

# Hidrogênio: O Vetor Energético do Futuro?

Reinaldo A. Vargas<sup>1</sup>, Rubens Chiba<sup>1</sup>, Egberto G. Franco<sup>1,2</sup>, Emília S. M. Seo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM)  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2.242, Cidade Universitária (USP)  
CEP: 05508-000 - São Paulo - SP - Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Administração  
Faculdade Alfacastelo  
Rodovia Castelo Branco, Km 26,5 - Saída 26 B - Barueri  
CEP: 06407-000 - São Paulo - SP - Brasil

ravargas@ipen.br, rchiba@ipen.br, egfranco@ipen.br, esmiyseo@ipen.br

**Resumo.** Atualmente, com a preocupação global em relação ao aquecimento da Terra e em encontrar fontes de energias mais limpas, o hidrogênio está começando a ser muito pesquisado como o grande sucessor dos combustíveis fósseis, entre eles e principalmente; o petróleo. As pesquisas sobre o hidrogênio estão rapidamente sendo concentradas na geração de energia elétrica, térmica e de água pura através das “Células a Combustível”. O que chama a atenção principalmente, é que o hidrogênio é o elemento mais básico e abundante na natureza, e que sua combustão é totalmente limpa. Com todas estas vantagens, o hidrogênio é o grande concorrente a “vetor” energético do futuro, visando transformar a atual economia baseada no petróleo na economia baseada no hidrogênio. O objetivo deste artigo é transmitir através de uma forma simples, os alguns conceitos sobre o hidrogênio, suas principais fontes, sua produção, armazenamento, distribuição, segurança, infra-estrutura e um panorama sobre a atual pesquisa do hidrogênio no Brasil.

**Abstract.** Nowadays, with the global concern in relation to the heating of the Earth and in finding power plants cleaner, the hydrogen is starting very to be searched as the great successor of fossil fuels, between them and mainly; the oil. The research on hydrogen is quickly being concentrated in the generation of electric, thermal energy and of pure water through the Fuel Cells. What it calls the attention mainly, is that the hydrogen is the abundant element most basic and in the nature, and that its combustion is total clean. With all these advantages, the hydrogen is the great competitor the energy “vector” of the future, aiming at to transform the current based economy into the oil in the economy based on hydrogen. The objective of this article is to transmit through a simple form, the some concepts on hydrogen, its main sources, its production, storage, distribution, security, infrastructure and a vision on the current research of hydrogen in Brazil.

## 1. Hidrogênio [1,2,7]

O hidrogênio ( $H_2$ ) é o mais simples e mais comum elemento de todo o universo. Ele compõe 75% da sua massa, e 90% de todas as suas moléculas. Possui a maior quantidade de energia por unidade de massa que qualquer outro combustível conhecido, aproximadamente 52.000 *BTU* (*British Thermal Units* - Unidades Térmicas Britânicas) por libra (120,7 kilojoules por grama), cerca de três vezes mais calor por libra que o petróleo estando em seu estado líquido. Quando resfriado ao estado líquido, o hidrogênio de baixo peso molecular ocupa um espaço equivalente a 1/700 daquele que ocuparia no estado gasoso, sendo possível então o seu armazenamento e transporte.

No seu estado natural e sob condições normais, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro e insípido. É uma molécula com grande capacidade de armazenar energia e por este motivo sua utilização como fonte renovável de energia elétrica e térmica vem sendo amplamente pesquisadas.

Se for produzido a partir de fontes renováveis (por exemplo: etanol e água) e tecnologias renováveis, como as energias solar, eólica e hidráulica, o hidrogênio torna-se um combustível renovável e ecologicamente correto.

O hidrogênio é um elemento químico largamente encontrado na água, no ar, nos seres vivos, no petróleo e, para ter um aproveitamento como fonte de energia eficiente, deve estar na forma pura gasosa ou líquida. Este elemento apresenta uma inflamabilidade elevada, mas não é maior que a do gás natural, uma fonte energética que está em expansão no Brasil e deverá ser uma das principais fontes de hidrogênio em um futuro próximo, pois na sua estrutura de hidrocarboneto, é encontrado o metano ( $CH_4$ ).

O hidrogênio molecular ( $H_2$ ) existe naturalmente na forma de dois átomos de hidrogênio ligados pelo compartilhamento de elétrons (ligação covalente). Cada átomo é composto por um próton e um elétron. Como o hidrogênio tem densidade de 1/14 em relação ao ar, alguns cientistas acreditam que este elemento é a fonte de todos os demais, por processos de fusão nuclear.

Quando queimado com oxigênio puro ( $O_2$ ), os únicos produtos são calor e água ( $H_2O$ ). Quando queimado com ar, constituído por cerca de 68% de nitrogênio ( $N_2$ ), alguns óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) são formados. Ainda assim, a queima de hidrogênio produz menos poluentes atmosféricos que os combustíveis fósseis.

