. Caso confirme essa nova tecnologia, vários problemas enfrentados principalmente nos veículos movidos por célula a combustível seriam resolvidos, e também todo o problema de infraestrutura.

3.2.4.5 Tetraborohidreto de sódio.

Conhecido na formula molecular como (NaBH_4) possui um alto conteúdo de hidrogênio, é um sal branco e seco que se torna um combustível liquido quando dissolvido em água. Contem mais hidrogênio em relação a volume quando comparado com hidrogênio comprimido, e é mais seguro também. O hidrogênio é produzido, a partir desse combustível liquido, com a participação de um catalisador apropriado, deixando como resíduo o “bórax” (NaBO_2), de acordo com a reação abaixo. Esse bórax pode ser reconvertido em tetraborohidreto, para uma nova aplicação, porém esse processo consome muita energia.



3.3 Células a Combustível

Há muitos anos já o homem descobriu que, passando eletricidade através da água podiam-se obter os gases hidrogênio e oxigênio, que constituem a água. Em 1839, um físico inglês chamado Willian Grove tentou fazer o processo reverso, ou seja, combinar o hidrogênio com o oxigênio de modo que se obtenha eletricidade e água. Ele foi feliz na sua invenção chamada de “bateria a gás”, porem naquela época ela não tinha muita aplicação prática. O nome célula a combustível foi criado, em 1889, por dois cientistas, Ludwig Mond e Charles Langer, onde eles tentaram tornar a célula a combustível uma invenção prática, porem também não obtiveram muito êxito.

Só na década de 30 que a célula a combustível começou a aparecer, sendo desenvolvidas algumas aplicações práticas, alguns anos depois esse invento foi de grande importância para os projetos espaciais da NASA, devido ao baixo peso, boa eficiência e grande densidade de energia.

Células a combustível são dispositivos eletroquímicos, que transformam energia química presente nos combustíveis em energia elétrica de maneira silenciosa, segura e eficaz. De todas as tecnologias de células a combustível, existe um conceito básico de partes e funcionamento para combinarem o hidrogênio com o oxigênio.

A figura abaixo mostra alguns modelos de diferentes tamanhos e formas de células a combustível.



Figura 07: Modelos de células a combustíveis da Intelligent Energy.
Fonte: RAIA, Maria de Fátima Ribeiro. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA I. p. 2

3.3.1 Conceitos Básicos

A lógica de todo o funcionamento da célula a combustível é, a entrada de um lado do hidrogênio do outro o oxigênio, os eletrodos um de cada lado e no meio deles existe o eletrólito e o catalisador. Em todos os tipos de células combustíveis encontramos alguns componentes comuns listados abaixo.

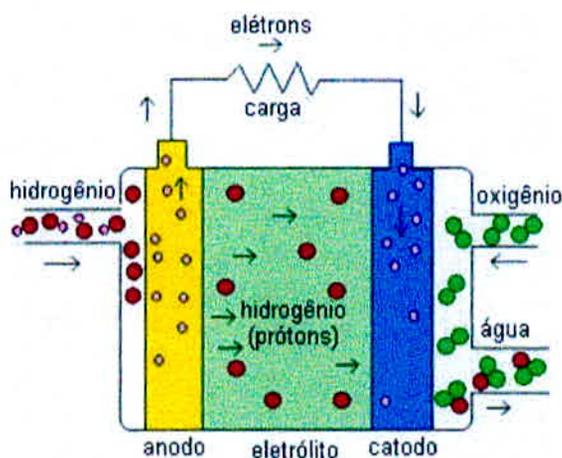


Figura 08: Diagrama da Célula a Combustível
Fonte: Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico. Projeto Cemig/Aneel-008. p. 1.

Na figura acima podemos identificar alguns dos componentes que falaremos abaixo.

- Ânodo.

É o terminal negativo, chamado de ânodo, é a parte onde recebe o combustível, que passa por canais de fluxo desenhados na placa do eletrodo, esses canais têm por objetivo atingir toda a superfície do eletrólito que é revestido pelo catalisador.

- Cátodo.

É o terminal positivo, chamado de cátodo, recebe o gás oxigênio puro ou o próprio ar e passa pelos canais de fluxo iguais ao ânodo. Esses terminais, o ânodo e o cátodo têm que ser condutores de eletricidade, eles são feitos de grafite com resinas, ou de metais como o aço inoxidável.

- Catalisador.

São responsáveis por acelerarem as reações químicas e pela quebra da molécula do combustível, que normalmente é o hidrogênio (H_2), produzindo elétrons. Um exemplo de catalisador é a platina.

- Eletrólito.

Pode ser líquido ou sólido, onde tem a propriedade de permitir o movimento dos prótons, íons de hidrogênio (H^+), no caso usando o hidrogênio como combustível, porém não podem permitir a passagem dos elétrons que devem fluir por um circuito externo, onde esse fluxo é usado para o funcionamento de uma lâmpada, por exemplo. Juntamente com o catalisador, o eletrólito, é a lógica de todo o funcionamento da célula a combustível.

O funcionamento da célula a combustível consiste em, de um lado o hidrogênio (H_2) alimenta o ânodo da célula de combustível (ver figura abaixo), depois é oxidado no catalisador de platina, por exemplo, havendo a produção de dois elétrons (e^-) e dois prótons que são os íons de hidrogênio (H^+) de acordo com a reação abaixo.



Na figura abaixo, vemos uma etapa do processo que é descrita na própria figura, que traduzindo significa, “Assim que o combustível hidrogênio flui para dentro do anodo da célula a combustível, partículas do catalisador presente ajudam a separar o combustível em prótons (íons de hidrogênio) e elétrons”.

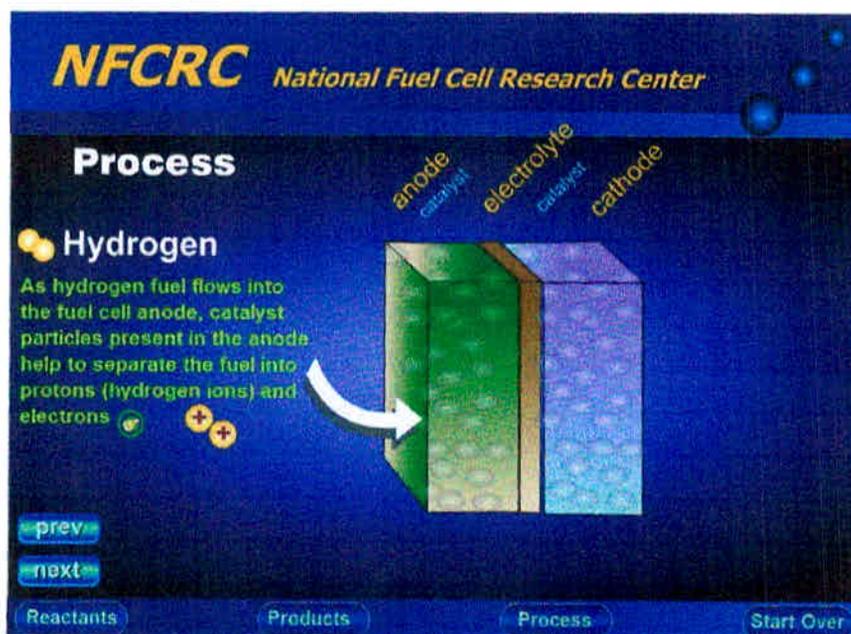


Figura 09: Processo de funcionamento 1 da Célula a Combustível

Fonte: http://www.nfrcr.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_animation.aspx

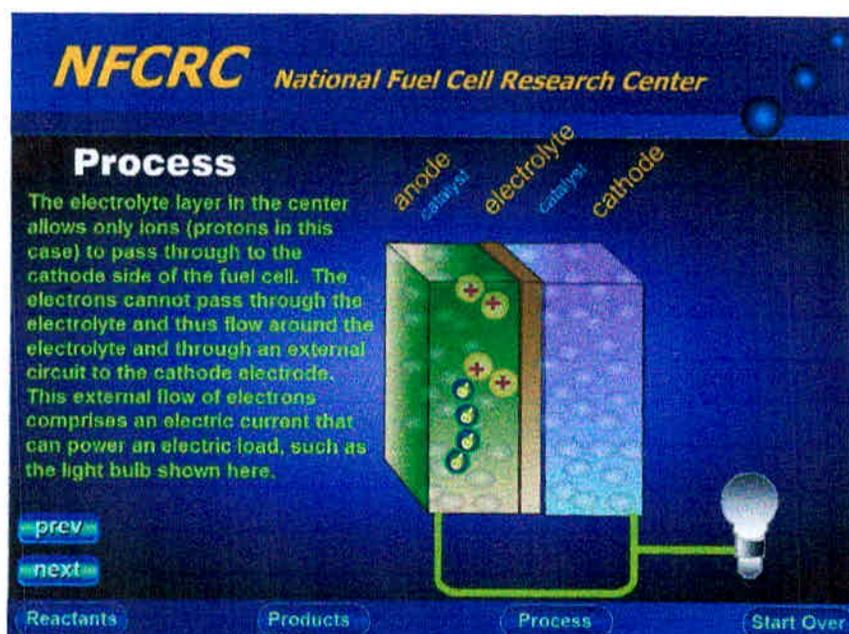


Figura 10: Processo de funcionamento 1 da Célula a Combustível

Fonte: http://www.nfrcr.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_animation.aspx

