

Instituto de Física

Licenciatura Noturna de Física



**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE  
CURSO**

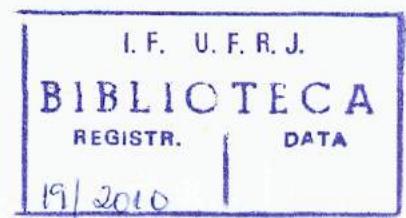
**CÉLULAS A COMBUSTÍVEL, UM  
TEMA PARA MOTIVAR AULAS  
NO ENSINO MÉDIO**

**Aluno: Edson Ignez de Souza**

**Orientador: Prof. Adir Moysés Luiz**

**MAIO DE 2010**

**19/2010**



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo propor um tema para motivar o ensino de Física, explicitando as perspectivas a respeito de uma tecnologia que vem sendo considerada promissora por muitos cientistas, mas ao mesmo tempo ainda enfrenta diversas barreiras técnicas.

No capítulo 1, abordamos a importância da busca por fontes de energias mais limpas, e a preocupação com o futuro da humanidade, e a aplicação deste assunto em aulas de física no Ensino Médio.

No capítulo 2 deste trabalho, são apresentadas as fontes de energia não poluentes e as principais fontes renováveis de energia, explicitado aonde se insere o hidrogênio neste contexto, e qual o motivo desse elemento ser protagonista de uma forma tão promissora de se produzir energia limpa.

O capítulo 3 apresenta definições sobre as células a combustível, que é uma tecnologia essencial na geração de energia elétrica a partir do hidrogênio ou outras substâncias. Apresentamos também neste capítulo o funcionamento básico de uma célula a combustível, além dos principais tipos de fabricação desta tecnologia.

No capítulo 4 são apresentadas as aplicações desta tecnologia num futuro próximo, as dificuldades atuais para essas aplicações e algumas soluções já descobertas e experimentais, encontradas por cientistas de todo o mundo.

No capítulo 5, objetivamos relacionar os assuntos abordados em capítulos anteriores, com o ensino da Física no Ensino Médio. Para isso é apresentada uma experiência, com o objetivo de propor uma aplicação deste tema em sala de aula.

Por fim, no capítulo 6, apresentamos as conclusões desta monografia.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 FONTES DE ENERGIA NÃO POLUENTES.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Introdução.....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Energia hidrelétrica.....	4
2.1.2 Energia solar.....	6
2.1.3 Energia eólica.....	6
2.1.4 Energia das Marés.....	8
2.1.5 Energia da biomassa.....	8
<b>2.2 A Energia do hidrogênio .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3 A produção da energia do hidrogênio .....</b>	<b>12</b>
2.3.1 Hidrogênio através da eletrólise.....	12
2.3.2 Hidrogênio a partir dos biocombustíveis.....	13
2.3.3 Hidrogênio a partir da energia solar.....	13
2.3.4 Hidrogênio a partir das hidrelétricas.....	14
<b>3 A CÉLULA A COMBUSTÍVEL.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Funcionamento das células a combustível .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Tipos de células a combustível .....</b>	<b>20</b>
3.3.1 PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell).....	20
3.3.2 PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell).....	20
3.3.3 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell).....	21

3.3.4 ITSOFC (Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell).....	21
<b>3.4 A termodinâmica das células a combustível.....</b>	<b>22</b>
3.4.1 A termodinâmica da eletrólise.....	22
3.4.2 Eficiência das células a combustível a hidrogênio.....	27
<b>4 APLICAÇÕES DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....</b>	<b>29</b>
4.1 Introdução.....	29
4.2 As barreiras para o uso do hidrogênio e das células a combustível.....	29
4.3 Algumas soluções inovadoras para tornar viável esta tecnologia .....	32
4.3.1 Na produção de hidrogênio.....	32
4.3.2 No armazenamento de hidrogênio.....	33
4.3.3 Na distribuição do hidrogênio.....	34
4.3.4 Na eficiência das células a combustível.....	35
<b>5 PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DESTE TEMA NO ENSINO MÉDIO.....</b>	<b>36</b>
5.1 Introdução.....	36
5.2 Experimento.....	37
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A humanidade atualmente busca fontes alternativas de energia, para o aproveitamento dos recursos do nosso planeta de forma adequada e consciente, dentro de um processo de crescimento sustentável.

Todos esses problemas levam à busca de novas tecnologias para a geração de energia que faça uso mais eficiente dos recursos naturais, utilizando recursos renováveis e essa busca já começou, tendo em vista a proximidade da escassez de combustíveis fósseis. E é nesse contexto da educação ambiental e conscientização que também podemos estimular o aluno no ensino da física a partir do conhecimento de tecnologias novas que são de extrema importância para as gerações futuras.

Sendo assim, nossos alunos devem ser preparados para as mudanças que já ocorrem em nosso cotidiano. O aproveitamento de energia a partir de diferentes fontes é um tema de suma importância e interesse global. E, não podemos deixar de lado este assunto que abrange várias disciplinas em conjunto com a física necessária para explicar qualquer equipamento tecnológico. Mas esta integração é importante para que o aluno saiba a real necessidade e o motivo que o faz estudar física. Sabemos que, em sala de aula, é muito difícil despertar e manter o interesse do aluno, ainda mais quando se trata de Física. Ao mesmo tempo nos deparamos diversas vezes com métodos de ensino desestimulantes e, que infelizmente atuam de forma a “matematizar” esta disciplina, não explicitando os verdadeiros conceitos e deixando de lado suas aplicações.

Consta nos Parâmetros Curriculares Nacionais:

*“... as competências para lidar com o mundo físico não têm qualquer significado quando trabalhadas de forma isolada. Competências em Física para a vida se constroem em um presente contextualizado, em articulação com competências de outras áreas, impregnadas de outros conhecimentos. Elas passam a ganhar sentido somente quando colocadas lado a lado, e de forma integrada, com as demais competências desejadas para a realidade desses jovens. Em outras palavras, a realidade educacional e os projetos pedagógicos*

*das escolas, que expressam os objetivos formativos mais amplos a serem alcançados, é que devem direcionar o trabalho de construção do conhecimento físico a ser empreendido".[1]*

Com isso, ao lecionar Física, não devemos apenas trabalhar com a resolução de problemas de Física, mas também informar seu uso prático demonstrando que a Física não é um item complicador na vida das pessoas, mas sim um instrumento que visa contribuir na explicação dos fenômenos da natureza, bem como auxiliar e expandir o avanço tecnológico, melhorando nosso conforto e bem estar. E esse é o nosso objetivo nesta monografia, apresentando também uma diferente forma de aproveitamento de energia, esclarecendo a importância do crescimento sustentável.

No capítulo 1, abordamos a importância da busca por fontes de energias mais limpas, e a preocupação com o futuro da humanidade, e a aplicação deste assunto em aulas de física no Ensino Médio.

No capítulo 2 deste trabalho, são apresentadas as fontes de energia não poluentes e as principais fontes renováveis de energia, explicitado aonde se insere o hidrogênio neste contexto, e qual o motivo desse elemento ser protagonista de uma forma tão promissora de se produzir energia limpa.

O capítulo 3 apresenta definições sobre as células a combustível, que é uma tecnologia essencial na geração de energia elétrica a partir do hidrogênio ou outras substâncias. Apresentamos também neste capítulo o funcionamento básico de uma célula a combustível, além dos principais tipos de fabricação desta tecnologia.

No capítulo 4 são apresentadas as aplicações desta tecnologia num futuro próximo, as dificuldades atuais para essas aplicações e algumas soluções já descobertas e experimentais, encontradas por cientistas de todo o mundo.

No capítulo 5, objetivamos relacionar os assuntos abordados em capítulos anteriores, com o ensino da Física no Ensino Médio. Para isso é apresentada uma experiência, com o objetivo de propor uma aplicação deste tema em sala de aula.

Por fim, no capítulo 6, apresentamos as conclusões desta monografia.

## 2 FONTES DE ENERGIA NÃO POLUENTES

### 2.1 Introdução

Ao longo da história do desenvolvimento humano, sempre houve uma busca por fontes de energia. No entanto, o avanço tecnológico, impulsionado pela revolução industrial, trouxe uma degradação imensa ao meio ambiente. A queima de combustíveis fósseis, sobretudo, foi o cerne do desenvolvimento no século XX, tendo em vista que este processo libera dióxido de carbono e outros gases. Contudo, há muitas décadas que se sabe da capacidade que o dióxido de carbono tem para reter a radiação infravermelha do Sol na atmosfera, desestabilizando assim a temperatura terrestre por meio do efeito estufa, mas, ao que parece isto em nada preocupou a humanidade que continuou a produzir enormes quantidades deste e de outros gases de efeito estufa.

A grande preocupação é se os elevados índices de dióxido de carbono que se têm medido desde o século passado, e tendem a aumentar, podem vir a provocar um aumento na temperatura terrestre suficiente para trazer graves consequências à escala global, pondo em risco a sobrevivência dos seus habitantes. A temperatura do planeta tem projeção de aumento a cada ano. Inicialmente, não se pensava nos danos que esses progressos causariam à Terra.

Portanto, para que a humanidade alcance seus objetivos econômicos é preciso que haja investimentos em tecnologias que não agridem o nosso planeta. Tais tecnologias necessitam serem não poluentes e, além disso, preservar todos os recursos naturais existentes na Terra, tornando as pesquisas em fontes renováveis de energia, um investimento de suma importância para que a humanidade não cause a sua própria extinção.

As fontes renováveis de energia são aquelas de origem natural que usam como matéria-prima elementos renováveis na natureza, ou seja, é possível repor o que gastamos.

Os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e o carvão) em algum momento vão acabar e poderá levar milhões de anos para podermos contar com eles novamente.

Na figura 1 apresentamos dois gráficos que comparam a matriz energética mundial com a matriz energética brasileira. Observa-se que o Brasil ocupa uma posição de destaque com relação à produção de energia, levando em consideração que sua produção de energia renovável é de 44% do total de energia produzida. Enquanto que valor da média mundial é de 2,2% da produção total.