Num sistema de “Célula a Combustível”, a utilização do hidrogênio puro traz vantagens como não necessitar de reformadores (equipamento utilizado para extrair o hidrogênio de uma fonte deste combustível, tal como o gás natural), diminuindo o tamanho e custo do sistema, além de não contaminar as membranas e eletrodos que são sensíveis a alguns compostos [1-4].

Um exemplo do potencial energético do hidrogênio está na fonte de energia do Sol, que compõe 30% da massa solar. É com a energia do hidrogênio que o Sol aquece a Terra, favorecendo a vida em nosso Planeta. Todas estas vantagens fazem do hidrogênio um combustível “perfeito” e ecologicamente correto, sendo o grande alvo das atuais pesquisas da área e ganhando o papel do “vetor” energético do futuro.

## 2. Fontes de Hidrogênio [1-5]

No nosso Planeta, o hidrogênio não é encontrado em sua forma mais pura, e sim na forma combinada (hidrocarbonetos e derivados), na água, nos oceanos, nos rios, nos minerais e até nos seres vivos. Por esses motivos, o hidrogênio deve ser extraído de diversas fontes. As principais fontes de hidrogênio são:

- Gás Natural;
- Etanol;
- Metanol;
- Água;
- Biomassa;
- Metano;
- Algas e Bactérias;
- Gasolina e Diesel.

### 2.1. Gás Natural [4-6]

O gás natural é uma fonte de energia rica em hidrogênio, com a relação de um átomo de carbono para quatro átomos de hidrogênio. É um dos combustíveis fósseis mais utilizados em todo o mundo, com sua participação na matriz energética mundial de aproximadamente 23%, atrás apenas do petróleo que está com cerca de 40%. Dentre os principais combustíveis fósseis utilizados atualmente, como o petróleo e o carvão (mineral e vegetal), o gás natural é o bem menos poluente.

Atualmente, aproximadamente a metade da produção de hidrogênio no mundo provém do gás natural, e a maior parte da produção em escala industrial é pelo processo de “reforma a vapor”, ou como um subproduto do refino de petróleo e produção de compostos químicos.

Para ser utilizado em uma Célula a Combustível (CaC), o gás natural passa pelo processo de reforma para se obter o hidrogênio. A reforma a vapor do gás natural utiliza energia térmica (calor) para separar os átomos de hidrogênio do átomo de carbono no metano, e envolve a reação do gás natural com vapor de água à alta temperatura em superfícies catalíticas (platina ou níquel). O processo extrai os átomos de hidrogênio, deixando o dióxido de carbono como subproduto.

### 2.2. Etanol [4-6]

O etanol, conhecido comercialmente como álcool, é hoje uma das principais fontes de energia no Brasil. É uma fonte de energia renovável, pouco poluente, e se aplicado em CaC's, possibilita uma eficiência energética melhor que a utilizada atualmente e com praticamente nenhuma emissão de compostos poluentes.

Além disso, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o maior produtor de açúcar e o segundo maior produtor mundial de etanol, perdendo apenas para os EUA, que nos ultrapassaram no final de 2005. O Brasil movimentava anualmente cerca de 12 bilhões de dólares e emprega diretamente um milhão de trabalhadores, e indiretamente

outros 3,5 milhões, com a maior parte das unidades produtoras e de mercado de trabalho localizadas nos Estados de São Paulo e do Paraná.

No ano de 2003, a produção de álcool chegou a 14,4 bilhões de litros em todo o território nacional, com o Centro-Sul responsável por 12,9 bilhões de litros desse total. É um volume 16,72% acima dos 11,014 bilhões de litros produzidos na safra entre 2002 e 2003. Isto se deve às novas variedades de matéria-prima, às condições climáticas favoráveis e à melhoria da eficiência industrial das unidades produtoras.

O etanol é produzido a partir da cana-de-açúcar (como no Brasil), do amido de milho (como nos EUA), da beterraba e de outras matérias-primas, e tem sido usado por décadas como combustível para transporte em várias partes do mundo. Apresenta energia densa e líquida que pode ser estocada compactamente, contém 35% de oxigênio, e possui uma combustão limpa. Pode ser produzido no País, o que diminui a necessidade do óleo importado e dos derivados de petróleo, contribui para a segurança energética e fornece suporte econômico e mercados alternativos para as safras da matéria-prima.

Quando o etanol substitui o petróleo, os benefícios ambientais incluem menores emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e ao contrário de outros combustíveis oxigenados, o etanol não é nocivo ao meio ambiente no caso de ocorrerem derramamentos ou vazamentos. Por possuir estes atributos, o etanol possui um futuro forte como combustível alternativo, como combustível adicional para mecanismos de combustão interna ou como fonte para produzir hidrogênio. A demanda por etanol é crescente e a indústria do etanol responde com progressos, como uma tecnologia de produção mais eficiente e com uma maior capacidade de produção.