Na figura acima é explicado uma etapa do processo de funcionamento, que traduzindo significa, “O eletrólito no centro permite apenas que íons (nesse caso os prótons) passem para

o lado cátodo na célula a combustível. Os elétrons não podem passar através do eletrólito eles devem percorrer ao redor do eletrólito por um circuito externo para o cátodo. Essa corrente de elétrons externa gera corrente elétrica que pode ser usada para alimentar um aparelho elétrico, assim como acender uma lâmpada como aqui é mostrado”.

Em seguida, os elétrons (e^-) produzidos pela reação de oxidação do hidrogênio são transportados através de um circuito elétrico e utilizados para produzirem energia como mostra na figura abaixo.

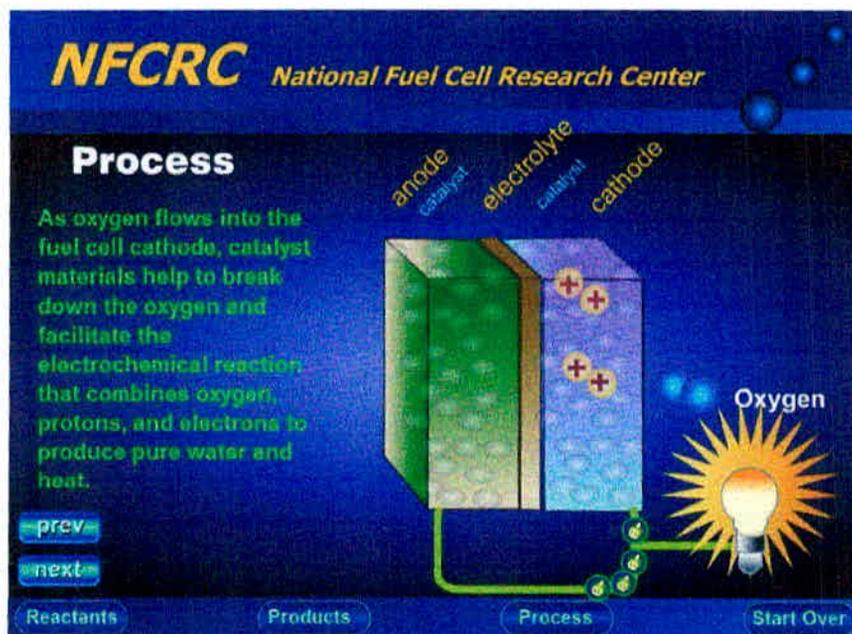
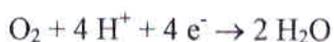


Figura 11: Processo de funcionamento 3 da Célula a Combustível

Fonte: http://www.nfrcr.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_animation.aspx

Na figura acima outra etapa do processo é explicada, que traduzindo significa, “Assim que o oxigênio flui para dentro do cátodo da célula a combustível, o catalisador ajuda a quebrar as moléculas de oxigênio e facilitar a reação eletro-térmica que combina oxigênio, prótons, e elétrons para produzir água pura e calor”.

Os prótons (H^+) produzidos na reação no ânodo são transportados do ânodo para o cátodo, através do eletrólito. No cátodo, que é alimentado com oxigênio (O_2) (ver figura acima), o mesmo reage com os prótons transportados através do eletrólito e com os elétrons provenientes do circuito elétrico de acordo com a reação abaixo.



O produto final da reação que ocorre no cátodo é certa quantidade de calor e vapor de água (H_2O) (ver figura abaixo).

Na figura abaixo que é explicado a ultima etapa do funcionamento, traduzindo, fala o mesmo da figura anterior.

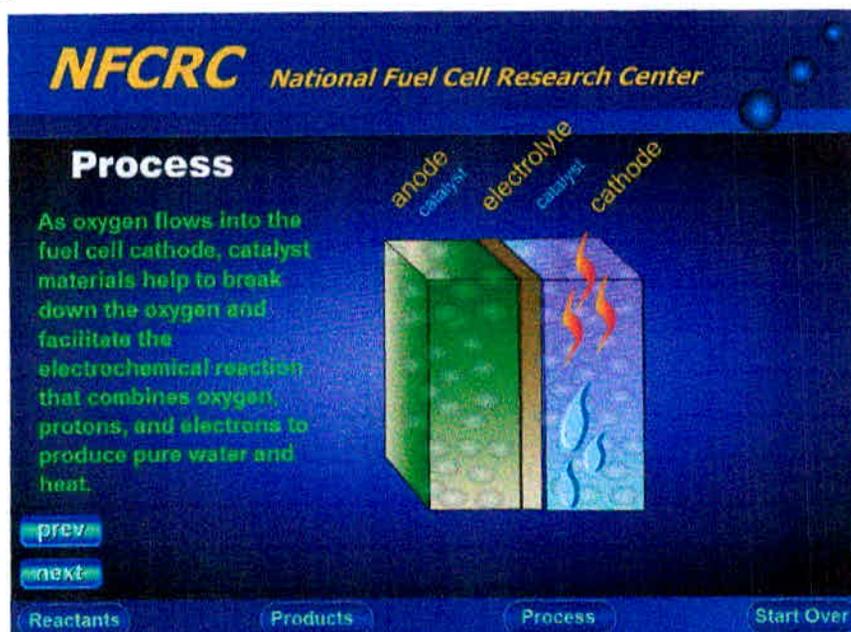


Figura 12: Processo de funcionamento 3 da Célula a Combustível

Fonte: http://www.nfcrc.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_animation.aspx

Um motor elétrico de um carro, por exemplo, funcionam em tensões entre 200 e 300 volts, porem uma unidade de célula a combustível fornece uma tensão de aproximadamente 1,16 volts, isso considerada na forma ideal, como a eficiência é sempre menor que 100%, a tensão fornecida é menor. Portanto para se chegar a tensão requerida é feito uma combinação das unidades de célula a combustível ligadas em série, formando o que é chamado de “pilha de células a combustível”. Um detalhe importante nessas pilhas de células a combustível é o uso do que é chamado de “placa bipolar”, que nada mais nada menos é usar uma placa que de um lado serve de cátodo para uma unidade e do outro lado servir de ânodo para outra unidade diminuindo assim o volume e peso total do conjunto. O material feito dessas placas deve ser feitas de materiais impermeáveis aos gases, caso não seja, pode ocorrer uma mistura explosiva.

Na figura abaixo podemos ver um exemplo esquemático de uma pilha de células a combustível.