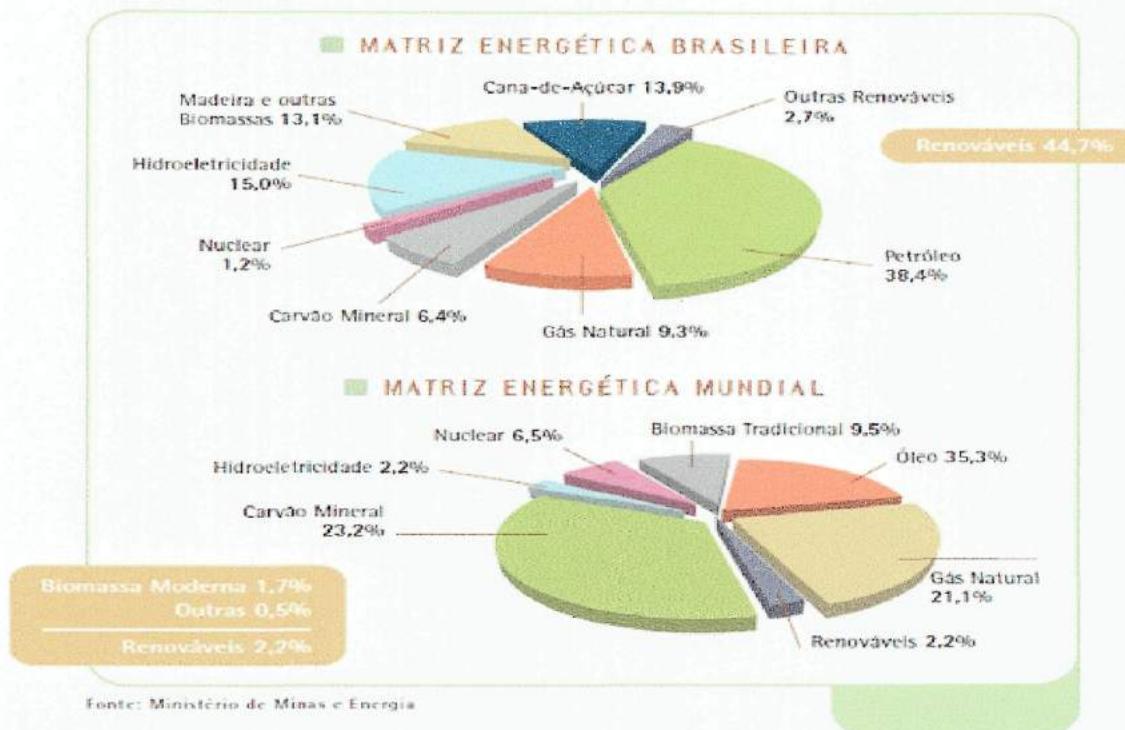


Figura 1. Comparação entre a matriz energética brasileira e mundial. [2]

Vale ressaltar que a matriz energética aqui citada, leva em consideração todos os tipos de fontes de energia, desde o carvão mineral até a energia nuclear.

A seguir faremos uma breve descrição das principais fontes de energia renováveis.

### 2.1.1 Energia hidrelétrica

É a utilização de energia cinética, obtida a partir da força das águas, utilizando, geralmente, um rio para impulsionar as turbinas, além dos desníveis do relevo ou quedas construídas pelo homem.

Apesar de ser considerada uma das fontes de energia renovável, dando a impressão de não ser nociva, uma usina hidroelétrica requer enormes reservatórios de água, que são formados devido à construção de grandes barreiras para represar as águas dos rios, de modo que formem quedas para a movimentação das turbinas para geração de eletricidade. O que causa um grande impacto ambiental, pois ao represar um rio, grandes áreas são inundadas fazendo desaparecer florestas, matando animais, além de outros problemas.

No Brasil, as usinas hidrelétricas são responsáveis por cerca de 95% da energia elétrica produzida. Cerca de 20% da energia elétrica gerada no mundo todo é proveniente de hidrelétricas. Em números aproximados, só no Brasil, a energia hidrelétrica é responsável por 75 milhões de KW. São 158 usinas em funcionamento, outras 9 usinas estão em construção e existem 26 outorgadas (com permissão para serem construídas).

Uma usina hidrelétrica, no Brasil, pode ser classificada de acordo com a sua potência de geração de energia em dois tipos principais: as PCH's, ou pequenas centrais hidrelétricas que produzem de 1MW a 30 MW e possui um reservatório com área inferior a 3 km<sup>2</sup> (Resolução ANEEL N.º 394/98), e as GCH's, ou grandes centrais hidroelétricas que produzem acima de 30 MW.

A maior hidrelétrica do mundo ainda é a usina de Itaipu pertencente ao Brasil e ao Paraguai. Situada no rio Paraná Itaipu tem uma capacidade de 13.300 MW, respondendo por 20% da demanda nacional e 95% da demanda paraguaia de energia elétrica. Mas Itaipu perderá seu título de maior do mundo para a Hidrelétrica de Três Gargantas que está sendo construída no rio Yang-Tsé, na China. Três Gargantas terá uma capacidade de produzir 18.200 MW.

Os países que possuem grande potencial para geração de energia hidrelétrica são a Rússia, o Canadá, os Estados Unidos e o Brasil. Observamos que todos esses países possuem dimensões continentais, e abrigam grande quantidade de rios, tornando viável a aplicação desta forma de obtenção de energia elétrica. Isto explica a pouca utilização no resto do

mundo, tendo em vista que nem todos os países possuem os recursos naturais necessários. [3],[4]

### 2.1.2 Energia solar

É o aproveitamento de energia proveniente da luz do Sol. Através de coletores solares transforma-se energia solar em energia térmica, e através de painéis fotovoltaicos transforma-se energia solar em eletricidade.

A radiação solar pode ser diretamente utilizada como fonte de energia térmica para o aquecimento de fluidos através de coletores ou concentradores solares, para as mais diversas aplicações comerciais ou residenciais.

Através da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, podem-se obter o aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento dos ambientes, reduzindo-se, desta forma, as necessidades de iluminação e aquecimento.

Através de painéis fotovoltaicos, a conversão direta de energia solar em energia elétrica, ocorre devido ao aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Para isso, a célula fotovoltaica é a parte fundamental neste processo de conversão.

A energia solar pode ser uma grande parceira das células a combustível, neste processo para produção de energia totalmente renovável. Pois um dos grandes problemas da energia solar, é que ela é uma fonte intermitente. No entanto, esta barreira pode ser ultrapassada, utilizando as células solares para produzir hidrogênio através da eletrólise, por exemplo. Podendo ser convertido, posteriormente, em energia elétrica através de uma célula a combustível.

Contudo, atualmente o custo das células solares é um grande desafio para a indústria é o que dificulta o uso em massa dos sistemas fotovoltaicos.[5]

### 2.1.3 Energia eólica

É a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (ventos), ou seja, através da ação cinética geradas pelas correntes de ar é gerada energia

elétrica. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação. Para isso, usam-se turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para geração de eletricidade.

A energia eólica é utilizada há milhares de anos, seja para moagem de grãos, bombeamento e água, ou outras aplicações que envolvem energia mecânica.

No Brasil, a participação da energia eólica na geração de energia elétrica ainda é pequena. No entanto, há incentivos vigentes para o setor elétrico que devem despertar o interesse de empreendimentos.

Em 2009 a capacidade mundial de geração de energia elétrica através da energia eólica foi de aproximadamente 158 gigawatts (GW). Para se ter uma idéia da magnitude da expansão desse tipo de energia no mundo, em 2009 a capacidade mundial foi de cerca de 120 GW e, em 2008, 59 GW.

A capacidade de geração de energia eólica no Brasil foi de 606 megawatts (MW) em 2009, ano em que ocorreu um aumento de 77,7% em relação ao ano anterior. A capacidade instalada em 2008 era de 341 MW. O Brasil responde por cerca da metade da capacidade instalada na América Latina, mas representa apenas 0,38% do total mundial.

Veja a comparação da capacidade de produção de energia eólica mundial, através da tabela 2:

Tabela 1. Capacidade instalada de produção de energia eólica no final de 2009.

País	EUA	Alemanha	China	Espanha	Índia	Itália	França	Reino Unido	Portugal	Brasil
MW	35.159	25.777	25.104	19.149	10.926	4.850	4.492	4.051	3.535	606
%	22,3	16,3	15,9	12,1	6,9	3,1	2,8	2,6	2,2	0,4

Os EUA lideram o ranking dos países que mais produzem energia através de fonte eólica. O total de capacidade instalada nesse país ultrapassa os 35 GW. Atrás deles vem a Alemanha, com cerca de 26 GW de potência instalada, e a China, com 25 GW.[6], [7]

#### 2.1.4 Energia das marés

É o aproveitamento de energia a partir do movimento das ondas, das marés, e da diferença de temperatura entre os níveis da água do mar.

Os oceanos podem ser fontes de energia para iluminar nossas casas e empresas, no entanto, atualmente, o aproveitamento desta fonte é apenas experimental.

Existem três formas, até o momento, de se aproveitar a energia dos oceanos: A partir das ondas, das marés e da variação de temperatura dos oceanos.

O aproveitamento de energia a partir das ondas ocorre utilizando a energia cinética do movimento ondular para por uma turbina em funcionamento.

O aproveitamento de energia das marés se dá pelo deslocamento das águas do mar. Neste caso, são construídos diques que envolvem uma praia. Quando a maré enche, a água entra e fica armazenada no dique, ao baixar a maré, a água sai pelo dique como se fosse uma barragem de uma hidrelétrica.

E, outra forma de aproveitamento de energia oceânica, consiste em aproveitar a diferença de temperatura entre a superfície e as partes mais profundas. Tendo em vista que a água é mais quente na superfície, devido à exposição aos raios solares. Esta tecnologia existe apenas como experimento e demonstração, considerando, sobretudo, sua baixa eficiência [8].

#### 2.1.5 Energia da biomassa

É o aproveitamento de energia a partir de fontes orgânicas vegetais ou animais para produção de energia calorífica ou elétrica como, por exemplo, o biodiesel e o álcool (proveniente da cana-de-açúcar). Atualmente o álcool é a fonte de energia renovável mais usada no Brasil depois da hidroelétrica.

A biomassa é a quantidade de matéria orgânica produzida numa determinada área de um terreno.

A energia advinda da biomassa é considerada durável a partir do momento em que se pode garantir o seu ciclo, através do manejo correto garantindo, por exemplo, o reflorestamento ou replantio.

Dependendo da técnica de conversão, a energia da biomassa pode ser transformada em eletricidade, calor ou combustível, sendo que o álcool é um bom exemplo deste ultimo.

O gás extraído de material orgânico pode servir para aquecimento, para movimentar uma turbina ou como combustível de um motor a explosão, com inúmeras aplicações.[9]

## **2.2 Energia do hidrogênio**

Tendo em vista nosso estudo neste trabalho estar direcionado às células a combustível por hidrogênio, daremos mais ênfase à energia do hidrogênio.