Quando o etanol é usado em uma CaC, pode gerar além de energia, importantes contribuições ambientais, além de abrir novos mercados com a geração distribuída e com aplicações avançadas em sistemas de transporte. Por este motivo, a indústria do etanol está começando a ter um papel mais importante no mercado internacional.

### **2.3. Metanol [4-6]**

O metanol é um líquido incolor, com peso molecular igual a 32.04, possuindo um odor suave na presença da temperatura ambiente. Sua fórmula molecular é  $\text{CH}_3\text{OH}$  e é uma das matérias-primas mais consumidas na indústria química. Já foi conhecido como álcool da madeira, devido a sua obtenção comercial a partir da destilação destrutiva da madeira.

A maior utilização do metanol atualmente está na produção de formaldeído do tipo MTBE (Metil-Tert-Butil-Éter) que é um aditivo para a gasolina e que está sendo banido aos poucos nos EUA, como combustível puro ou em mistura com gasolina para automóveis leves e também para a produção de hidrogênio.

As CaC's que utilizam o metanol são conhecidas como *DMFC's*. Esta tecnologia é uma variação da tecnologia *PEMFC* no qual faz uso do metanol diretamente sem a necessidade de reforma do combustível para se ter o hidrogênio puro. O metanol é convertido em dióxido de carbono e hidrogênio no anodo. O hidrogênio se quebra em prótons e elétrons. Os prótons atravessam a membrana até reagir com o oxigênio para formar água, seguindo o mesmo padrão de reação numa típica *PEMFC*.

A maioria das CaC's são alimentadas por hidrogênio, o qual pode ser adicionado diretamente ou ser extraído a partir de um combustível no próprio sistema através da

reforma de uma fonte de hidrogênio tal como o metanol, o etanol, e hidrocarbonetos, como o gás natural e gasolina. As *DMFC*'s, entretanto, são alimentadas por metanol, o qual é misturado ao vapor e então ao anodo (eletrodo negativo) da célula.

As *DMFC*'s não possuem muitos dos problemas de armazenamento típicos de outras tecnologias, pois o metanol tem uma densidade de potência maior que a do hidrogênio, embora menor que a da gasolina ou diesel. O metanol também é mais fácil de transportar e fornecer para o mercado, pois pode utilizar a atual infra-estrutura por ser um combustível líquido, como a gasolina. A desvantagem está em ser um combustível que possui compostos poluentes, se comparado com o hidrogênio que é totalmente limpo, e seu uso geraria de alguma forma poluentes através do ar.

#### **2.4. Água [4-6]**

A água deverá ser uma das principais fontes de hidrogênio no futuro. Companhias de energia no Brasil estão começando a pesquisar a viabilidade econômica de se produzir hidrogênio a partir da água utilizando os reservatórios das grandes usinas hidrelétricas nacionais. A idéia é produzir durante a madrugada, período em que a demanda por energia elétrica é baixa e de menor custo.

Para extrair o hidrogênio da molécula de água, utiliza-se o método por eletrólise. A eletrólise faz uso da eletricidade para romper a água em átomos de hidrogênio e oxigênio, passando por ela uma corrente elétrica. Este processo existe há mais de 100 anos e seu funcionamento consiste de dois eletrodos, um negativo (anodo) e outro positivo (catodo) que são submersos em água pura, à qual se deu maior condutibilidade pela aplicação de um eletrólito, tal como um sal, melhorando a eficiência do processo.

As cargas elétricas da corrente quebram as ligações químicas entre os átomos de hidrogênio e de oxigênio e separa os componentes atômicos, criando partículas carregadas (íons). O hidrogênio se concentra no catodo e o anodo atrai o oxigênio. Uma tensão de 1,24V é necessária para separar os átomos de oxigênio e de hidrogênio em água pura a uma temperatura de 25°C e uma pressão de 1,03Kg/cm<sup>2</sup>. A tensão necessária para quebrar a molécula de água varia conforme a pressão ou a temperatura são alteradas. Visualmente, o hidrogênio borbulha em direção ao eletrodo de carga negativa (anodo), e o oxigênio rumo ao eletrodo de carga positiva (catodo). A menor quantidade de eletricidade necessária para eletrolisar um mol de água é de 65,3 Watts-hora (25°C). A produção de um metro cúbico de hidrogênio requer 0,14 kilowatts-hora (kWh) de energia elétrica ou 4,8 kWh/m<sup>3</sup>.

A eletrólise não tem sido muito utilizada porque os custos da eletricidade usada no processo impedem que ela concorra com o processo de reforma a vapor do gás natural e futuramente com o de etanol. A eletricidade pode custar de três a quatro vezes mais que o gás natural reformado a vapor. À medida que o gás natural for ficando mais escasso e caro, provavelmente a eletrólise ficará competitiva. No Brasil, podem-se aproveitar os reservatórios das grandes hidroelétricas e produzir hidrogênio nos horários fora de pico e mais baratos, como durante o período da madrugada.