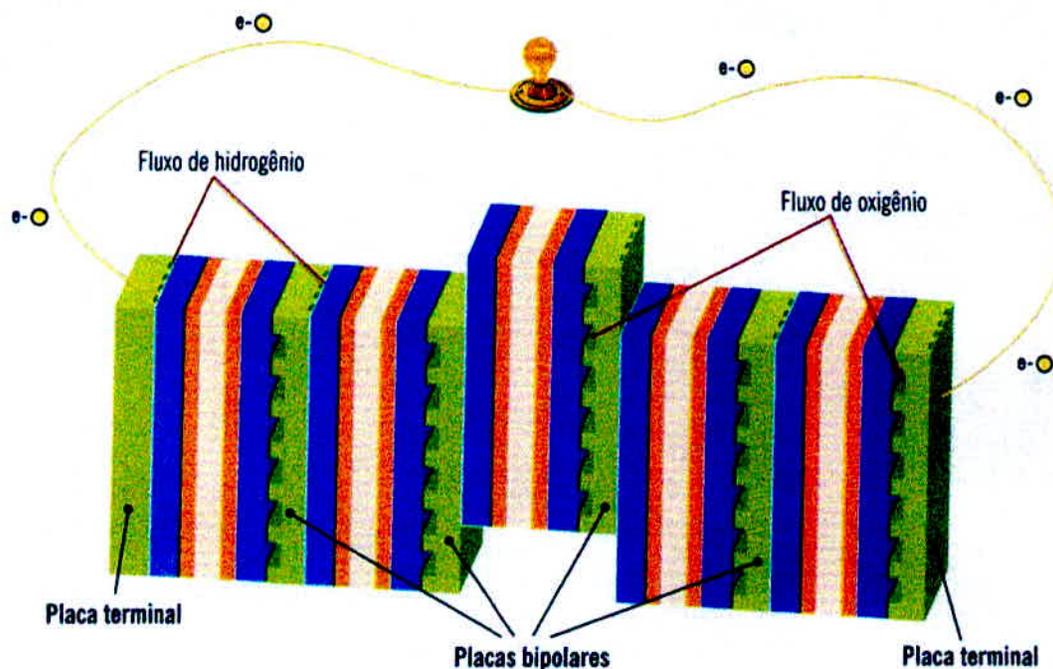


Figura 13: Pilha de Células a Combustível
 Fonte: HOFFMANN, Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir. p.101

3.3.2 Tecnologias de Células a Combustível

“Se você pensa que existe apenas um tipo de tecnologia de célula a combustível, está bem enganado! Existem pelo menos seis tecnologias principais que variam em tamanho, temperatura, combustível, eletrólito e aplicações.” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 154)

Vamos mostrar um pouco da história, características, principais aplicações, principais componentes, vantagens e desvantagens, o funcionamento, assim como as reações que ocorrem dentro de cada uma das principais tecnologias de células a combustível.

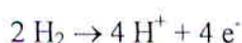
3.3.2.1 Membrana de Troca De Prótons

Conhecida como a sigla PEMFC que vem do nome inglês “Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, essa tecnologia é a preferida para aplicações em automóveis, equipamentos portáteis e para geração de energia em pequena escala, como para residências. Suas principais distinções são, operação a baixa temperatura e pressão (60 até 130 °C), e uso de uma membrana polimérica conhecida como PEM (Polymer Electrolyte Membrane).

Devido as aplicações e vários fatores é a mais pesquisada em todo o mundo, foi inventada pela General Electric na década de 50, e foi muito importante sendo usada em projetos espaciais da NASA. Antes da invenção dessa tecnologia, as células a combustíveis eram aplicadas sob condições extremas, como altas temperaturas, também requeriam materiais muito caros e só podiam ser utilizadas para aplicações estacionárias devido ao seu tamanho. A membrana polimérica utilizada é chamada de “Nafion” é produzida pela DuPont, que é líder no desenvolvimento dessas membranas, a Nafion possui uma grande performance e durabilidade para essa tecnologia.

Um ponto não favorável para essa tecnologia é o fato de ser necessário a utilização de um excelente catalisador como a platina, pois em temperaturas mais baixas as reações são mais lentas, sendo necessário acelerar as reações químicas, que é a função da platina. A platina é um metal nobre, raro e caro e é necessário o uso de hidrogênio com altíssima pureza, pois é facilmente contaminada pelo monóxido de carbono e enxofre.

Essa célula funciona da seguinte maneira; no lado do ânodo o combustível, gás hidrogênio, entra pressurizado atingindo o catalisador; o catalisador, que nesse caso normalmente é a platina, faz a separação do gás hidrogênio (H₂) em íons de hidrogênio (H⁺) e elétrons (e⁻) de acordo com a reação abaixo.



O eletrólito, onde normalmente é usada a membrana polimérica a Nafion, tem a função de permitir a passagem somente dos íons de hidrogênio. Os gases de hidrogênio que não foram quebrados pelo catalisador não passam pelo eletrólito, eles são realimentados até serem quebrados. Já os elétrons são conduzidos através do eletrodo, no lado do ânodo, formando uma corrente elétrica que flui pelo circuito externo no sentido do eletrodo positivo, no lado do cátodo, essa corrente elétrica é aproveitada para acender uma lâmpada, por exemplo. No cátodo o gás oxigênio entra sendo forçado a passar pelos canais de fluxo

atingindo o catalisador, onde as moléculas de oxigênio (O_2) combinam-se com os íons de hidrogênio e os elétrons, formando água (H_2O) de acordo com a reação abaixo.

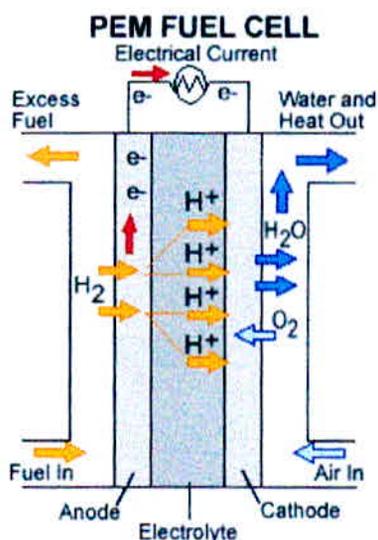
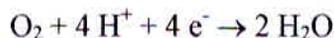
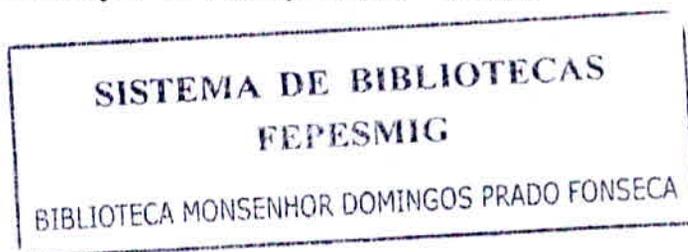


Figura 14: Esquema funcionamento da Célula conhecida como PEMFC
 Fonte: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html

A figura acima ajuda na compreensão do funcionamento da célula. Fazendo a tradução da mesma temos: Excess Fuel – Combustível em excesso; Electrical Current – Corrente elétrica; Water and Heat Out – Saída de água e calor; Fuel In – Entrada de combustível; Air In – Entrada de ar; Anode – Ânodo; Electrolyte – Eletrólito; Cathode – Cátodo.

3.3.2.2 Metanol Direto



“Direct-methanol Fuel Cell” (DMFC) ou Célula a Combustível de Metanol Direto é uma tecnologia de células a combustível onde é utilizado o metanol como combustível ao invés do hidrogênio puro.

O metanol (CH_3OH) é formado por átomos de carbono, oxigênio e hidrogênio, no processo temos a formação apenas de água e gás carbono como veremos adiante. O metanol é uma substância tóxica, porém nesse processo ele fica diluído em água e em baixíssimas concentrações, abaixo dos 30%. Não necessita ser armazenado sob altíssimas pressões como o hidrogênio gasoso, pois se encontra no estado líquido e comparando ainda com o hidrogênio

gasoso, armazena mais hidrogênio em sua estrutura, para um mesmo volume, que o hidrogênio no estado gasoso.

O que diferencia esse processo do funcionamento básico de uma célula a combustível é o fato de se usar o metanol diretamente, ou seja, o metanol é que sofre a oxidação pela platina ao invés do hidrogênio. E como já sabemos, a platina é facilmente contaminada pelo monóxido de carbono, por isso além da platina, existem outras substâncias como o rutênio e o ouro que serve para converter o monóxido de carbono, liberado pela reação do metanol, em dióxido de carbono. Nessa tecnologia o metanol fica armazenado em cartuchos que podem ser trocados ou reabastecidos.

A figura abaixo ajuda na compreensão do funcionamento da célula.