A energia do hidrogênio, é o aproveitamento de energia proveniente da combinação do oxigênio com o hidrogênio liberando vapor de água e energia que pode ser transformada em eletricidade.

Através de uma mistura de metais com ácidos fortes, o alquimista Paracelsus (1493-1541) produziu pela primeira vez o gás hidrogênio. No entanto, ele não entendia que este gás inflamável era um novo elemento químico. Já em 1766, Henry Cavendish descreveu o hidrogênio como “ar inflamável” e descobriu, em 1781, que ele produzia água quando queimado.

O nome hidrogênio foi dado por Antoine Lavoisier em 1783 quando, juntamente com Laplace, refez a experiência de Cavendish, onde água é produzida quando hidrogênio é queimado, daí o nome hidrogênio, do grego hidro (água) e genes (gerar).

No século XIX, Grove descobriu como produzir energia elétrica a partir deste gás, com uso de célula a combustível, mas na época não havia nenhuma aplicação prática. Somente nas décadas de 1950 e 1960 o hidrogênio foi usado como fonte de energia para os foguetes em missões espaciais, tanto como combustível para propulsão através da queima, quanto para energia elétrica com uso de células a combustível. [10]

Das muitas fontes de energia renovável, o principal destino é a eletricidade. Mas sabe-se, que o potencial de utilização de fontes renováveis como solar e eólica, é limitado por suas características intermitentes e da dificuldade de se utilizar eletricidade em algumas aplicações. Mas, sem dúvida, se essas formas de energia fossem convertidas em uma energia que pudesse ser armazenada e transportada, atendendo áreas de difícil acesso, a matriz energética seria profundamente alterada.

O mundo tem caminhado em direção a um futuro sustentável. Por isso, o hidrogênio pode ser o grande trunfo, para a resolução dos problemas ambientais e da escassez do petróleo. E além de poder ser produzido a partir de energia eólica, solar e água, oferece uma fonte inesgotável de energia. É o elemento mais abundante do universo, compõe 75% de sua massa e 90% de suas moléculas, é onipresente na terra, na água, nos combustíveis fósseis e em todos os seres vivos. Porém, o hidrogênio raramente existe em suspensão ou à parte ( $H_2$ ), como o carvão, o petróleo e o gás natural. Assim, como a eletricidade, o hidrogênio é uma forma de energia secundária que precisa ser processada, e neste processamento há gasto de energia, e pesquisas para produção de hidrogênio estão em andamento. As energias solar e eólica podem ser usadas para quebrar as ligações moleculares de hidrocarbonetos e água, pois o ideal é que o hidrogênio seja produzido sem emissão de poluentes.

No processo de combustão normal, recombinação com o oxigênio, o hidrogênio pode ser usado para produzir calor. Ou, utilizando-se uma célula a combustível pode-se produzir eletricidade. Já existem veículos movidos à hidrogênio circulando e em fase de testes. Mas a principal dificuldade com a utilização de células a combustível para propulsão de veículos é o suprimento de hidrogênio.

No seu estado natural e sob condições ambientais de temperatura e pressão, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro, insípido e muito mais leve que o ar. Porém no estado líquido, ele ocupa um volume 700 vezes menor do que se estivesse em forma de gás, numa temperatura de -253°C, em sistemas criogênicos. [10]

Para se ter uma idéia do potencial energético do hidrogênio, é com a energia do hidrogênio que o Sol aquece a Terra e mantém a vida.

As misturas dos gases hidrogênio e oxigênio são inflamáveis e, dependendo da concentração, até explosiva.

O hidrogênio possui maior quantidade de energia por unidade de massa que qualquer outro combustível conhecido. Para comparar, veja a tabela 1 a seguir:

Tabela 2. Poder calorífico de diferentes combustíveis.

<b>Combustível</b>	<b>Valor do Poder Calorífico Superior (a 25°C e 1 atm)</b>	<b>Valor do Poder Calorífico Inferior (a 25°C e 1 atm)</b>
<b>Hidrogênio</b>	<b>141,88KJ/g</b>	<b>119,93KJ/g</b>
<b>Metano</b>	<b>55,53KJ/g</b>	<b>50,02KJ/g</b>
<b>Propano</b>	<b>50,36KJ/g</b>	<b>45,6KJ/g</b>
<b>Gasolina</b>	<b>47,5KJ/g</b>	<b>44,5KJ/g</b>
<b>Gasóleo</b>	<b>44,8KJ/g</b>	<b>42,5KJ/g</b>
<b>Metanol</b>	<b>19,96KJ/g</b>	<b>18,05KJ/g</b>

[10]

E é por esses motivos que a agência espacial dos Estados Unidos, a Nasa, utiliza em seus projetos espaciais o hidrogênio como propulsão para foguetes, pois ele se apresenta como combustível ideal por apresentar baixo peso e grande capacidade de energia.

Mas o que é mais promissor é a possibilidade da transformação da energia contida neste gás em energia elétrica.

Na realidade o hidrogênio não é uma fonte de energia, mas sim uma forma de armazená-la. Pois, assim como a eletricidade, o hidrogênio não é encontrado livre na natureza. Para produzir tanto o hidrogênio quanto eletricidade deve-se dispor de processos para que haja transformação a partir de alguma fonte de energia.

Por exemplo, em uma hidrelétrica, graças à força da gravidade, a diferença de altura de um rio gera energia potencial através da força peso das águas. Essas águas se movem e caem e, portanto geram energia cinética a partir da energia potencial. Devido à energia cinética, quando as partículas se

chocam com as pás, elas fazem girar uma turbina. Acoplado ao eixo desta turbina existe um dínamo que gera campo elétrico a partir de um campo magnético variável (Lei de Faraday). Portanto, podemos entender que a eletricidade não foi uma fonte de energia primária, mas foi obtida pela transformação da energia mecânica das águas. Da mesma forma é o hidrogênio, que pode ser produzido a partir de diversas fontes de energia. Como por exemplo, a energia solar e a energia eólica, entre outras.

### **2.3 A produção da energia do hidrogênio**

Cerca da metade da produção mundial de hidrogênio é a partir do gás natural, para uso na indústria. Os combustíveis fósseis, normalmente, são usados na extração de hidrogênio, através de um processo químico. O gás natural, combustível utilizado em alguns países, possui como componente majoritário o metano. Os outros componentes são o hidrogênio, nitrogênio e o hélio. O metano possui uma alta taxa de hidrogênio em relação ao carbono, o que significa gerar a maior quantidade de hidrogênio com o mínimo de dióxido de carbono. No entanto, não sabemos se, num futuro próximo, poderemos contar com o gás natural em volume suficiente para atender as demandas por eletricidade tendo em vista que o mesmo não é um recurso renovável. Obviamente, o ideal é a produção de energia totalmente limpa e renovável, em outras palavras, sem o uso de combustíveis fósseis. Para alcançar este objetivo, existem em estudo diversas maneiras de se produzir hidrogênio.

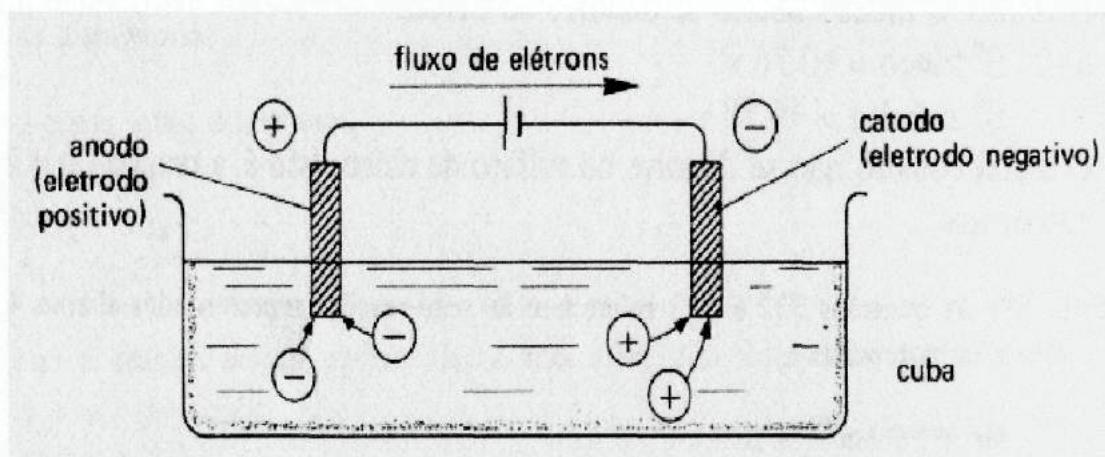
Várias alternativas já existem para produção de hidrogênio em maiores volumes, como a gaseificação da biomassa ou a eletrólise. [11]

#### **2.3.1 Hidrogênio através da eletrólise**

A palavra eletrólise significa “quebrar pela eletricidade”. Consiste no uso de energia elétrica para o rompimento das ligações químicas. Veja a figura 2, nela observamos dois eletrodos imersos em um líquido (água com cloreto de sódio, por exemplo). Ao aplicar uma diferença de potencial entre esses eletrodos forma-se um fluxo de elétrons que passa através dos eletrodos e do líquido. E este fluxo de elétrons causa o rompimento das moléculas da água

( $H_2O$ ) e do cloreto de sódio (NaCl), e por consequência, a separação de suas substâncias.

A eletrólise é um processo eletroquímico, caracterizado pela ocorrência de reações de oxi-redução em uma solução condutora quando se estabelece uma diferença de potencial elétrico entre dois (ou mais) eletrodos mergulhados nessa solução. É o processo contrário ao de uma célula a combustível ou pilha, bateria. No caso da eletrólise da água, também chamada de hidrólise, passamos uma corrente elétrica por ela. Porém, a água pura não conduz eletricidade. Por isso torna-se necessário adicionar uma substância que conduza corrente elétrica. Chamamos esta substância de eletrólito. [11]



**Figura 2. Eletrólise.** [12]

### 2.3.2 Hidrogênio a partir dos biocombustíveis

O uso de biocombustíveis é muito interessante para produção de hidrogênio e no uso das células a combustível, visto que o Brasil possui diversas oportunidades nesta área.

Os biocombustíveis podem ser obtidos de diversos modos: a partir do uso do álcool obtido da cana-de-açúcar (Brasil) ou do milho (EUA), da gaseificação da biomassa, dos aterros sanitários, e até mesmo dos excrementos dos animais. [11]

### 2.3.3 Hidrogênio a partir da energia solar

É a energia proveniente dos raios solares, sendo que esta também é uma fonte de energia inesgotável.