Se os custos das células fotovoltaicas, de geração eólica, hídrica e geotérmica, todas estas formas de energia renováveis e livres de carbono, diminuïrem, a eletrólise através destes métodos será uma opção também atrativa.

## **2.5. Biomassa [4-6]**

A biomassa oferece as melhores perspectivas entre todas as fontes de energia renováveis e como fonte de hidrogênio. A cana-de-açúcar, o milho, as florestas cultivadas, soja, dendê, girassol, colza, mandioca, palha de arroz, lascas ou serragem de madeira, dejetos de criação animal, são bons exemplos de biomassa. Seu valor energético é alto, pois uma tonelada de matéria seca gera 19 GJ. Um hectare de cana-de-açúcar produz 980 GJ e a mesma área reflorestada gera 400 GJ.

## **2.6. Metano [4-6]**

O metano ( $\text{CH}_4$ ) é um componente do chamado "biogás", produzido por bactérias anaeróbias. Estas bactérias são encontradas em grande quantidade no meio ambiente. Elas quebram, ou digerem, matéria orgânica na ausência de oxigênio e produzem o "biogás" como resíduo metabólico. Alguns exemplos de fontes de biogás incluem os aterros sanitários, o esterco de gado ou porcos e as estações de tratamento de águas e esgotos. O metano também é o principal componente do gás natural produzido por bactérias anaeróbias há milhões de anos atrás.

## **2.7. Algas e Bactérias [4-6]**

Os processos biológicos e fotobiológicos através de enzimas utilizam algas e bactérias para produzir hidrogênio. Sob condições específicas, alguns pigmentos em certos tipos de algas, absorvem a energia solar. As enzimas na célula de energia agem como catalisadores para decompor as moléculas de água.

Algumas bactérias também são capazes de produzir hidrogênio, mas diferentemente das algas necessitam de substratos para seu crescimento. Os organismos não apenas produzem hidrogênio, mas também podem limpar uma parcela da poluição ambiental. A produção de hidrogênio por algas pode eventualmente promover um meio prático e de baixo custo para a conversão de luz solar em hidrogênio.

## **2.8. Gasolina e Óleo Diesel [4-6]**

A gasolina e o óleo diesel também podem ser utilizados para produzir hidrogênio para as  $\text{CaC}'\text{s}$ , mas são mais inconvenientes por terem uma estrutura complexa com diversas moléculas. A única vantagem seria o aproveitamento da atual infra-estrutura estabelecida em postos servindo como transição para o modelo de postos a hidrogênio no futuro. Mas a tendência deverá ser o aproveitamento da infra-estrutura estabelecida pelo etanol.

## **3. Produção de Hidrogênio [1,2,5,6]**

A grande parte de hidrogênio produzido no mundo é utilizada como matéria-prima química na fabricação de produtos como fertilizantes derivados de amônia, na hidrogenação de óleos orgânicos comestíveis feitos de sementes de soja, peixes, amendoim e milho. O hidrogênio também é utilizado para converter o óleo líquido em margarina e também usado no processo de fabricação de polipropileno e resfriamento de geradores e motores.

Atualmente tem concentrado pesquisas para geração de energia elétrica, térmica e água pura através das CaC's.

O hidrogênio ligado em compostos orgânicos e na água constitui 70% da superfície terrestre. A quebra destas ligações na água nos permite produzir hidrogênio e então utilizá-lo como combustível. Existem muitos processos que podem ser utilizados para quebrar estas ligações.

Os pesquisadores têm ajudado a desenvolver tecnologias que fortaleçam a utilização desta extraordinária fonte de energia e assim diminuir custos, produzindo hidrogênio em grandes quantidades com o objetivo de competir com as fontes tradicionais de energia.

Atualmente, a metade da produção de hidrogênio no mundo provém do gás natural, e a maior parte da produção em escala industrial é pelo processo de reforma a vapor, ou como um subproduto do refino de petróleo e produção de compostos químicos. Outros métodos são através da eletrólise da água, eletrólise a vapor, processo fotoeletroquímico e processos biológicos e fotobiológicos através de enzimas.

#### **4. Armazenamento de Hidrogênio [1,2,5,6]**

Se o primeiro desafio da tecnologia do hidrogênio é a sua produção, o segundo é como armazená-lo; um dos principais obstáculos para o estabelecimento da infra-estrutura para a tecnologia do hidrogênio. Além da questão de segurança, a capacidade de armazenamento é importante, pois define a autonomia dos veículos.

O hidrogênio tem a menor densidade no estado gasoso e o segundo ponto de ebulição de todas as substâncias conhecidas, fazendo com que se tenha dificuldades para armazená-lo no estado gasoso ou no estado líquido. Quando em forma de gás, necessita de um sistema de armazenamento de grande volume e pressão, e quando no estado líquido, precisa que o seu armazenamento utilize sistemas criogênicos, ou seja, sistemas que operam em baixíssima temperatura (-253°C).