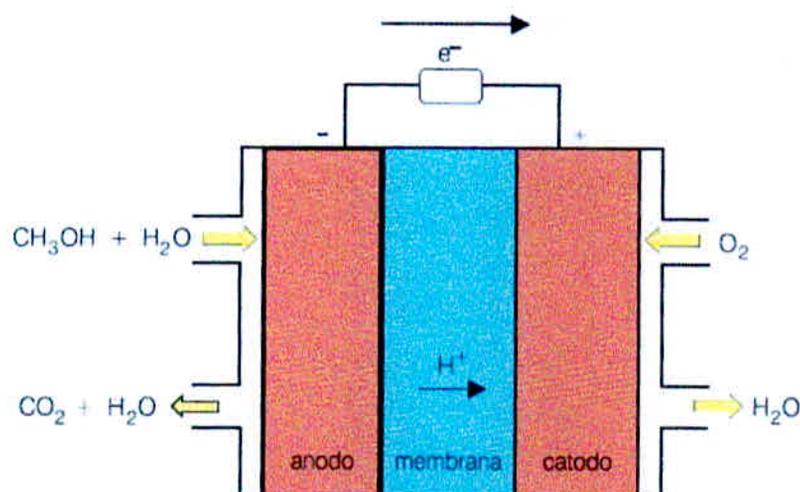
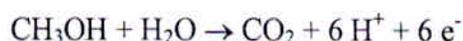


Figura 15: Esquema funcionamento da Célula conhecida como DMFC
 Fonte: Revista Química Nova na Escola. Nº 15, Maio 2002. Células a Combustível. p. 32

O funcionamento dessas células se baseia na tecnologia das PEMFC, utilizam o mesmo eletrólito que é membrana e operam a uma mesma faixa de temperatura. No ânodo o líquido metanol (CH_3OH) é oxidado, na presença de água (H_2O), pela platina, junto com o rutênio, gerando gás carbônico (CO_2) no próprio ânodo, de acordo com a reação abaixo. Os íons de hidrogênio e os elétrons que são gerados na mesma reação seguem seu caminho, igual às células de membrana de troca de prótons (PEMFC). Assim como o restante do funcionamento é igual.



3.3.2.3 Ácido Fosfórico

A Célula a Combustível de Ácido Fosfórico ou “Phosphoric Acid Fuel Cell” (PAFC) utilizam o ácido fosfórico líquido (H_3PO_4) como eletrólito, por isso são chamadas assim. Opera com temperaturas entre 160 °C e 240 °C e também utiliza a platina como catalisador, porém diferentemente da PEMFC pode tolerar algumas impurezas como o monóxido de carbono e o enxofre, pois opera numa temperatura mais elevada.

Para o funcionamento dessas células é necessário o uso de um reformador e um purificador, o primeiro para obter o hidrogênio e o segundo para eliminar o excesso de impurezas. Devido a maior temperatura e ao uso do reformador e purificador essa tecnologia é mais flexível para a utilização de diferentes combustíveis, como o gás natural ou biogás. Porém possui uma menor eficiência se comparada com as outras tecnologias, entre 35 e 47%. Em virtude do processo de reforma do combustível ficar numa temperatura entre 450 e 500 °C, e o vapor da água produzido pela célula atingir somente 200 °C é necessário queimar parte do combustível para alcançar essa temperatura, levando a uma menor eficiência. Outra desvantagem é o fato de emitir dióxido de carbono, já que consomem hidrocarbonetos, mas se comparada com as tecnologias tradicionais de queima desses hidrocarbonetos é menor a poluição.

Devido principalmente a flexibilidade na utilização de combustíveis é a tecnologia mais avançada comercialmente, utilizada principalmente em indústrias, hospitais, hotéis, escolas, aeroportos e outros. Além da potência elétrica fornecida é utilizado também o calor produzido para aquecer caldeiras e água de refeitórios, por exemplo.

O funcionamento é semelhante à PEMFC, onde o combustível, que pode ser um pouco mais tolerante ao uso, não necessariamente hidrogênio 100% puro, entra pelo lado do ânodo separando o gás em íons de hidrogênio e elétrons, através do catalisador. Nesse caso os eletrodos são de grafite porosas que são adicionadas platina. Os elétrons geram energia elétrica percorrendo o circuito externo, igual na PEMFC. E os íons atravessam a camada do eletrólito, que é de ácido fosfórico líquido, esse eletrólito líquido fica contido numa malha de carboneto de silício e teflon. Depois, no lado do cátodo os íons de hidrogênio reagem com as moléculas de hidrogênio, formando água, igual ao PEMFC. Assim como as reações que ocorrem são as mesmas também.

A figura abaixo ajuda na compreensão do funcionamento da célula. Fazendo a tradução da mesma temos: Excess Fuel – Combustível em excesso; Electrical Current – Corrente elétrica; Water and Heat Out – Saída de água e calor; Fuel In – Entrada de combustível; Air In – Entrada de ar; Anode – Ânodo; Electrolyte – Eletrólito; Cathode – Cátodo.

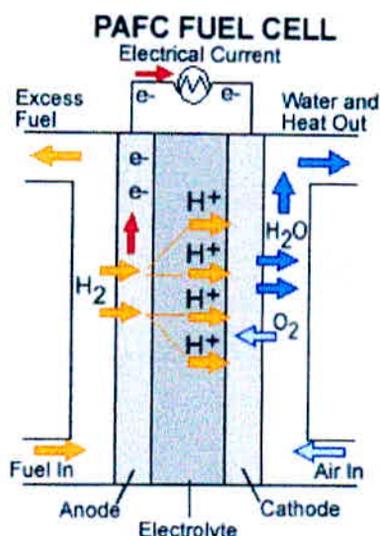


Figura 16: Esquema funcionamento da Célula conhecida como PAFC
 Fonte: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html

3.3.2.4 Óxido Sólido

A Célula a Combustível de Óxido Sólido, do inglês “Solid Oxide Fuel Cell” (SOFC) é uma grande promessa na geração de energia em residências e em indústrias principalmente.

O funcionamento difere um pouco do básico devido ao fato de serem os íons de oxigênio que fluem pelo eletrólito, diferentemente da tecnologia PEMFC, por exemplo, onde são os íons de hidrogênio que atravessam o eletrólito. Nesse processo a formação da água e a liberação de elétrons ocorrem no ânodo. Também é necessária a reforma do combustível a ser utilizado, já que nessa célula a temperatura de trabalho é muito grande entre 600 e 1000 °C, o próprio vapor da água gerado por esse processo pode realizar essa reforma.

Dentre as vantagens podemos destacar, pelo fato de operar em maior temperatura não é necessário o uso de um catalisador tão bom como a platina, pois a alta temperatura já ajuda a aumentar as reações químicas, assim o níquel pode ser usado que é mais barato. O níquel também tem a vantagem de não ser tão sensível ao monóxido de carbono e ao enxofre,

possibilitando uma maior variedade de utilização de combustíveis como biogás, gás natural e etanol diretamente na célula.

Se utilizados os combustíveis acima citados, são emitidos dióxido de carbono, porém comparando com as tradicionais tecnologias, são menos poluidoras. O funcionamento em altas temperaturas trás também desvantagens que são os materiais usados na construção têm que ser mais resistentes a temperatura e o início para o funcionamento é mais lento, até chegar a temperatura de operação.

Como falado no começo, são grandes promessas para utilização em residências e indústrias, pois têm uma grande eficiência para produção de energia, entre 50 e 60%. Mais devido ao grande calor gerado se aproveitarmos a eficiência total de energia elétrica mais energia térmica pode chegar até 75 a 85%.

A figura abaixo ajuda na compreensão do funcionamento da célula. Fazendo a tradução da mesma temos: Excess Fuel and Water – Combustível em excesso e água; Electrical Current – Corrente elétrica; Unused Gases Out – Saída de gases inutilizados; Fuel In – Entrada de combustível; Air In – Entrada de ar; Anode – Ânodo; Electrolyte – Eletrólito; Cathode – Cátodo.

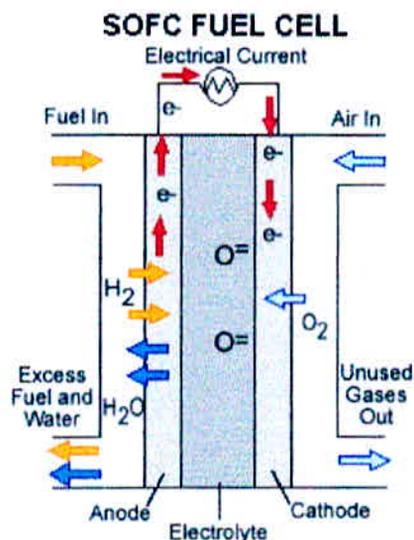
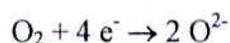


Figura 17: Esquema funcionamento da Célula conhecida como SOFC
 Fonte: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html

Essas células a combustível mudam no processo de funcionamento em relação às anteriores, inicia-se no lado do cátodo, onde entra ar ou oxigênio puro, no caso do ar é aproveitado apenas o oxigênio presente, eliminando os gases não utilizados. No cátodo o gás oxigênio (O₂) é reduzido para íons de oxigênio (O²⁻), de acordo com a reação abaixo.