Para o aproveitamento dessa energia proveniente do Sol, usa-se um equipamento chamado painel solar fotovoltaico. Contudo, os painéis solares fotovoltaicos ainda possuem alto custo da tecnologia e pouca eficiência (entre 10 e 25%), pois a maior parte da energia é dissipada na forma de calor. Uma desvantagem da energia solar, é que ela não pode ser armazenada, mas se usada para realizar a eletrólise da água este problema poderá ser resolvido. Poderemos armazenar a energia solar em forma de hidrogênio. [10]

Com isso, apesar dessas deficiências, a energia solar para obtenção do hidrogênio se dá como uma forma satisfatória e promissora, tendo em vista a sua abundância, além ser uma fonte de energia totalmente limpa, sem a emissão dos gases causadores do efeito estufa.

### 2.3.4 Hidrogênio a partir das hidrelétricas

O Brasil possui um grande potencial para produção de energia “verde”, ou seja, energia sem a utilização de gases que causam o efeito estufa. Pois a maior parte da energia elétrica produzida no Brasil é proveniente de usinas hidrelétricas, o que de certa forma torna-se mais viável o uso da energia excedente para produção de hidrogênio pela eletrólise. Durante as estações chuvosas, muitas vezes existe um excesso de água no reservatório e que normalmente é desperdiçado. Essa “sobra” de energia em forma de água pode ser utilizada para produzir hidrogênio a custos mais baixos do que o praticado nos dias de hoje. O oposto ocorre com os Estados Unidos, pois a sua maior parte da produção de energia elétrica é baseada em usinas termelétricas a gás natural. [3]

### 3 A CÉLULA A COMBUSTÍVEL

#### 3.1 Introdução

Uma célula a combustível, é um dispositivo capaz de transformar continuamente a energia química de um combustível e de um oxidante em energia elétrica e calor. Trata-se de uma célula eletroquímica que atua através de um processo que envolve sobretudo um sistema eletrodo/eletrólito. Elas possuem operação contínua, graças à alimentação constante de um combustível.

A invenção das células a combustível se deve a descoberta feita por Willian Robert Grove em 1839 de que a combinação de hidrogênio e oxigênio resulta em água e corrente elétrica. Ele teve essa idéia a partir da eletrólise da água, imaginado como seria se fizesse o caminho inverso. No entanto o termo “célula a combustível” só foi criado em 1889 por Ludwig Mond e Charles Langer, que sem sucesso, tentaram produzir o primeiro dispositivo prático, usando ar e gás industrial gerado de carvão.

Existiram ainda várias outras tentativas, no início do século XX, de se obter um resultado positivo na construção de células a combustível que pudessem converter carvão ou carbono em eletricidade, e todas também falharam.

O engenheiro Francis Bacon, em 1932, conseguiu os primeiros resultados positivos, a partir de experimentos. Mond e Langer haviam usado catalisadores constituídos de platina de custo muito elevado. Francis Bacon os aperfeiçoou, substituindo-os por um eletrólito alcalino menos corrosivo e eletrodos de níquel mais baratos. Com bastante dificuldades técnicas, somente em 1959, ele demonstrou um sistema de célula a combustível de 5kW para alimentar uma máquina de solda. [11]

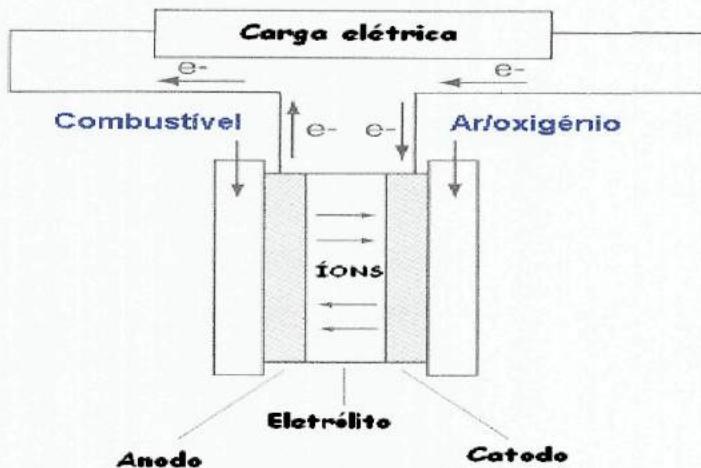
Mas foi com a Nasa (National Aeronautics and Space Administration), agência espacial norte-americana, que as células a combustível começaram a ter uma utilidade prática. Foi pela necessidade de um gerador compacto de

energia elétrica que gerasse energia com eficiência, para ser usado a bordo das naves nas missões tripuladas ao espaço, que a Nasa optou pelas células a combustível, após desistirem dos reatores nucleares por serem arriscados, dos painéis solares por ocuparem muito espaço e das baterias por serem muito pesadas e possuírem o tempo de vida curto. A Nasa aprimorou sua tecnologia nas células a combustível, e após trinta anos de pesquisas conseguiu resolver problemas relacionados ao eletrólito alcalino, que requer hidrogênio extremamente puro, tornando assim, problemático o uso de combustíveis comuns, como gás natural e carvão. [13]

### **3.2 Funcionamento das células a combustível**

Basicamente, a célula a combustível, consiste de uma camada de eletrólito em contato com um anodo (eletrodo negativo) e um catodo (eletrodo positivo), ambos porosos e um de cada lado, em geral o anodo é alimentado pelo combustível. Cobrindo o eletrólito, existem os catalisadores. Esses catalisadores servem para acelerar as reações e quebrar as moléculas de hidrogênio. Exemplos de catalisadores são o níquel e a platina. A seguir, na figura 3, um esquema simplificado de funcionamento de uma célula a combustível:

O terminal negativo, chamado de anodo, é o eletrodo do gás hidrogênio. Observamos aí que na célula a combustível ocorre um fenômeno contrário ao da eletrólise.

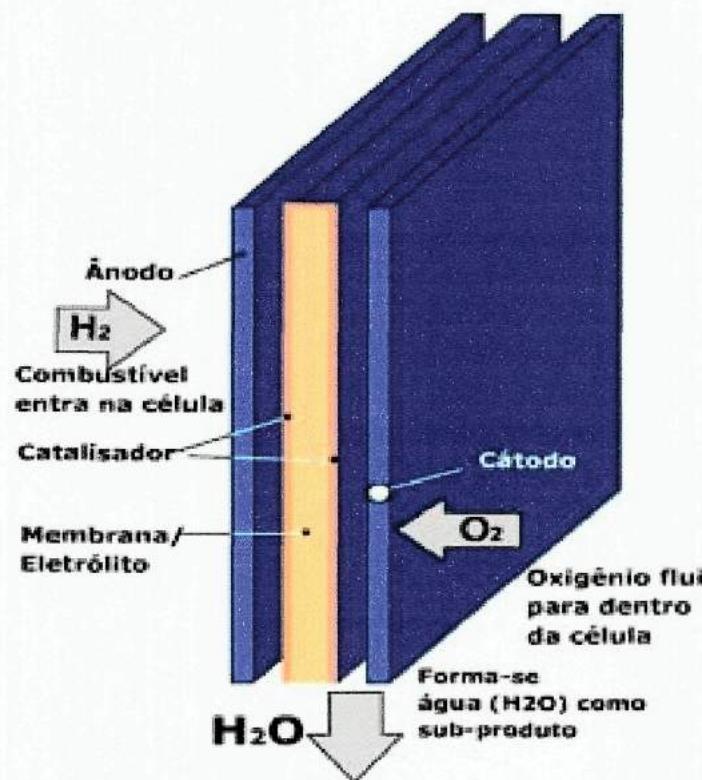


**Figura 3.** Funcionamento de uma célula a combustível. [14]

No eletrodo do hidrogênio, é por onde o gás hidrogênio passa por canais de fluxo desenhados na placa do eletrodo, com o objetivo de atingir toda a superfície do eletrólito revestido pelo catalisador.

Os eletrodos são feitos de grafite misturada a resinas, ou de metais como o aço inoxidável, pois devem ser condutores de eletricidade.

O catodo (terminal positivo) é o eletrodo do gás oxigênio puro ou ar, que da mesma forma é o sinal contrário do que ocorre na eletrólise. O oxigênio passa por canais de fluxo na placa do eletrodo até atingir a superfície do eletrólito revestido pelo catalisador. Na figura 4 vemos um exemplo da localização do catalisador e do eletrólito:

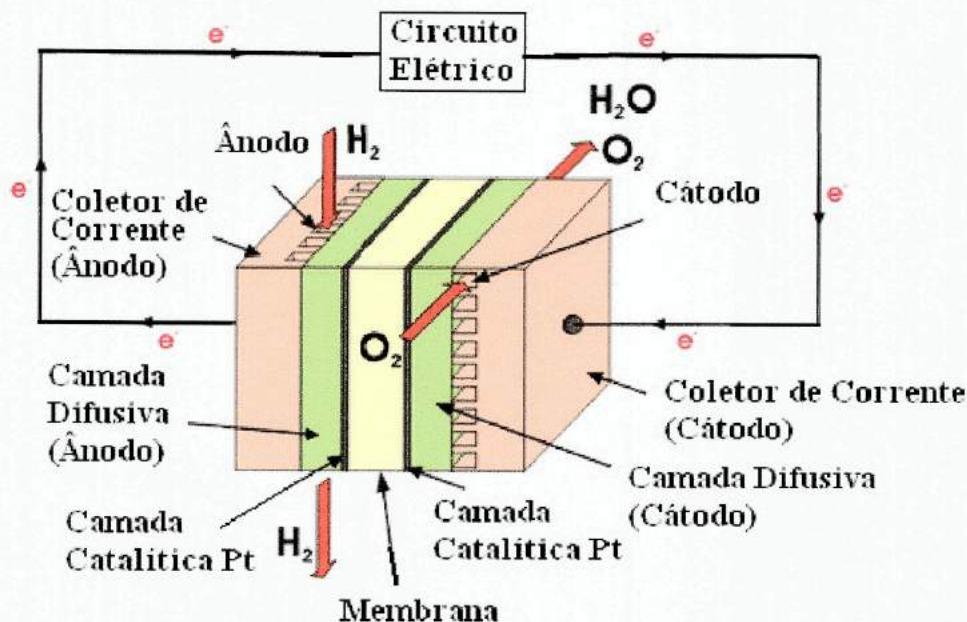


**Figura 4.** Localização do catodo, anodo, eletrólito e catalisador. [5]

Após passarem por esses canais de fluxo nos eletrodos, os gases entram em contato com pequenas partículas de catalisadores como, por exemplo, a platina. Que, além de terem a função de acelerar as reações químicas, também são responsáveis pela quebra da molécula de hidrogênio ( $H^2$ ) em íons  $H^+$  e elétrons.