A baixa densidade do hidrogênio seja no estado líquido ou no estado gasoso, também resulta numa baixa densidade de energia. Por isso, um certo volume de hidrogênio contém menos energia que o mesmo volume de qualquer combustível em condições normais de temperatura e pressão. Isto faz com que o volume ou a pressão do tanque aumente, pois uma certa quantidade de hidrogênio é necessária para que um veículo atinja uma boa autonomia. A vantagem de se utilizar numa CaC é a alta eficiência desta tecnologia com relação aos motores à combustão interna, precisando de menos combustível para atingir o mesmo resultado.

Apesar de sua baixa densidade de energia volumétrica, o hidrogênio tem a maior relação energia-peso que qualquer outro combustível. Infelizmente, esta vantagem é usualmente ofuscada pelo alto peso do tanque de armazenamento e equipamentos associados, fazendo com que muitas vezes seja maior e mais pesado que aqueles utilizados para armazenar gasolina, diesel ou álcool. Mas já há projetos que utilizam materiais de carbono ultra-resistentes e mais leves para estes propósitos.

Em aplicações práticas, o hidrogênio pode ser armazenado em alta pressão, no estado líquido em recipientes criogênicos, ou estar quimicamente ligados a certos metais na forma de hidretos metálicos. O volume e o peso dos sistemas estão cada vez mais próximos

quando comparados ao armazenamento de gasolina, do metanol, do etanol, do gás natural e das baterias convencionais, cada um contendo a mesma quantidade de energia.

Existem atualmente cinco meios principais de se armazenar o hidrogênio. Uma das mais pesquisadas no Brasil é através de hidretos metálicos, onde o hidrogênio é absorvido por metais. Esta tecnologia vem sendo pesquisada pelo Laboratório de Hidrogênio da COPPE (Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia) da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). O instituto de pesquisa do hidrogênio é uma referência da tecnologia do hidrogênio no Brasil e no mundo, e vem pesquisando o armazenamento do combustível em hidretos metálicos com apoio da Renault, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro).

Além do armazenamento em materiais sólidos, há pesquisas para compressão de hidrogênio em cilindros que suportem altíssimas pressões. O objetivo das montadoras de automóveis é atingir pressões internas de até 10.000 psi, pelo menos. Algumas já conseguiram, mas o nível de segurança deve ser altamente confiável. Por isso, a maioria dos protótipos são de 5.000 psi.

As cinco principais formas de se armazenar hidrogênio são:

- Reservatórios de Gás Hidrogênio Comprimido;
- Reservatórios para Hidrogênio Líquido;
- Hidretos Metálicos;
- Adsorção de Carbono;
- Micro-esferas.

Algumas restrições existem para armazenamento de combustível em larga escala. Uma opção seria armazenar o hidrogênio em tanques subterrâneos, onde se pode aproveitar a experiência obtida com o desenvolvimento de armazenamento de gás natural. Outra opção é armazenar na forma líquida, o que é provavelmente a solução mais cara principalmente porque deve ser mantido a uma temperatura inferior a  $-253^{\circ}\text{C}$ .

## **5. Distribuição de Hidrogênio [1,2,5,6]**

No setor de distribuição e entrega, o capital de investimento é o maior empecilho para a economia do hidrogênio. Sistemas de distribuição de gás já existem em algumas partes dos EUA em redes de gasodutos (~1126 km) e entregas diretas através de transporte de superfície. Mas quando comparado aos gasodutos de gás natural, por exemplo, a rede de hidrogênio é 300 vezes menor.

Tecnicamente, os gasodutos de hidrogênio não são diferentes dos gasodutos de gás natural quando se fala em instalação e manutenção. A diferença mesmo está em seu preço.

As estimativas de custos de gasodutos de hidrogênio, segundo a *ANL (Argonne National Laboratory)*, é de US\$ 300.000 a US\$ 1.4 milhão por 1,6 km dependendo do comprimento e diâmetro, de algumas funções específicas do gasoduto e do meio ambiente de construção. Se comparado com o custo atual de gasodutos de gás natural, em torno de US\$ 200.000 a US\$ 800.000 que já é alto, pode-se dizer que é muito dinheiro realmente.

Transportar hidrogênio liquefeito nas estradas não é muito barato, infelizmente, a capacidade de transporte atual é limitada. Apenas para dar uma noção, os veículos com tanques de hidrogênio de maior capacidade podem armazenar no máximo 3.600 kg de hidrogênio, enquanto os veículos com tanques de gasolina ou petróleo podem armazenar até 30.000 kg de combustível.

## **6. Segurança do Hidrogênio [1,2,5,6]**

O hidrogênio é muito mais seguro do que se imagina. É tão seguro quanto a utilização de outros combustíveis líquidos ou gasosos. No caso de um acidente, o hidrogênio tem diversas propriedades vantajosas quando comparado aos combustíveis convencionais. Ele dispersa rapidamente na atmosfera, enquanto os combustíveis líquidos se espalham pela superfície e queimam por muito mais tempo. Além disso, o hidrogênio não é tóxico, e o vazamento de um tanque de hidrogênio não causa uma catástrofe ambiental.