Como a célula trabalha a uma alta temperatura, não há a necessidade de um ótimo catalisador podendo ser usado o níquel. No eletrólito, onde é usado um material óxido sólido ou cerâmico, permite que os íons de oxigênio gerados possam fluir para o ânodo. Esse material óxido sólido ou cerâmico só se torna eletricamente e ionicamente ativo há uma temperatura bem elevada, como consequência a célula tem que operar a temperaturas entre 600 e 1000 °C, portanto quanto mais baixa a temperatura, menor a performance da célula. No lado do ânodo, os íons de oxigênio fazem a oxidação do gás hidrogênio, produzindo água e liberando elétrons, de acordo com a reação abaixo.



A energia é gerada pelos elétrons liberados na reação, que são conduzidos num circuito externo que vai até o cátodo. No caso de ser usado um combustível que não seja hidrogênio puro, no próprio ânodo se faz a reforma desse combustível em hidrogênio, devido a alta temperatura de trabalho.

3.3.2.5 Carbonato Fundido

“Carbonato fundido são sais como o carbonato de sódio, lítio ou potássio – ou a combinação destes – que se fundem em alta temperatura (ficam no estado líquido) e geram íons de carbonato (CO_3^{2-}).” (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, p. 158)

Seu nome em inglês é “Molten Carbonate Fuel Cell” (MCFC), essa tecnologia é muito promissora para aplicações de grande potência, acima de 1 Mega Watt (MW).

São semelhantes a tecnologia SOFC pois trabalha em alta temperatura, não necessitam do uso da platina como catalisador, resistentes a impurezas, não é necessário o uso de um reformador, é flexível quanto ao uso de combustíveis e o fluxo de íons é do cátodo para o ânodo.

A eficiência pode chegar aos 85%, que nem no SOFC, quando utilizando o calor, seja para aquecimento ou para produção de mais energia elétrica através de uma turbina a vapor.

A figura abaixo ajuda na compreensão do funcionamento da célula. Fazendo a tradução da mesma temos: Hydrogen In – Entrada de hidrogênio; Oxygen In – Entrada de oxigênio; Water and Heat Out – Saída de água e calor; Carbon Dioxide In – Entrada de dióxido de carbono; Electrical Current – Corrente elétrica; Anode – Ânodo; Electrolyte – Eletrólito; Cathode – Cátodo.

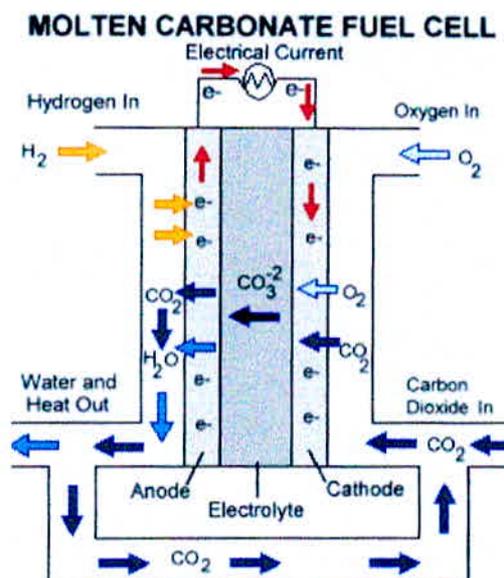
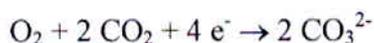
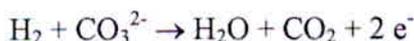


Figura 18: Esquema funcionamento da Célula conhecida como MCFC
 Fonte: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html

O funcionamento se inicia pela entrada de oxigênio (O_2) e gás carbono (CO_2) no lado do cátodo, onde ocorre a reação entre esses gases que resulta na geração de íons de carbonato (CO_3^{2-}), de acordo com a reação abaixo.



Para esse processo não é necessário um ótimo catalisador, sendo mais usado o níquel. Os íons de carbonato formados fluem pelo eletrólito do cátodo para o ânodo, no eletrólito são usados comumente duas misturas de carbonatos alcalinos como, carbonato de lítio e carbonato de potássio ou carbonato de lítio e carbonato de sódio. No ânodo esses íons de carbonato se combinam com o hidrogênio (H_2) resultando a formação de água (H_2O), gás carbono (CO_2) e elétrons de acordo com a reação abaixo.



O gás carbono gerado no ânodo pode ser coletado por um sistema apropriado, levando esses gases para serem usados no processo de reação no cátodo. E os elétrons formados passam por um circuito externo gerando energia elétrica.

3.3.2.6 Alcalina

A principal característica, que é de onde vem o nome, é a utilização de eletrólitos alcalinos ao invés de eletrólitos ácidos. A Célula a Combustível Alcalina ou do inglês “Alkaline Fuel Cell” (AFC), utilizam uma solução alcalina e aquosa de hidróxido de potássio (KOH). Operam a uma temperatura entre 50 e 250 °C, sendo que quanto menor a temperatura menor a concentração de hidróxido de potássio e maiores temperatura, mais concentrado. Com eficiência entre 45 e 60%, chegando a 75% quando aproveitado o calor, essa tecnologia vem sendo muito usada para aplicações espaciais da NASA.

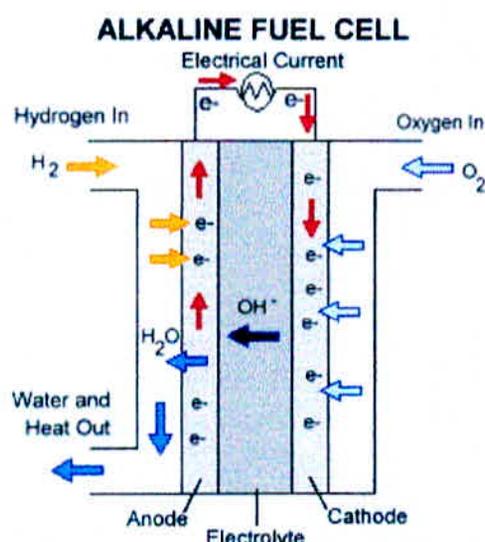
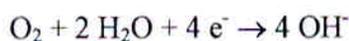


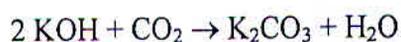
Figura 19: Esquema funcionamento da Célula conhecida como AFC
 Fonte: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html

A figura acima ajuda na compreensão do funcionamento da célula. Fazendo a tradução da mesma temos: Hydrogen In – Entrada de hidrogênio; Oxygen In – Entrada de oxigênio; Water and Heat Out – Saída de água e calor; Electrical Current – Corrente elétrica; Anode – Ânodo; Electrolyte – Eletrólito; Cathode – Cátodo.

No processo de funcionamento dessa célula deve ser usado oxigênio puro ou então incorporar um purificar no processo para retirar do ar o máximo de gás carbônico possível. Esse ar entra no lado do cátodo que em meio líquido, em presença de água (H₂O), reage com os elétrons (e⁻) liberados no lado do anodo, produzindo íons de hidróxido (OH⁻), de acordo com a reação abaixo.



A solução de hidróxido de potássio (KOH), o eletrólito, tem a função de levar os íons de hidróxido do cátodo para o ânodo, essa solução é extremamente sensível ao gás carbônico, convertendo esse eletrólito em carbonato de potássio (K_2CO_3), de acordo com a reação abaixo.



A formação desse carbonato de potássio bloqueia os poros do cátodo, reduzindo a condutividade iônica do eletrólito e conseqüentemente reduzindo sua eficiência. Com a passagem dos íons de hidróxido para o lado do ânodo, este vai reagir-se com o hidrogênio que é alimentado neste lado, produzindo água e elétrons, que percorrendo um circuito externo gera energia elétrica de acordo com a reação abaixo.



4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Hidrogênio

Com a pesquisa e o estudo dos meios de produção, transporte e armazenamento do hidrogênio podemos concluir que:

- Em relação as meios de produção, devemos fazer um estudo e um levantamento dos recursos que cada região nos oferece, adotando assim os processos mais viáveis para aquela região. Como vimos no Brasil, por exemplo, que tem um grande potencial hídrico, podemos utilizar os períodos de grande oferta de água para gerar energia elétrica a ser usada no processo de eletrólise para obtenção do hidrogênio. Assim podemos falar também, da obtenção do hidrogênio a partir dos biocombustíveis, que no Brasil é responsável em mais de 1/4 na geração de energia através dos mesmos.
- Em relação as meios de distribuição e transporte, deve ser analisada qual a demanda requerida de volume de hidrogênio, para assim analisar a necessidade de investimento em tecnologias mais avançada, porem caras, que atendem a necessidade de consumo desse hidrogênio, chegando assim a um melhor custo beneficio.
- E em relação ao armazenamento desse combustível, deve ser analisadas questões como, capacidade, o espaço disponível, a segurança necessária, o peso do equipamento ou recipiente, e a forma que vai ser armazenado esse combustível, seja gasosa, líquida ou sólida. Em um automóvel, por exemplo, o espaço e o peso são muito importantes, o menor e mais leve possível, devem oferecer segurança ao motorista e passageiros e deve ter uma boa autonomia, que seria a capacidade de armazenar uma grande quantia de hidrogênio.