O gás combustível pressurizado, neste caso o hidrogênio, ao entrar pelo anodo, é forçado a passar pelo catalisador, que pode ser de platina, por exemplo, por ser o mais comumente usado. Ao passar pelo catalisador de platina, o hidrogênio é separado em prótons e elétrons (íons de hidrogênio).

Na figura 5, podemos ver outro exemplo mostrando a localização dos canais de fluxo para os gases hidrogênio e oxigênio.



**Figura 5.** Célula a combustível com os canais de fluxo para os gases hidrogênio e oxigênio. [15]

Estes íons passam através de uma membrana no centro das células a combustível e, novamente com a aplicação de um catalisador de platina, combinam-se com oxigênio e elétrons no lado do catodo, produzindo água, que é expelida em forma de vapor.

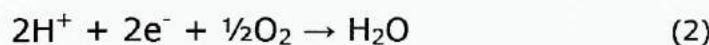
O eletrólito pode ser líquido ou sólido, e ele deve permitir a passagem dos prótons H<sup>+</sup>.

Resumidamente, podemos dizer que uma célula a combustível dividi-se em quatro partes principais: Eletrodo do hidrogênio, eletrodo do oxigênio, catalisador e eletrólito.

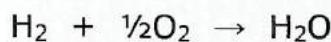
Considerando-se as células de baixa temperatura de operação em meio ácido, o hidrogênio é oxidado a prótons no anodo, liberando elétrons, segundo a reação:



No eletrodo oposto, o catodo, tem-se a reação:



A reação global produz água e calor (exotérmica):



(3)

[10]

### 3.3 Tipos de células a combustível

Os tipos existentes de células a combustível, variam de acordo com o eletrólito que utilizam e, com isso, a sua temperatura de operação e também dependem da aplicação. Entretanto, o princípio de fabricação permanece o mesmo. Mas atualmente estão em pesquisa diversas formas de fabricação de células para que se torne mais viável a sua aplicação. Vejamos como exemplo alguns tipos de células a combustível:

#### 3.3.1 PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell)

A PEFC utiliza como eletrólito uma membrana polimérica excelente condutora de prótons.

O único líquido utilizado é a água, logo a corrosão é mínima. A temperatura de operação fica em torno de 80°C. Possui uma eficiência em torno de 55%, e alta densidade de energia. Atualmente, é célula a combustível com menor custo de produção.

Uma desvantagem da PEFC é a necessidade de utilização da platina como catalisador, uma vez que a platina é um metal raro e caro. [10]

#### 3.3.2 PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)

Neste tipo de célula a combustível, o eletrólito utiliza o ácido fosfórico concentrado em 100%, operando entre 150°C e 220°C. Possui uma eficiência próxima dos 50%.

A utilização de ácido concentrado minimiza a pressão do vapor de água. Para reter o ácido, utiliza-se uma matriz feita de silicone. E como catalisador no anodo e no catodo é usada a platina. [10]

### 3.3.3 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell)

Para que a condutividade do eletrólito carbonato aumente, essa tecnologia de célula a combustível trabalha na faixa de temperatura entre 600 e 700°C. Possibilita a utilização de metais de baixo custo na célula a combustível.

Como possui alta temperatura de operação, não são necessários catalisadores de metal nobre nos processos eletroquímicos de oxidação e redução. A eficiência chega a 55%. No entanto, devido a alta temperatura de operação, o tempo de vida útil do material componente diminui. [10]

### 3.3.4 ITSOFC (Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell )

Nesta tecnologia de células a combustível, utiliza-se componentes cerâmicos como eletrodo e eletrólito, pois o carbono não se deposita em material cerâmico e o combustível da célula pode conter hidrocarbonetos e monóxido de carbono.

A ITSOFC combina as vantagens da tecnologia desenvolvida para operação em temperaturas intermediárias (600 a 800°C). E, possui nestas temperaturas intermediárias, algumas vantagens tais como: Possibilidade para utilização de menos material, maior disponibilidade de tipos de material, e menor tempo para atingir a temperatura de operação. [10]

### 3.4 A termodinâmica das células a combustível

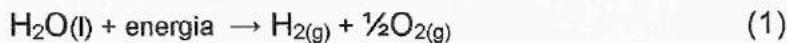
Como vimos anteriormente, o processo de produção de energia elétrica realizado pelas células a combustível é o inverso do processo da eletrólise. Sendo assim, para que possamos obter um entendimento melhor referente à termodinâmica das células a combustível, estudaremos primeiramente a termodinâmica no caso da eletrólise.

#### 3.4.1 A termodinâmica da eletrólise

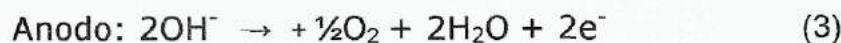
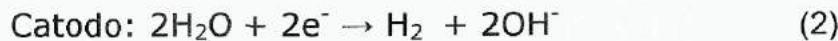
No capítulo 2, no estudo referente à eletrólise, estudamos que este processo, define-se como uma reação química causada por uma fonte de energia externa ao sistema químico. Mas especificamente, este fornecimento de energia externa trata-se da aplicação de tensão e corrente contínua entre os eletrodos do eletrolisador, sendo o mesmo separado por um eletrólito com boa condutividade iônica.

Neste caso particular, veremos o processo que quebra a molécula da água em hidrogênio e oxigênio, denominado eletrólise da água.

Sabe-se que a reação total deste processo é:



Neste processo, a energia absorvida é convertida em calor nos eletrodos e energia química na forma de hidrogênio gasoso. Seguem as descrições das reações nos eletrodos [11]:



Neste processo, a água é consumida, e apenas dois elétrons são envolvidos na dissociação de uma molécula da água.

Pela primeira lei da termodinâmica temos:

$$Q - W = \Delta U \quad (4)$$

Onde  $Q$  é o calor fornecido ao sistema,  $W$  é o trabalho líquido realizado e  $\Delta U$  a variação de energia interna. No entanto, para líquidos e sólidos, devido a alta compressibilidade, podemos escrever aproximadamente:

$$\Delta H \approx \Delta U \quad (5)$$

$\Delta H$  é a diferença de entalpia do sistema. A entalpia corresponde a uma grandeza física que visa medir a energia que está disponível em forma de calor em um sistema termodinâmico, e representado pela letra  $H$ . Onde  $H = U + PV$ .

Sendo assim, a primeira lei da termodinâmica pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q - W = \Delta H \quad (6)$$

Como não existe trabalho mecânico, o único trabalho realizado é o da energia elétrica,  $W$  pode ser escrito pela equação a seguir:

$$W = -nFE \quad (7)$$

Onde:

$n$  número de elétrons transferidos;

$F$  constante de Faraday;

$E$  potencial elétrico [V];

*Obs.: A constante de Faraday ( $F$ ), vale aproximadamente 96450 C/mol.*

Mas 1 Coulomb (C) = 1 joule (J) / volt (V), e 1 J = 4,19 cal.

1C = 4,18 cal/volt,

Logo,  $1 F = 96485,3383 / 4,18 = 23074 \text{ cal/volt equivalente. [16]}$

Substituindo a Eq.(6) em (7) tem-se:

$$E = (\Delta H - Q) / nF \quad (8)$$

Para um processo isotérmico reversível (sem perdas), o calor Q é dado por:

$$Q = T \Delta S \quad (9)$$

Onde T é a temperatura e  $\Delta S$  é a variação de entropia.

Substituindo a Eq. (9) na Eq. (8) resulta da definição do potencial mínimo reversível necessário para a realização da eletrólise na condição de perdas nulas,

$$E_{rev} = (\Delta H - T \Delta S) / nF \quad (10)$$

A seguir, usaremos o potencial termodinâmico G, que corresponde à energia livre de Gibbs, indicada pela letra G. Este potencial representa a medida do trabalho útil que se pode obter em um sistema termodinâmico, no qual ocorre simultaneamente transformações isotérmicas e isobáricas. Sabemos que  $G = H - TS$ . Logo,  $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$ .

Na Eq.(10) o termo do numerador ( $\Delta H - T \Delta S$ ) é a variação de energia livre de Gibbs  $\Delta G$ . Nas condições normais de pressão e temperatura (1 atm e 25°C)  $\Delta H$  é igual a 68320cal/mol e  $\Delta G$  igual a 56690cal/mol. Portanto, o potencial reversível entre os eletrodos pode ser calculado por [17]:

$$E_{rev} = \Delta G / nF = 56690 / (2 \times 23074) = 1,23 \text{ volts} \quad (11)$$

Entretanto, devido às perdas no processo da eletrólise, o potencial requerido entre os eletrodos é maior do que o potencial reversível. Na Eq.(8), n e F são constantes, e considerando as mesmas condições de pressão, temperatura e concentração do eletrólito,  $\Delta H$  é constante e Q variará conforme E variar. Como o processo torna-se irreversível, Q diminuirá e possivelmente pode tornar-se negativo quando a energia é perdida em forma de calor. No ponto em que Q=0, ou seja, toda a energia necessária para o processo de eletrólise é suprida pela energia elétrica, o potencial agora é chamado de voltagem termoneutra. Esse potencial é dado por:

$$E_{termo} = \Delta H/nF = 1,48 \text{ volts} \quad (12)$$

Entretanto, o potencial a ser aplicado nos eletrodos, porém, deve ser maior do que o calculado pela Eq.(12). Nessas condições, parte da energia elétrica é perdida na forma de calor que aumentará a temperatura dos eletrodos no eletrolisador.

A voltagem de operação de um eletrolisador é dada por:

$$E = E_{rev} + Perdas \quad (13)$$

Onde as perdas no processo da eletrólise são:

$$Perdas = E_{anodo} + E_{catodo} + E_{tm} + IR \quad (14)$$

Onde

$E_{anodo}$  sobre-tensão de ativação do anodo

$E_{catodo}$  sobre-tensão de ativação do catodo

$E_{tm}$  sobre-tensão de transferência de massa

$IR$  sobre-tensão ôhmica (I é a corrente e R é a resistência da célula que inclui o eletrólito, eletrodo e os terminais)

Na eletroquímica, a “sobre-tensão” é a diferença entre o potencial elétrico do eletrodo com corrente fluindo e sem corrente no estado de equilíbrio.