Embora o hidrogênio seja inflamável, a sua dispersão rápida faz com que raramente o hidrogênio atinja uma concentração de combustão ao ar livre ou em espaços fechados, mas ventilados. Se for utilizado adequadamente, pode ser mais seguro que a maioria dos combustíveis atuais.

Pesquisas em todo o mundo demonstram que o hidrogênio apresenta menos riscos referentes à segurança no seu uso, que outros combustíveis incluindo a gasolina, o propano e o gás natural.

O hidrogênio também tem um coeficiente de difusão 3,8 vezes maior que o do gás natural, 6,1 vezes maior que os vapores do propano, e 12 vezes maior que os vapores da gasolina. Conseqüentemente, o gás hidrogênio se eleva e difunde lateralmente mais rápido que o gás natural, propano ou gasolina. Em espaços abertos, a velocidade de dispersão maior do hidrogênio deve ser traduzida em menos incêndios. Também, para que o hidrogênio se queime para baixo, quando o ponto de ignição está por cima do gás, a mistura hidrogênio/ar deve ter ao menos 9% de hidrogênio. Para efeito de comparação, o metano tem um limite inferior de inflamabilidade de propagação abaixo de 5.6%, fazendo com que o metano seja mais propenso a iniciar uma ignição que o hidrogênio, devido a uma fonte de ignição localizada por cima da mistura gás/ar.

Se for manejado adequadamente, o ciclo de vida do hidrogênio deverá provar ser mais seguro que o do gás natural, propano e gasolina. A produção e transporte do hidrogênio teriam menos riscos públicos diretos, já que linhas de dutos de hidrogênio e caminhões pipa apresentam menos riscos públicos que caminhões pipa com petróleo. Além disso, o hidrogênio não é tóxico e não contaminará o ambiente como ocorreria num derramamento de propano ou gasolina.

Para se ter uma idéia do nível de segurança no transporte de hidrogênio, os caminhões de hidrogênio líquido americanos levaram pelas estradas do País uma média de 266 milhões de litros de hidrogênio líquido por ano, sem nenhum acidente sério.

Uma mistura gasosa alta em hidrogênio chamada "gás de cidade" utilizada para iluminar as ruas e casas, mostrou ter uma mesma taxa de segurança que o gás natural, usado de maneira similar. O hidrogênio tem sido manejado e enviado em centenas de quilômetros de gasodutos, com relativa segurança, para as indústrias de petróleo, química e do aço.

Desta forma, um trabalho de conscientização como foi feito com o gás natural deve ser feito para a introdução do hidrogênio em larga escala.

## **7. Infra-Estrutura para o Hidrogênio [1,2,5,6]**

O Hidrogênio deverá ser uma importante fonte de energia da indústria automotiva dentro de mais ou menos dez anos. Uma das principais razões de não termos em algum lugar no mundo automóveis sendo abastecidos por hidrogênio é exatamente pela falta de infraestrutura. A economia baseada no hidrogênio não irá ocorrer enquanto métodos de baixo custo e confiabilidade não forem identificados e estabelecidos em três áreas básicas: produção, distribuição e armazenamento. Entretanto, algumas iniciativas de se criar estradas com postos de hidrogênio já estão sendo tomadas nos EUA (Estados Unidos da América), Europa e Japão.

Os EUA, Alemanha e Japão, são os países que estão liderando as iniciativas de testar e implantar uma infra-estrutura que dê base para a introdução dos automóveis a hidrogênio. Em 2003, o número de postos de hidrogênio instalados foi o dobro de todos os postos instalados até 2002, acumulados desde 1992, quando o primeiro posto de hidrogênio foi instalado na Universidade da Califórnia, em *Riverside*, EUA.

Sabe-se que ainda estamos longe de uma infra-estrutura de comercialização do hidrogênio, mas investimentos intensivos estão ocorrendo em pesquisas sobre armazenamento e transporte do gás hidrogênio. Grandes empresas de energia, como a Petrobrás, Shell, BP, TotalFinalElf, ARAL e a Texaco, estão investindo bilhões de dólares para encontrar soluções que viabilizem esta infra-estrutura, juntamente com montadoras de automóveis e governos.

No Brasil, o etanol deverá ser a principal fonte de hidrogênio, primeiro pela infra-estrutura já montada para este combustível, segundo porque o país é atualmente o segundo maior produtor de etanol no mundo, com tendências de crescimento devido ao aumento de exportação e consumo do etanol no exterior, e em terceiro lugar, por ser uma fonte de energia renovável. Por estes motivos, pesquisas sobre armazenamento, produção e distribuição de hidrogênio, além de CaC's que utilizem o etanol como fonte, estão começando a crescer no País. Desta forma, o Brasil poderá ser um dos Países de referência da tecnologia CaC.