4.2 Células a Combustível

Existem várias tecnologias de células a combustível devido às particularidades de sua aplicação. Em um automóvel, por exemplo, é fundamental o uso de células de baixas temperaturas, pois são necessárias que comecem a funcionar rapidamente. Já na geração de

energia para uma indústria, por exemplo, pode se usar células a combustível de altas temperaturas, onde demoram a iniciar seu funcionamento, sendo vantajoso também aproveitarem seu vapor de água quente para utilização em um gerador a vapor, ou mesmo no aquecimento da água.

Por isso não podemos julgar qual a melhor e qual a pior tecnologia de células a combustível, temos que analisá-las no conceito da sua aplicação. As tecnologias são desenvolvidas focando determinadas aplicações onde elas são pesquisadas e estudadas para aquele determinado tipo de aplicação.

Dentro dos setores de transporte e geração de energia, acompanhando os avanços tanto em pesquisas como em experiências de células a combustíveis para esses setores, podemos ter uma perspectiva muito boa do futuro dessas células no mercado. Essas tecnologias apresentam eficiência superior, menores custos de manutenção, além do mais importante, na maioria dos casos não poluem o meio ambiente, e quando poluem em comparação com as tecnologias usadas hoje, é significativamente inferior.

4.2.1 Comparativo das Tecnologias

A tabela abaixo mostra um resumo e comparativo, contendo o eletrólito comum usado, temperatura de operação, potência de saída, eficiências, principais aplicações, vantagens e desvantagens, entre as principais células a combustível existentes.

Os valores de temperatura, potência e eficiência são aproximados e não incluem todos os casos, podem existir tecnologias fora dos valores dessa tabela, dependendo muito da aplicação.

Tabela comparativa de algumas características, vantagens e desvantagens das 6 tecnologias de células a combustível apresentadas.

Tabela 03 – Comparativo das Principais Tecnologias de Células a Combustível

Tipo de Célula	Eletrolito Comum	Temperatura de operação	Potência de saída	Eficiência Elétrica	Eficiência Elétrica e Calor	Principais Aplicações	Vantagens	Desvantagens
PEMFC	Membrana Polimérica	60 a 140 °C	1 kW - 250 kW	35% a 55%	70% a 90%	-Automóveis -Aparelhos Portáteis -Geração de energia estacionária	-Baixa temperatura de trabalho -Ampla gama de aplicações	-Custo do eletrólito e catalisador -Uso de hidrogênio altamente puro
DMFC	Membrana Polimérica	50 a 200 °C	1 kW - 100 kW	40 % a 50%	60% a 80%	-Aparelhos Portáteis	-Concentração maior de hidrogênio	-Uso de outras substâncias para controle de (CO)
PAFC	Ácido fosfórico líquido	160 a 240 °C	50 kW - 1 MW	35% a 47%	Aproximadamente 80%	-Geração de energia estacionária	-Alta eficiência -Maior tolerância ao (CO)	-Necessário Reforma do Combustível -Emite gás carbônico
SOFC	Óxido de Zircônia sólido	600 a 1000 °C	1 kW - 3 MW	50% a 60%	75% a 85%	-Energia Auxiliar -Distribuição de Energia	-Alta eficiência -Flexibilidade de combustível -Não é necessário um ótimo catalisador	-Altíssima Temperatura -Demora para início do funcionamento -Uso de materiais resistentes
MCFC	Solução líquida de lítio, sódio, carbonatos de potássio	600 a 800 °C	1 kW - 1 MW	Aproximadamente 47%	Aproximadamente 80%	-Distribuição de energia -Geração de energia estacionária	-Aproveitamento do calor -Alta eficiência -Flexibilidade de combustível	-Alta temperatura -Materiais para construção -Emite gás carbônico
AFC	Solução de Hidróxido de Potássio	50 a 250 °C	10 kW - 100 kW	45% a 60%	Aproximadamente 75%	-Aplicação militar e espacial	-Reação mais rápida devido ao eletrólito -Uso de vários tipos de catalisador	-Necessário gases 100% puros -Sensível ao gás carbônico

Fonte: Copilada pelo autor

4.2.2 Principais Aplicações

Dentre as aplicações das células a combustível muitas já foram desenvolvidas e são utilizadas, outras vêm sendo estudadas e desenvolvidas. É muito amplo o mercado de aplicações das células a combustíveis, pois elas podem substituir, por exemplo, as baterias de dispositivos portáteis, motores de combustão em automóveis e outros tipos de transporte, geração de energia autônoma e outras. Num futuro breve elas farão parte do dia-dia das pessoas, como carros, celulares, notebooks e até mesmo na geração de energia das próprias residências.

4.2.2.1 Transportes



Pode ser considerada como a principal aplicação para as células a combustíveis, principalmente se falando em automóveis. Além dos carros também temos motocicletas, aviões, ônibus, locomotivas, metrô, barcos, submarinos e outros que estão sendo desenvolvidas tecnologias para aplicação das células.

No setor automobilístico, grandes empresas estão investindo muito dinheiro no desenvolvimento da tecnologia. As principais exigências dos consumidores hoje são segurança, conforto, alta performance que ao mesmo tempo têm que ser econômicos e não prejudiciais ao meio ambiente. Os veículos de hoje tem características de baixa eficiência, cerca de 15% a 25% (gasolina ou álcool) e de 30% a 35% (diesel), poluem o meio ambiente, possuem muitos barulhos e vibrações, utilizam óleos lubrificantes que são prejudiciais ao meio ambiente, possuem uma manutenção relativamente cara, entre outras. E os veículos do futuro utilizando células a combustível poderão sofrer várias mudanças, principalmente no sistema de transmissão, podendo apresentar um motor elétrico em cada roda, eliminando perdas de energia por parte desse sistema que produz muita vibração e atrito. Acoplando o motor elétrico diretamente a roda, podemos eliminar quaisquer perdas de energia, obtendo uma eficiência maior, além de favorecer modelos e desenhos muito diferentes do padrão que temos hoje. Vários carros conceito já foram apresentados onde mostram explicitamente às mudanças nos desenhos e na construção dos mesmos não só em relação às células a combustível, mais também a tecnologias, por exemplo, como o "x-by-wire" eliminando

sistemas de transmissão de cabos, tubos para fluidos, eixos, e outros para os controles do freio, acelerador e direção, onde são controlados eletronicamente.

A imagem abaixo mostra um projeto de carro conceito criado pela GM em 2002 que exemplifica bem o que falamos acima das mudanças no desenho e na construção dos carros com essa tecnologia.

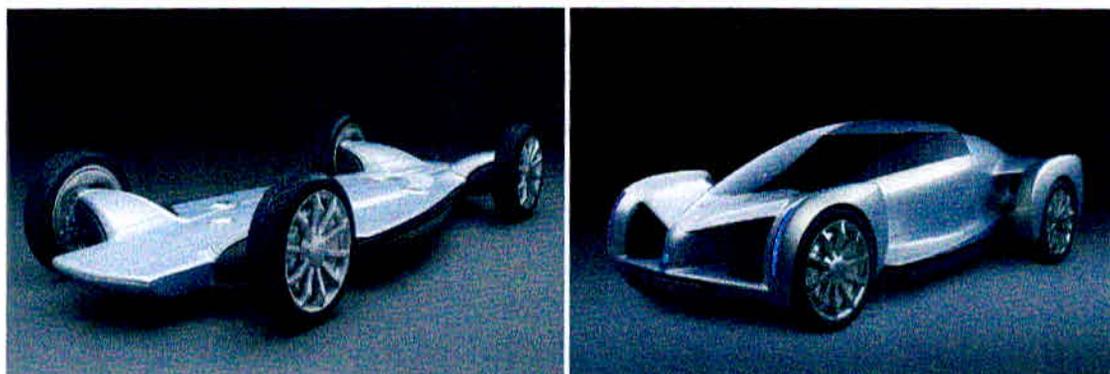


Figura 20: AUTOonomy, carro conceito da GM

Fonte: <http://www.canadiandriver.com/news/2002/020108na-3.htm>

Atualmente, em países mais desenvolvidos, vários veículos com essa tecnologia já estão rodando nas ruas, podemos encontrar também postos de abastecimento de hidrogênio. Projetos de construção das “Estradas do Hidrogênio” estão sendo desenvolvido por empresas de energia que procuram oferecer conforto e infra-estrutura aos consumidores que desejam utilizar esses veículos. Postos de hidrogênio, centrais de produção e centrais de armazenamento e distribuição irão compor essas “Estradas do Hidrogênio.