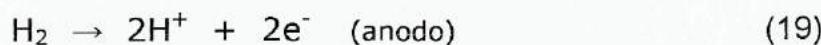
A eficiência da eletrólise convencional na célula (par de eletrodos) é dada por:

$$\varepsilon = \Delta H / \Delta G + \text{perdas} = E_{\text{termo}} / E \quad (15)$$

Entretanto, em condições ideais de operação (sem perdas ou processo reversível), a produção de hidrogênio acontece com uma eficiência de 120% (condição teórica), e sob condições de voltagem termoneutra a eficiência é de 100%.

Os eletrolisadores modernos atingem uma eficiência que varia entre 75% e 90% (4,0 a 5,0 kWh/Nm<sup>3</sup> de hidrogênio). Atualmente, há um grande esforço no sentido de otimizar o projeto dos eletrodos a fim de reduzir as perdas internas.

No caso das células a combustível, a reação que ocorre no anodo é a oxidação de hidrogênio e a reação que ocorre no catodo é a redução de oxigênio, usualmente do ar. Em meio ácido as reações são:



Sendo assim, a reação total deste processo é:



A variação da energia de Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) de uma reação redox relaciona-se com a diferença de potencial da célula ( $\Delta E^\circ$ ):

$$\Delta G^\circ = -nF \Delta E^\circ \quad (22)$$

Sendo  $n$  o número de elétrons envolvidos na reação,  $F$  a constante de Faraday e  $\Delta E^\circ$  a diferença de potencial de equilíbrio (na ausência de fluxo de corrente, para reagentes e produtos em seus estados-padrão).

Para a reação global dada pela equação (21) a 25°C,  $\Delta G^\circ = -237 \text{ kJ/mol}$ . Portanto, o potencial de equilíbrio da célula a combustível (para reagentes e produtos em seus estados-padrão) é:

$$\Delta E^\circ = -\Delta G^\circ/nF = -\Delta G^\circ/nF = 1,23 \text{ V} \quad (23)$$

Esta voltagem corresponde à diferença de potencial de equilíbrio existente entre o catodo ( $E^\circ_c$ ) e o anodo ( $E^\circ_a$ ), ou seja:

$$\Delta E^\circ = E^\circ_c - E^\circ_a \quad (24)$$

### 3.4.2 Eficiência das células a combustível a hidrogênio

Na geração termoelétrica, um combustível é simplesmente queimado para produzir calor, que é usado para gerar o vapor que movimenta as turbinas que acionam os geradores elétricos. Nessas condições, a eficiência total para conversão de energia química em trabalho foi melhorada até alcançar valores próximos a 35%, mas neste processo não se esperam melhorias significativas.

Sabe-se que a eficiência teórica das turbinas a vapor e de dispositivos similares é intrinsecamente limitada pela natureza do processo e pode ser calculada pela expressão:

$$\epsilon(\%) \leq (T_1 - T_2/T_1) \times 100\% \quad (25)$$

Onde

$T_1$  temperatura em kelvins do vapor que entra na turbina;

$T_2$  temperatura do vapor que sai da turbina;

Na prática,  $T_1$  e  $T_2$  são aproximadamente 800k e 400k, respectivamente. Obtendo, portanto, uma eficiência teórica próxima de 50%. Além do mais, os efeitos de transporte de calor e os atritos mecânicos resultam num valor de eficiência muito menor na prática (cerca de 35%).

As células a combustível possuem uma alta eficiência comparada a outras formas existentes de conversão de energia, como por exemplo, a turbina a gás e a vapor. Pois, elas convertem a energia química diretamente em energia elétrica e, este processo não envolve a conversão de calor em energia mecânica, sendo assim, a eficiência das células a combustível podem superar o limite do Ciclo de Carnot, inclusive em baixa temperatura.

Sabe-se que a energia total liberada em uma reação química e o trabalho máximo útil que pode ser obtido estão relacionados com a variação de entalpia ( $\Delta H$ ) e a variação da energia de Gibbs ( $\Delta G$ ), respectivamente.

Sendo assim, a eficiência termodinâmica de conversão eletroquímica é:

$$\epsilon_t = \Delta G / \Delta H,$$

Considerando o exemplo para a célula a combustível H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, com 25°C e a formação líquido,  $\Delta H^\circ = -286\text{ kJ/mol}$ . E, o resultado do cálculo da equação (21) será  $\Delta G = -237\text{ kJ/mol}$ .

A partir daí, temos,

$$\epsilon_t = (\Delta G^\circ / \Delta H^\circ) \times 100\%$$

$$\epsilon_t = (-237/-286).100\%$$

$$\epsilon_t = 83\%$$

Na prática, ao circular corrente, a voltagem da célula a combustível é menor que o potencial de equilíbrio termodinâmico (1,23V). Portanto, em situações práticas esta eficiência é ainda menor. Porém, ainda assim as células a combustível possuem uma eficiência em média o dobro das máquinas a vapor ou a gás [17].

## 4 APLICAÇÕES DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

### 4.1 Introdução

Sem dúvida, a mais promissora aplicação do hidrogênio como fonte de energia é nos meios de transporte, tendo em vista as enormes vantagens que, se viáveis, resolverão grande parte dos problemas relacionados com veículos movidos a combustíveis derivados do petróleo, senão todos.

Um carro, cujo combustível seria o hidrogênio, não usaria motor a explosão como nos veículos atuais, mas sim um motor elétrico, alimentado por uma célula a combustível.

Como vimos no estudo da célula combustível a hidrogênio, ela produz eletricidade a partir da reação com oxigênio, e tendo como resultado deste processo vapor de água como subproduto,

Então, imagine-se dirigindo um veículo construído desta forma. Primeiramente ao dar a partida não se ouviria nenhum ruído ou vibração causada pelo motor, talvez fosse ouvido apenas um pequeno ruído produzido artificialmente que juntamente com as luzes de painel, indicaria que o veículo está ligado e pronto pra começar a viagem.

Ao se movimentar com o carro, continuaremos a observar que o mesmo continua silencioso, sem vibração, suave e sem solavancos, pois deverá ter um sistema eletrônico para controlar a aceleração. E o mais importante é que terá emissão zero ou mínima de poluentes, tendo em vista que no seu escapamento só sai água.

Outra característica importante está relacionada com a transmissão, pois esta não precisará existir. Ao invés disso, poderá ser colocado um motor em cada roda. O problema da transmissão, é que por envolver muitas engrenagens há perda de energia com atrito e desgaste de material. Mas no caso que estamos tratando, não haverá este problema, levando em consideração que cada motor será conectado com célula a combustível por fios, transportando a energia às rodas com mais eficiência e menos perdas.

Além de tudo isso, esses veículos não precisarão ficar trocando óleos lubrificantes, e serão mais econômicos, tanto na manutenção quanto no ganho com autonomia.

Com isso, os grandes centros urbanos como Nova Iorque, Tóquio, São Paulo, Londres e Rio de Janeiro ficarão bem menos poluídos.

Atualmente, os meios de transportes são responsáveis pelo consumo de um terço dos combustíveis fósseis do planeta. E, agora nós temos a chance de modificar este panorama negativo.

Apesar das grandes barreiras tecnológicas enfrentadas atualmente para a realização deste avanço, é imprescindível uma solução urgente para diminuição da emissão dos gases do efeito estufa.

Mas muitos destes veículos já existem e estão em testes circulando nas ruas em vários países, inclusive no Brasil.

Há a possibilidade também, num futuro próximo, do uso das células a combustível em equipamentos eletrônicos portáteis. Pois, pela grande autonomia, poderá ficar dias com um aparelho sendo usado sem a necessidade de recarregar a bateria. Sem contar que diminuiria bastante o descarte indesejável das baterias comuns, amenizando assim mais um problema ambiental. [11]

#### **4.2 As barreiras para o uso do hidrogênio e das células a combustível**

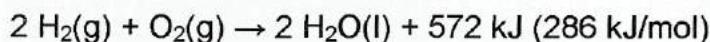
Embora bastante interessante para o mundo, o uso do hidrogênio depende da ultrapassagem de algumas barreiras técnicas e também políticas.

Como já foi dito anteriormente, o hidrogênio apesar de bastante comum, raramente é encontrado livre na natureza, de tal forma que um dos desafios para o emprego desta tecnologia é a sua disponibilidade.

Atualmente, em um dos modelos para extração de hidrogênio de maior viabilidade econômica, existe a utilização de hidrocarbonetos, petróleo e seus derivados, além de outros produtos tóxicos.

Sendo assim, a necessidade de uso de fontes sustentáveis para extração do hidrogênio, torna esta uma tecnologia ainda de custo muito elevado.

O hidrogênio é altamente inflamável quando em contato com o ar, entrando em ignição a uma concentração de 4 % ou mais. Essa queima é de acordo com a equação balanceada a seguir:



Mas um dos maiores problemas também, para a viabilização do hidrogênio como combustível é o seu armazenamento. O hidrogênio é um dos elementos mais leves da natureza, pois possui baixa densidade, e por isso apresenta uma molécula muito pequena, que pode escapar dos tanques de armazenamento muito facilmente.

O ponto de ebulação do hidrogênio é muito pequeno, ele passa do estado líquido para o gasoso mesmo em temperaturas muito baixas (-252,8°C). Sendo assim, para armazená-lo em forma de gás, utiliza-se um sistema de armazenamento de grande volume e pressão. E, quando no estado líquido, é necessário que seu armazenamento utilize sistemas em temperaturas baixíssimas de -253°C. Ou seja, para armazená-lo é necessário o uso de cilindros de alta pressão com paredes de aço contendo paredes de 3 polegadas de espessura, o que torna o tanque muito grande e muito pesado para uso em veículos.

É preciso procurar meios de armazená-lo de maneira segura e viável, sobretudo em automóveis, levando-se em consideração também a autonomia. O armazenamento do hidrogênio é muito perigoso, como podemos ver na reação mostrada anteriormente, possui uma entalpia de combustão de -286 kJ/mol. Por isso, o objetivo é desenvolver um tanque de combustível que armazene a maior quantidade de energia possível com o mínimo de peso, volume, custo e principalmente segurança.

Quanto às células a combustível, o grande problema ainda é a disponibilidade do seu combustível, neste caso, o hidrogênio. Há barreiras também no custo de fabricação das células. Tendo em vista a necessidade do

uso da platina como catalisador, pois este se trata de um material raro, e por isso de custo elevado.

No entanto, há em desenvolvimento pesquisas promissoras para sanar todas essas pendências.