## **8. Pesquisa e Desenvolvimento no Brasil [4-6]**

Muitas pesquisas para desenvolver a tecnologia do hidrogênio estão sendo realizadas em todo o mundo, com o intuito de criar uma infra-estrutura para o hidrogênio, ou melhor, para a "Economia do Hidrogênio". Os principais desafios estão na diminuição do custo de produção de hidrogênio, o seu armazenamento, a reforma de combustíveis fósseis para obtenção do hidrogênio, o transporte de hidrogênio, entre outros desafios.

A maioria das aplicações do hidrogênio está voltada, principalmente, ao seu uso na indústria química. Mas à medida que o desenvolvimento das CaC's vem crescendo, uma grande infra-estrutura do hidrogênio será necessária, para atender a esta revolucionária tecnologia e que está evoluindo e em constante crescimento.

O Brasil, apesar de estar começando a desenvolver a tecnologia CaC num número maior de atividades públicas e privadas, já tem uma experiência considerável na tecnologia do hidrogênio, embora ainda seja insignificante em termos quantitativos, e a maior parte dos estudos direcionados para o setor petrolífero e atividades de indústrias químicas na produção de peróxido de hidrogênio, por exemplo.

Atualmente, as linhas de pesquisas do hidrogênio para aplicações em CaC's estão focadas na produção de hidrogênio por eletrólise da água, na reforma do etanol e do gás natural e no armazenamento de hidrogênio em metais, denominado de hidretos.

Desde 1999, o MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia) passou a avaliar a reforma de etanol para produção de hidrogênio e atender a um mercado potencial no Brasil e em toda América Latina. Este interesse estratégico do MCT estimulou programas de pesquisa conjunta e de cooperação internacional como a estabelecida entre o CERBIO (Centro Brasileiro de Referência em BioCombustíveis) e a *Fuel Cell Engines*.

Esta cooperação foi seguida de um acordo entre a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) e a empresa Clamper. O objetivo do acordo de confidencialidade era a implementação de um projeto de desenvolvimento de protótipo de uma *PEMFC* para aplicação estacionária utilizando o etanol como combustível. O primeiro protótipo de 1,5 kW foi apresentado no Congresso Anual da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em novembro de 2001.

A empresa também está desenvolvendo eletrodos para etanol. Os agentes colaboradores em vários projetos da CEMIG e da Clamper são: a FIPAI (Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial), o EESC (Escola de Engenharia de São Carlos) da USPSC (USP de São Carlos), a UNITECH, o IQSC (Instituto de Química de São Carlos) da USPSC (USP de São Carlos) e a Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo).

Em 2002, o MCT intensificou seus esforços na identificação de competências científicas e tecnológicas na área de CaC's e realizou um trabalho de prospecção sobre o tema no País, visando a ordenação das ações de Pesquisa e desenvolvimento dos sistemas de CaC's. Foi então, criado o PROCaC (Programa Brasileiro de Sistemas de Células a Combustível) que hoje é conhecido como PROH2 (Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio). Entre os vários desafios identificados estão a produção, o armazenamento e a distribuição do hidrogênio, além da capacitação de recursos humanos, regulação quanto à segurança e padronização e necessidade de parcerias efetivas entre instituições do governo, setor industrial, setor de serviços, ONGs (Organizações Não Governamentais), entre outros.

Entre alguns dos objetivos do PROCaC está a ampliação da produção e uso de hidrogênio como vetor energético. O programa contempla a implementação de redes de pesquisa e desenvolvimento como as Redes de CaC's e Eletroquímica onde são previstos investimentos em sistemas de *SOFC* e *PEMFC* com uso de hidrogênio ou etanol direto; Rede de Combustíveis e Hidrogênio com investimentos em projetos de reforma de etanol e gás natural para produção de hidrogênio, reforma de gás liquefeito de Petróleo para produção de hidrogênio, produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis de energia, entre outros temas; Rede de Sistemas, Integração e Uso, com investimentos em sensores e atuadores entre outros temas; e a Rede de Utilização para Aperfeiçoamento da Produção de

Hidrogênio através de eletrólise, o armazenamento, transporte e distribuição do hidrogênio, segurança, certificação, códigos e padrões e formação de recursos humanos especializados.

No final de 2003, a Itaipu Binacional realizou, em Foz do Iguaçu, o 1º Encontro de Tecnologias do Hidrogênio. A iniciativa teve como objetivo discutir o uso e a tecnologia de produção desse modelo mundial de combustível. O hidrogênio poderá ser utilizado nos projetos do PTI (Parque Tecnológico Itaipu), em parceria com a UFPR (Universidade Federal do Paraná) e o TECPAR (Instituto de Tecnologia do Paraná) através do CERBIO.