4.2.2.2 Portáteis

Outra conquista importante que se quer chegar com as células a combustível é a substituição das tradicionais pilhas e baterias usadas em equipamentos eletrônicos como celulares, laptops, lanternas e na própria geração de energia de forma remota. Imagine recarregar seu laptop, celular, e outros dispositivos portáteis em poucos minutos apenas completando um reservatório ou substituindo, conteúdo metanol diluído em água, concentração de cerca de 30%. É isso que varias empresas estão buscando desenvolver para

serem usadas em seus produtos, a tecnologia que obtém energia através do metanol é a célula a combustível de metanol direto (DMFC).

A figura abaixo mostra 2 exemplos de equipamentos portáteis utilizando as células a combustível, um laptop produzido pela fabricante Fujitsu Laboratories e uma fonte de energia portátil fabricado pela Voller Energy.

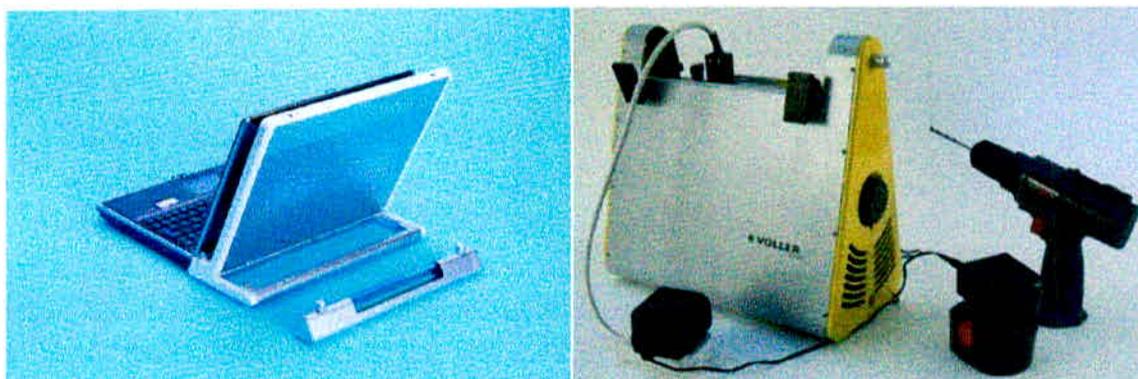


Figura 21: Laptop com célula a combustível da Fujitsu Laboratories e Célula a Combustível portátil da Voller Energy.

Fonte: <http://www.fuelcelltoday.com/reference/image-bank/Portable/Fujitsu-DMFC-Laptop> e <http://www.gizmag.com/go/2870/>

4.2.2.3 Geradores

Outra aplicação inovadora e bem interessante é a geração de energia para residências, comércio e indústrias. São geradores de energia que usam a tecnologia das células a combustível, onde em comparação com geradores comuns como a diesel e turbinas a vapor, são mais silenciosos, menos ou até não poluidores e mais eficientes. Um processo interessante e que pode ser utilizado para um maior aproveitamento das células a combustível, é conhecido como co-geração de energia, que seria o aproveitamento tanto da energia elétrica como a energia térmica produzida pelas células. Como sabemos, com o processo eletroquímico que ocorrem dentro das células, é gerado calor, onde podemos utilizar para o aquecimento da água, por exemplo, ou então operar juntamente com turbinas a vapor, aproveitando o vapor da água quente liberado pelo processo na alimentação de turbinas a vapor.

Abaixo podemos ver num modelo comercializado pela Horizon Fuel Cell Technologies, uma empresa que desenvolve e produz células a combustível para várias

aplicações, desde pequeno porte 12 W até 5000 W. A célula apresentada na figura abaixo possui características como:

- Tipo de tecnologia – PEMFC
- Numero de Células – 120
- Potência – 5000 W
- Voltagem de saída – 64 V a 114 V
- Peso – 17 kg
- Reagentes – Hidrogênio e ar, sendo que requer 99,999% de pureza do hidrogênio
- Consumo de H₂ – 70 l/min
- Pressão do hidrogênio – De 0,5 a 0,6 bar
- Temperatura Máxima – 65 °C
- Eficiência do sistema – 40% quando utilizado voltagem de saída de 72 V.

H-5000

FCS-B5000

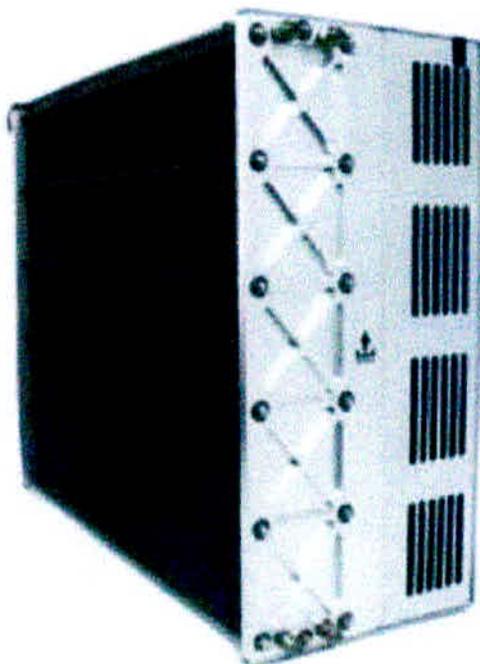


Figura 22: Célula a combustível H-5000 da Horizon Fuel Cell Technologies
Fonte: Catálogo de Produtos da Horizon Fuel Cell Technologies. Catálogo H-Series. Versão 1.6

4.3 Sistema Auto-Sustentável

Neste tópico vamos abordar um exemplo de um possível sistema de geração de energia, utilizado numa residência sendo parcialmente ou até totalmente auto-sustentável, ou seja, não necessita comprar energia de uma central de distribuição, como a Cemig.

Vamos imaginar uma casa que possui seu próprio sistema de geração de energia a partir de uma fonte renovável, limpa e gratuita como o vento e o sol. Para captar energia do vento é necessário um aro gerador, e para captar a energia do sol é necessário um painel solar Fotovoltaico. Dependendo da região onde a residência está instalada, vai favorecer mais um ou outro sistema. E também, nessa casa, possui uma unidade de geração de energia com a tecnologia das células a combustível.

A energia produzida pelos aros geradores e painéis fotovoltaicos, serão utilizadas para produção do hidrogênio através da eletrólise da água, podendo ser até água de um açude perto da casa. É claro essa energia também será utilizada nos aparelhos elétricos da casa, pois é mais eficiente seu uso direto, do que seu uso indireto, ou seja, produzindo hidrogênio para utilização nas células a combustível. Portanto essa casa contará com um sistema inteligente para aproveitamento da energia, ou seja, de toda energia demandada pelos aros geradores e painéis fotovoltaicos que não estiver sendo utilizada, para o consumo dos aparelhos da residência, serão aproveitadas para a produção e armazenamento do hidrogênio.

Esse hidrogênio armazenado poderá ser utilizado na geração de energia, através das células a combustível, num horário de pico, quando os outros sistemas de energia não forem capazes de gerar toda energia requerida pela residência. Esse hidrogênio também poderá abastecer os veículos, com a tecnologia de células a combustível, da família, como também recarregar rapidamente os equipamentos portáteis, com a mesma tecnologia.

O funcionamento do gerador de energia com base nas células a combustível gera calor, que pode ser usado para o aquecimento da água, ao invés de resistências elétricas, economizando energia.

A figura abaixo mostra um esquema do sistema proposto acima para uma melhor compreensão.