Outra questão é a pouca vontade política por parte dos governantes, e das grandes empresas de energia para esta mudança, para que haja mais incentivos para pesquisa e, de forma gradual, passamos de uma economia baseada no petróleo para uma economia baseada no hidrogênio.

#### **4.3 Algumas soluções inovadoras para tornar viável esta tecnologia**

Para que possamos usufruir num futuro próximo de uma economia baseada no hidrogênio, com distribuição deste combustível em massa, devemos encontrar as soluções tecnológicas em três grandes etapas: produção do hidrogênio, armazenamento do hidrogênio, distribuição do hidrogênio e eficiência das células a combustível. Vejamos algumas destas soluções:

##### **4.3.1 Na produção do hidrogênio**

É bem interessante a idéia do uso da energia solar para a produção de hidrogênio, pois como vimos anteriormente esta se trata de uma importante fonte de energia renovável. Mas os problemas relacionados ao custo elevado das placas solares e a baixa eficiência ainda persistem.

Os processos que utilizam energia solar utilizam células fotovoltaicas para separar o hidrogênio do oxigênio. Os fótons captados pela célula produzem corrente elétrica. E este processo fica em torno de 18% de eficiência.

Em 2003 pesquisadores da Universidade de Massachusetts (Estados Unidos) criaram um aparato inovador que não só utilizavam os fótons provindos do Sol, mas também a porção infravermelha do espectro solar. Essa

porção infravermelha gera calor e é capaz de aquecer a água a até 600°C. A partir daí o vapor d'água era injetado numa porção alcalina e forçado a se dividir em hidrogênio e oxigênio utilizando a energia elétrica gerada pelos fótons. Esse processo alcançou em torno de 30% de eficiência.

Já em 2007, pesquisadores do projeto europeu Hydrosol, cujo objetivo é exatamente produzir hidrogênio a partir de fontes renováveis, produziram um reator, que já está sendo testado na Grécia, com uma eficiência que chega a 70%. [7]

Este novo reator solar usa a parte termal da energia solar ao invés de eletricidade para separar as moléculas da água em hidrogênio e oxigênio. Ele é formado por uma cerâmica porosa, cujos canais são revestidos por um catalisador especial nano-particulado. Para fazer a água se transformar em vapor, usa-se um conjunto de espelhos para concentrar a luz do Sol. Este vapor é forçado a passar pelos micros canais de cerâmica, onde é efetuada a quebra das moléculas de água.

#### 4.3.2 No armazenamento do hidrogênio

Além da própria produção do hidrogênio, hoje produzido basicamente de gás natural, armazená-lo também é um grande problema, pois exige altas pressões ou temperaturas criogênicas.

Mas existem soluções bem promissoras, como é o caso do armazenamento maciço do gás. Neste caso, o hidrogênio passa a fazer parte da estrutura atômica de um material, sendo liberado na medida necessária para alimentar o veículo. Esses materiais funcionam como se fossem esponjas, ou seja, absorvem o hidrogênio por entre seus poros e o libera num momento oportuno.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos definiu como meta a fabricação de um tanque capaz de armazenar 6% do seu peso em hidrogênio para que esta tecnologia se torne viável em automóveis. Entretanto, este valor inclui qualquer equipamento usado para dar pressão ou arrefecer o gás, além do próprio tanque.

As pesquisas neste campo baseiam-se na idéia de inserir o gás no interior das estruturas porosas. Contudo existem outras abordagens como, por

exemplo, fazer com que o hidrogênio reaja quimicamente com o material do tanque, sendo depois liberado mediante uma outra reação química.[7]

#### 4.3.3 Na distribuição do hidrogênio

Um dos maiores desafios, é a infra-estrutura necessária para a distribuição e a construção de postos que atendam aos veículos que utilizam estes combustíveis.

Contudo, há algumas opções para distribuição em massa deste gás de forma viável. Para isso o hidrogênio pode ser:

1. Líquido e entregue por caminhões equipados por tanques criogênicos;
2. Comprimido em cilindros unitários entregue por caminhões;
3. Hidrogênio gasoso entregue por meio de gasodutos;
4. Produzido no local através da eletrólise da água.

Embora esses problemas pareçam complicados e impossíveis de serem resolvidos, as pesquisas vêm trazendo notícias satisfatórias.

É possível também que os pesquisadores resolvam os problemas relacionados à produção, ao armazenamento e à distribuição de hidrogênio de uma só vez. Há idéias inovadoras, como é o caso da pesquisa das universidades da Virginia e da Geórgia juntamente com laboratório Oak Ridge, todos nos Estados Unidos. Eles demonstraram em escala de laboratório que o hidrogênio pode ser produzido a partir de polissacarídeos (carboidratos ou açúcares). A biomassa contendo esses açúcares poderia ser colocada no tanque do veículo e uma reação química retiraria o hidrogênio contido nessas enormes moléculas, passando o gás diretamente para as células a combustível.[18]

De acordo com os pesquisadores, ao adicionar enzimas a uma mistura de amido e água, as enzimas usam o amido para quebrar as moléculas da água em dióxido de carbono e hidrogênio. Usando uma membrana para descartar o dióxido de carbono, o hidrogênio liberado pode alimentar diretamente uma célula a combustível. E a água gerada poderá ser reutilizada no reator amido-água. Sendo que toda reação ocorre sob pressão atmosférica e temperatura de 30°C.

A idéia é que no futuro, os ingredientes venham a ser misturados no próprio tanque do carro.

#### 4.3.4 Na eficiência das células a combustível

Dentre os problemas para a viabilidade do uso das células a combustível em veículos, o maior de todos é o uso da platina como catalisador. Este metal é muito raro, daí o seu alto custo.

Se todos os carros fabricados no mundo passassem a serem equipados com células a combustível, as reservas mundiais de platina se esgotariam em menos de uma década.

No início de 2009, foi anunciada uma descoberta de como usar nanotubos de carbono para substituir a platina como catalisador nas células a combustível. O anúncio da descoberta foi feito pelo químico Liming Dai da Universidade de Daytona, nos Estados Unidos.

Os experimentos iniciais demonstraram que catalisador de nanotubos de carbono tem desempenho superior ao catalisador de platina.

Os nanotubos de carbono são dopados com nitrogênio, sendo que dopagem significa inserir quantidades mínimas de um material em outro. Este processo é utilizado hoje em eletrônica. Esse material ainda é fabricado em quantidades minúsculas, por isso ainda são muito caros. Todavia, observamos uma possibilidade real da diminuição do custo. Tendo em vista que é bem provável que não encontraremos minas ricas em platina capaz de viabilizar o custo das células a combustível. [18]

## 5 PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DESTE TEMA NO ENSINO MÉDIO

### 5.1 Introdução

Baseando-se nos Parâmetros Curriculares Nacionais, e considerando que estamos em um mundo onde ocorrem mudanças tecnológicas cada vez mais rápidas, devemos procurar meios de inserir, em sala de aula, os diversos assuntos do cotidiano do aluno, e também as tecnologias recentes, tendo como objetivo fazer com que o aluno saiba identificar e avaliar o desenvolvimento tecnológico atual.

Este tema pode ser aplicado durante aulas de eletricidade como uma ferramenta de motivação para o aluno do Ensino Médio.

Também em aulas de Termodinâmica este tema seria de grande utilidade para motivar os alunos.

Observa-se que este campo se encaixa em diversos temas estruturadores mencionados nos Parâmetros Curriculares Nacionais. Dentre eles, exemplificaremos alguns desses temas. .

“Calor, Ambiente, Fontes e Usos de Energia”. Dentro deste tema, destacamos **“Energia: produção para uso social”**:

*identificar as diferentes fontes de energia (lenha e outros combustíveis, energia solar etc.) e processos de transformação presentes na produção de energia para uso social;*

*identificar os diferentes sistemas de produção de energia elétrica, os processos de transformação envolvidos e seus respectivos impactos ambientais, visando escolhas ou análises de balanços energéticos;*

*acompanhar a evolução da produção, do uso social e do consumo de energia, relacionando-os ao desenvolvimento econômico, tecnológico e à qualidade de vida, ao longo do tempo.”*

E também, no tema “**Geradores**:

- em sistemas que geram energia elétrica, como pilhas, baterias, dinamos, geradores ou usinas, identificar semelhanças e diferenças entre os diversos processos físicos envolvidos e suas implicações práticas;
- compreender o funcionamento de pilhas e baterias, incluindo constituição material, processos químicos e transformações de energia, para seu uso e descarte adequados;
- compreender o funcionamento de diferentes geradores, para explicar a produção de energia em hidrelétricas, termelétricas etc.. Utilizar esses elementos na discussão dos problemas associados desde a transmissão de energia até sua utilização residencial.” [1]

Então neste capítulo, é apresentada uma experiência compreendida em duas partes para aplicação no Ensino Médio. Sendo que a primeira parte ilustra o funcionamento da eletrólise e a segunda parte ilustra o funcionamento básico de uma célula a combustível.

## **5.2 Experimento**

### ***Eletrolise e célula de combustível salina***

#### ***Objetivo***

Esta experiência visa demonstrar, através dos princípios básicos da eletroquímica, o funcionamento de um sistema usado para a realização de uma eletrólise e também utilizado como um exemplo básico de célula a combustível.

#### ***Material***

Voltímetro, quatro fios condutores com jacarés de preferência, um copo de vidro, uma colher, quatro pilhas de 1,5V.

#### ***Compostos***

Dois fios de cobre (2 x 5 cm), água destilada, cloreto de sódio.

#### ***Procedimento***

- **1<sup>a</sup>Parte (Eletrolise)**

1. Coloque uma colher de chá de sal no copo com água destilada e misture bem;
2. Mergulhe os eletrodos de platina na água com sal ligue-os aos terminais do voltímetro. Pode verificar que o voltímetro não consegue detectar qualquer potencial, mesmo para a escala mais sensível;

Na figura 6, vemos um esquema onde podemos observar dois eletrodos de platina mergulhados a uma solução de cloreto de sódio, onde cada eletrodo está ligado aos pólos positivo e negativo de quatro pilhas em série. Observe que existe um voltímetro medindo a diferença de potencial (ddp) entre os eletrodos.