Em Outubro de 2003, o IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), promoveu o 1º Workshop sobre Células a Combustível, contando com a presença de pesquisadores da instituição e de diversos especialistas nacionais, convidados para debaterem temas de interesse para o desenvolvimento das CaC's e utilização de hidrogênio. Em outubro de 2005 foi realizado o 2º Workshop sobre Células a Combustível com as mesmas finalidades. O encontro foi muito importante para o setor no País e contou com a presença do coordenador do PROH2 do MCT, de representantes de centros de pesquisas como, CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica) da Eletrobrás, CENPES (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello) da Petrobrás, INT (Instituto Nacional de Tecnologia), IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e de universidades como a UNICAMP (Universidade de Campinas), o Instituto de Química da USP de São Carlos, e UNESP (Universidade Estadual de São Paulo) de Bauru, além de empresas que desenvolvem a tecnologia, como a Eletrocell, empresa incubada no CIETEC (Centro Incubador de Empresas Tecnológicas), localizado no campus do IPEN.

No mês de Março de 2004, o Laboratório de Hidrogênio da COPPE / UFRJ realizou dois eventos voltados para o desenvolvimento de novas tecnologias do hidrogênio no Brasil: o lançamento do Núcleo de Referência em Tecnologia e Economia do Hidrogênio e o Seminário da Rede PaCOS (Rede Cooperativa Pilha a Combustível de Óxido Sólido). Este mesmo seminário foi realizado por mais duas vezes, sendo uma em 2005 e a última em Março de 2006. O Núcleo, de abrangência nacional, está sendo criado através de uma parceria entre a COPPE / UFRJ e o CEPEL / Eletrobrás, consideradas âncoras fundadoras do projeto, e contará com a participação de institutos, centros de pesquisas e outras empresas do ramo, através de associações.

## **9. Conclusões**

Pesquisas de desenvolvimento em relação ao Hidrogênio estão sendo realizadas em todo o mundo por empresas de energia, montadoras de automóveis, fabricantes de equipamentos eletrônicos, universidades e centros de pesquisa especializados em energia alternativa, com o objetivo de diminuir principalmente os custos de sua produção, armazenamento, transporte, segurança e infra-estrutura.

No contexto internacional, verifica-se a adoção de ações visando ampliar o aproveitamento de energias renováveis com uma progressiva redução no uso dos combustíveis fósseis, reestruturando a produção, a distribuição, o uso da energia e incorporando novas tecnologias.

A maior parte do hidrogênio produzido em todo o mundo ainda é utilizado como matéria-prima na fabricação de produtos como os fertilizantes, na conversão de óleo líquido em margarina, no processo de fabricação de plásticos e no resfriamento de geradores e

motores. Entretanto, as pesquisas sobre o hidrogênio estão rapidamente sendo concentradas na geração de energia elétrica, térmica e de água pura através das “Células a Combustível”. O que chama a atenção principalmente, é que o hidrogênio é o elemento químico mais básico e abundante na natureza, e que sua combustão é totalmente limpa.

Existe um movimento em favor de uma economia baseada no hidrogênio, e não mais no petróleo. Uma nova infra-estrutura de produção, armazenamento, distribuição e transporte e uso da energia deverá surgir como forma de distanciar o mundo de um regime energético baseado em combustíveis fósseis, limitando as emissões de CO<sub>2</sub> a apenas duas vezes o nível pré-industrial, minimizando os efeitos do aquecimento global em todo o Planeta e gerando energia de uma forma mais limpa, segura e eficiente.

Portanto, a tecnologia baseada no hidrogênio é sem dúvida muito promissora e o hidrogênio será o vetor energético do futuro, não apenas no setor energético, mas também sendo um importante alicerce sócio-ambiental.

## 10. Agradecimentos

Os autores agradecem a Faculdade Alfacastelo pela oportunidade de publicar um artigo teórico e conceitual sobre o tema “Hidrogênio” e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro concebido.

## 11. Bibliografia

- [1] KORDESCH, K., SIMADER, G. *Fuel Cells and Their Applications*, 1 ed., New York-Cambridge, 1996.
- [2] BLOMEN, J.M.J., MUGERWA, M.N. *Fuel Cell Systems*, 1 ed. New York-Plenum Press, 1993.
- [3] APPLEBY, A.J.; FOULKES, F.R. *Fuel Cell Handbook*. New York, N.Y.: Van Nostrand Reinhold Co., 1989.
- [4] ALDABÓ, R. *Célula a Combustível: fonte de energia da nova era*. São Paulo: Editora Artliber, 2004.
- [5] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Fundo Setorial de Energia. Secretaria Técnica. Programa Brasileiro de Células a Combustível: proposta para o programa*. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE, 2002.
- [6] FULLER, T.F. *Is a Fuel Cell in Your Future?* *Electrochem. Soc. Interface*, v. 6, n. 3, p. 26-32, 1997.
- [7] *Hydrogen as an Alternative Automotive Fuel*. *Fuel Cell Engines for Vehicle. Cleaner Cars. Automotive Eng.* Jun. 1997.