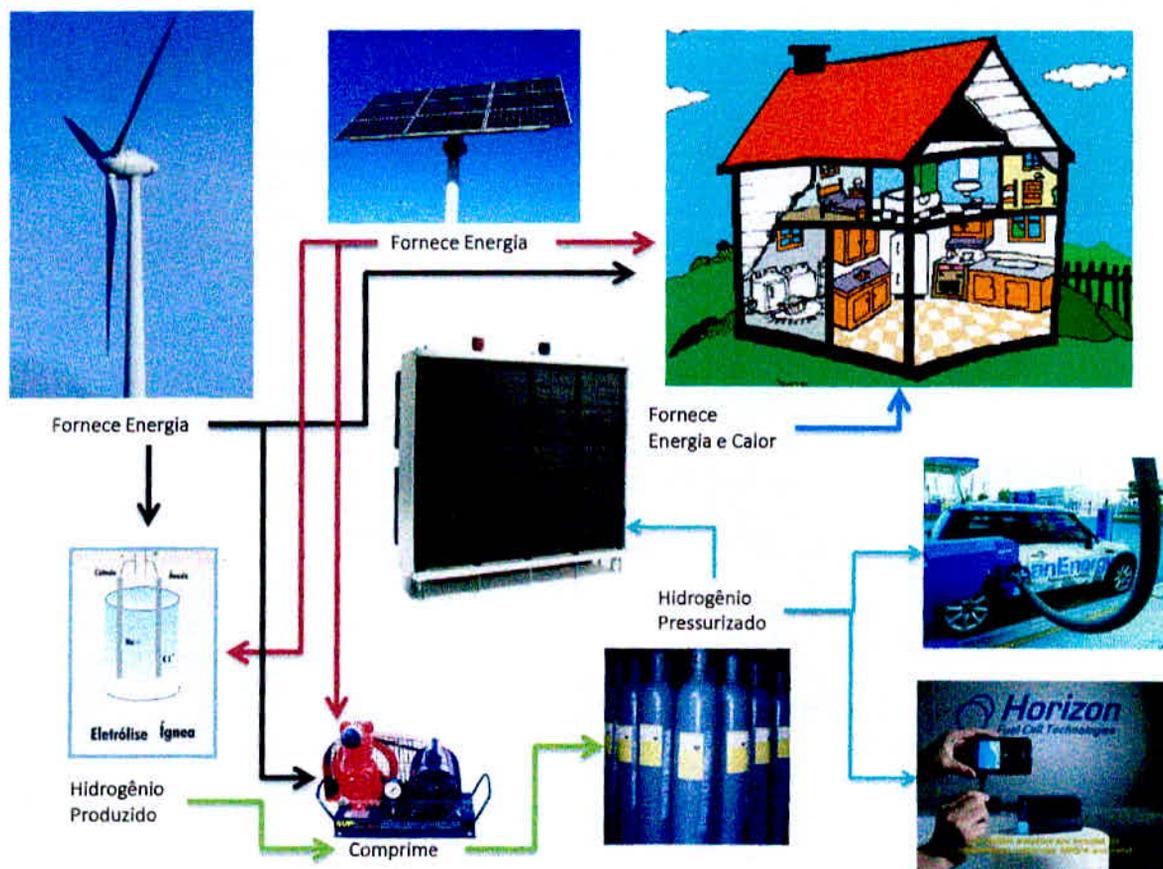


Figura 23: Diagrama sistema auto-sustentável
 Fonte: Copilada pelo autor, Eduardo Rodrigues Rezende

Nesse exemplo podemos ver a importância dessas tecnologias, das células a combustível, em várias aplicações do dia-a-dia das pessoas. Permitindo no futuro que as pessoas não dependam mais tanto de empresas de produção e distribuição de energia, e que o mundo inteiro não pare quando ocorrer a escassez das fontes de energias e combustíveis fósseis, como a gasolina e o gás natural.

CONCLUSÃO

Todas as propriedades e características que vimos nesse trabalho sobre o hidrogênio e as células a combustível levam-nos a uma possível evolução tecnológica, principalmente nos setores de transporte e geração de energia, com base no uso do hidrogênio e das células a combustíveis. E os problemas enfrentados hoje em dia pela poluição do nosso planeta é um fator importante para busca de novas tecnologias que não agravam esse problema.

O hidrogênio possui um grande potencial para a substituição dos combustíveis fósseis, porém devemos superar barreiras como sua produção em larga escala, a distribuição e transporte para sua utilização e o armazenamento do mesmo, como apresentamos nesse trabalho. Deve se investir em uma infra-estrutura a altura da que já existe dos combustíveis fósseis para sua substituição.

As células a combustível são muito interessantes para aplicações em vários setores que utilizam tecnologias pouco eficientes e poluidoras. Porém também apresentam obstáculos a serem vencidos, como alto custo, procura de novos materiais e novas pesquisas, além de depender diretamente, em muitos casos, da infra-estrutura do hidrogênio.

Muitos países, governos, instituições de pesquisa, grandes empresas, entre outras estão apoiando essa nova tecnologia. Mostrando assim a importância desse assunto e principalmente a certeza de que é uma tecnologia importante e revolucionária.

Podemos já ver hoje no mercado vários protótipos de carros, motos, ônibus, equipamentos portáteis, geração de energia estacionária e portátil, como vários outros. E todos com um mesmo pensamento, de dentro de alguns anos estar comercializando esse produtos para todas as pessoas.

Alguns países e governos, principalmente que apóiam a preservação ambiental e cuidam para a diminuição da poluição, estão investindo em pesquisas e tecnologias juntamente com grandes empresas da área, para utilização dessas tecnologias em transportes públicos, incentivando assim a utilização das células a combustíveis.

Podemos esperar num futuro próximo essas tecnologias ao nosso alcance para utilização na nossa residência, nos nossos automóveis e outros. Expectativas mostram que dentro de 5 a 10 anos esse assunto se tornará muito mais comum e acessível a uma boa parte da população.

REFERÊNCIAS

HOFFMANN, Emilio Gomes Neto – Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba: BRASIL H2 FUEL CELL ENERGY, 2005. 240p., il.

EG&G Technical Services, Inc. – Fuel Cell Handbook. 7º Edição. U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory. P.O. Box 880 Morgantown, West Virginia. Novembro 2004.

SANTOS, Fernando António Castilho Mamede dos e SANTOS, Fernando Miguel Soares Mamede dos. – Células de Combustível. Artigo publicado na revista Millenium nº 29 do Instituto Politécnico de Viseu. Viseu, Portugal. Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millenium/Millenium29/21.pdf>> Acesso em 07 de ago. 2010

SANTOS, Fernando Miguel Soares Mamede dos e SANTOS, Fernando António Castilho Mamede dos. – Combustível “Hidrogénio”. Artigo publicado na revista Millenium nº 31 do Instituto Politécnico de Viseu. Viseu, Portugal. Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millenium/Millenium31/15.pdf>> Acesso em 11 de ago. 2010

ALMEIDA, Anibal Traça de – Hidrogénio como Combustível. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal Disponível em: <<http://www.jsd.pt/novoportugal/documentos/1252525802734412221.pdf>> Acesso em 01 de ago. 2010

LOPES, Alexandre de Oliveira; SANTOS, Jander Pereira. Funcionamento das células a combustível de hidrogênio e aplicações. Revista Interação, Varginha, V.11, Nº 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 04 de nov. 2010

BRANDÃO, M.O. Termodinâmica e simulação de sistemas de células a combustível, potencial gerador elétrico para aplicações estacionárias e automotivas. Programa de Engenharia Mecânica COPPE/UFRJ. Disponível em:

<<http://recyt.ibict.br/files/PremioMercosul/PremioJovemPesquisador/TrabalhoJP23.pdf>>

Acesso em 10 de set. 2010

Artigos, trabalhos e pesquisas produzidas para o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento CEMIG/ANEEL.

Intelligent Energy – <<http://www.intelligent-energy.com/>>. Acesso em 01 de out. 2010

Fuel Cell Today – <<http://www.fuelcelltoday.com/>> Acesso em 05 de out. 2010

Daimler AG. Companhia com vários setores entre eles o automotivo - <<http://www.daimler.com/technology-and-innovation/drive-technologies/fuel-cell>> Acesso em 25 de nov. 2010

General Motors Company. Companhia com vários setores entre eles o automotivo - <<http://www.gm.com/vehicles/innovation/fuel-cells/>> Acesso em 26 de nov. 2010

<http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell> Acesso em 08 de nov. 2010

<http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_methanol_fuel_cell> Acesso em 08 de nov. 2010

<http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric_acid_fuel_cell> Acesso em 08 de nov. 2010

<http://en.wikipedia.org/wiki/Molten_carbonate_fuel_cell> Acesso em 08 de nov. 2010

<http://en.wikipedia.org/wiki/Solid_oxide_fuel_cell> Acesso em 09 de nov. 2010

<http://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline_fuel_cell> Acesso em 09 de nov. 2010

<<http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/tipos.html>> Acesso em 17 de nov. 2010

<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html> Acesso em 20 de out. 2010

<http://www.fctec.com/fctec_types.asp> Acesso em 20 de out. 2010