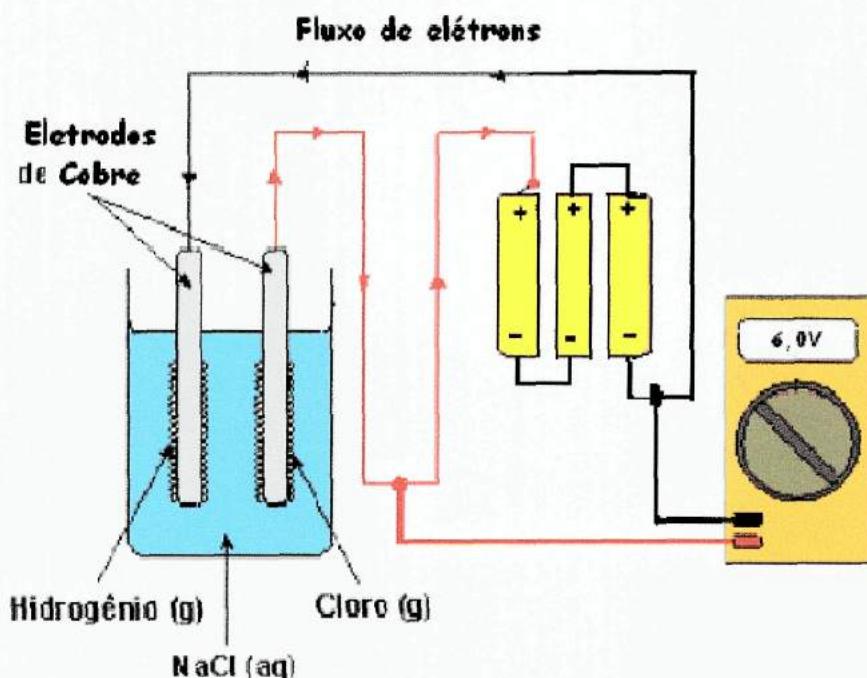


Figura 6. Esquema da montagem da primeira parte do experimento.

3. Ligue a pilha aos eletrodos de platina. Pode verificar uma produção de gases nos eletrodos;
4. Mude a escala do voltímetro para 0-20 vdc e meça a diferença de potencial entre os dois eletrodos. Pode verificar que a diferença de potencial medida é próxima a da pilha;



Foto: Montagem do experimento.

• 2<sup>a</sup>Parte (*Célula a combustível salina*)

5. Desligue as pilhas do circuito elétrico. Mas não agite o copo para que as bolhas de gás permaneçam na superfície do eletrodo;
6. Meça novamente a diferença de potencial entre os eletrodos. Verifique que mesmo sem as pilhas, o sistema continua produzindo uma diferença de potencial próxima de 1,2 V;
7. Mude progressivamente a escala do voltímetro para escalas de medição menores. Pode verificar que a diferença de potencial vai diminuindo progressivamente,

verificamos que em até 7 minutos após a retirada das pilhas, existe uma pequena tensão de aproximadamente 0,3 V medida pelo voltímetro.

Na figura 7, vemos o esquema da experiência sem as pilhas, mas continuamos a medição da diferença de potencial.

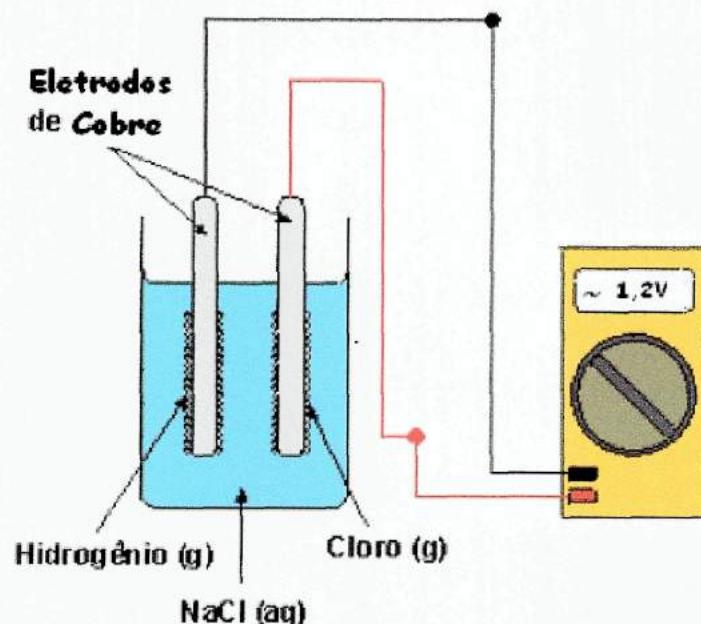


Figura 7. Esquema da montagem da segunda parte do experimento.

8. E, por ultimo, ligue novamente a bateria ao circuito e repita o procedimento anterior. Verifica-se que ao renovar as bolhas na superfície dos eletrodos, o sistema produz eletricidade de forma contínua.

**Como você explica o fato do sistema continuar produzindo uma ddp mesmo após a retirada da pilha?**

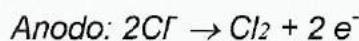
**Resposta:**

*Na primeira parte do experimento, realizamos a eletrólise da solução aquosa cloreto de sódio (NaCl).*

Ao ligar a pilha ao circuito (veja a figura 6), o eletrodo ligado ao terminal negativo das pilhas, recebe elétrons. E o eletrodo ligado ao terminal positivo, fornece elétrons às pilhas.

Sabemos que o eletrodo que recebe elétrons é o catodo e o que produz é o anodo. Então, na eletrólise, os elétrons fornecidos pela pilha combinam-se com os íons  $\text{Na}^+$  e com a água, havendo a formação de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ). O  $\text{H}_2$  libertado para a atmosfera e parte fica em forma de bolha e o  $\text{NaOH}$  passa para a solução aquosa. Enquanto isso, no anodo, os íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) presentes na solução libertam elétrons e produzem cloro gasoso, onde é libertado para a atmosfera, mas uma parte permanece no recipiente em forma de bolhas.

Veja a reação no caso da eletrólise:



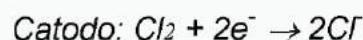
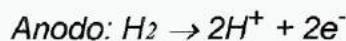
Já na segunda parte do experimento, ao desligar a pilha do circuito, há uma inversão de função dos eletrodos. Ou seja, o eletrodo que funcionava como catodo passa a ser anodo e anodo passa a ser catodo.

O hidrogênio gasoso na superfície do eletrodo que funcionava como catodo libera elétrons e prótons ( $\text{H}^+$ ). Os elétrons são transportados no circuito elétrico para o catodo e os prótons são libertados na solução aquosa.

No outro eletrodo, o cloro molecular reage com os elétrons produzidos pelo hidrogênio no anodo, formando-se novamente íons cloreto.

A diferença de potência inicial é próxima de 1,2V, pois este é o potencial de redução do cloro molecular. Esta diferença de potencial decresce progressivamente devido à quantidade de cloro e hidrogênio que vai diminuindo medida que estes vão sendo consumidos. No entanto, se estes pudessem ser continuamente renovados, a célula seria capaz de produzir uma ddp constante.

Segue a reação no caso da célula a combustível salina



## 6 CONCLUSÕES

A abordagem do assunto energia do hidrogênio e células a combustível objetiva demonstrar as relações existentes da Física com o contexto tecnológico e científico, e com outras disciplinas. Pois quanto mais avançada nossa tecnologia e ciência, mais entrelaçadas são as áreas de pesquisa. E, juntamente com os avanços, surge a necessidade de uma aprendizagem com mais interdisciplinaridade, que é uma das recomendações do PCN. Uma grande parte dos alunos do Ensino Médio vê a Física como uma disciplina complexa e sem nenhuma aplicação prática em sua vida. Então, para alcançar os objetivos propostos, é necessário analisar como podemos aproveitar esta energia, as perspectivas para o nosso benefício no futuro e de que maneira ela influí e influenciará as nossas vidas.

A preservação do meio ambiente também é muito importante ser comentada em sala de aula, visto que muitas fontes de energia usadas hoje em dia poluem o meio ambiente. Devemos mostrar com isso que a Física, a Química, a Biologia e outras ciências têm compromissos não só com a economia e as indústrias, mas também com a preservação do meio ambiente e nosso bem estar.

São apresentadas diversas soluções, algumas ainda em fase de pesquisa, para que o aproveitamento dessa energia seja posto em prática, e mostramos algumas aplicações. É proposta também uma experiência, que pode ser aplicada em sala de aula ou em feiras de ciência. A motivação é muito importante na aprendizagem, com isso esperamos fazer com que o aluno tenha mais interesse a partir de assuntos concretos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM)MEC/SEMTEC, 1998.
- [2] O PAC, o setor de hidrocarbonetos e a matriz energética nacional. DIEESE,número 43, abril de 2007.
- [3] Manual de Inventário Hidroelétrico de bacias hidrográficas. Ministério de Minas e Energia, edição 2007.
- [4] Disponível em  
<[http://pt.wikipedia.org/wiki/Usina\\_hidrel%C3%A9trica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_hidrel%C3%A9trica)> Acesso em outubro de 2009.
- [5] Disponível em <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_solar](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar)>  
Acesso em outubro de 2009.
- [6] Disponível em  
<[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia\\_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf)> Acesso em outubro de 2009.
- [7] Disponível em  
<[http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_e%C3%89olica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_e%C3%89olica)> Acesso em novembro de 2009.
- [8] Disponível em  
<[http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_maremotriz](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_maremotriz)> Acesso em novembro de 2009.
- [9] Disponível em  
<[http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1B/ebioma\\_ssa.html](http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1B/ebioma_ssa.html)> Acesso em novembro de 2009.

[10] Ricardo Aldabó, *Célula a Combustível a Hidrogênio*. Editora Artliber, São Paulo, SP, 2004.

[11] Emílio H. Gomes Neto, *Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir*. Editor Brasil Fuel Cell Energy, Curitiba, PR, 2005.

[12] Disponível em  
<<http://luizclaudionovaes.sites.uol.com.br/eletrolise.htm>> Acesso em novembro de 2009.

[13] Disponível em <  
<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/celulacombustivel.html> >  
Acesso em novembro de 2009.

[14] Disponível em <  
<http://www.ipv.pt/millenium/Millenium29/21.pdf>>. Acesso em

[15] Disponível em  
<<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/XIII%20Eriac/B3/B3-12.pdf>> Acesso em novembro de 2009.

[16] Halliday Resnick Walker, *Fundamentos de Física. Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. LTC Editora, 6<sup>a</sup> edição.

[17] Wyle, J. Van, Sonntag, R.E., Borgnakke, C., *Fundamentos da Termodinâmica* – 6<sup>a</sup> edição, Edgard Blucher, 2003.

[18] Disponível em  
<<http://www.inovacaotecnologica.com.br/pesquisar.php?keyword=hidrogenio&base=40>> Acesso em novembro de 2009.