

# GERAÇÃO E COMBUSTÃO DO HIDROGÊNIO OBTIDO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ELETRÓLISE DA ÁGUA

**Roberto Liberato Neto**

[roberto.liberato@yahoo.com.br](mailto:roberto.liberato@yahoo.com.br)

**José Roberto Simões Moreira (Orientador)**

[jrsimoes@poli.usp.br](mailto:jrsimoes@poli.usp.br)

*Resumo* – Atualmente estima-se que as reservas de petróleo conhecidas durem em torno de 50 anos. Com a redução dessas reservas os preços em um futuro próximo atingirão valores impraticáveis para aplicação como combustível. Diante deste cenário, a sociedade do hidrogênio é um termo que vem ganhando notoriedade mundial. Uma opção bastante promissora é a obtenção do hidrogênio através do processo de eletrólise da água. Diante disto, o trabalho tem como foco o estudo detalhado do processo de obtenção do hidrogênio eletrolítico, buscando formas de aprimorar e, fundamentalmente, aumentar a eficiência energética do processo como um todo. Ou seja, o objetivo é a construção de um maçarico a hidrogênio, e dessa forma analisar e comparar a viabilidade técnica e econômica do mesmo frente às tecnologias atualmente existentes. Considerando as propriedades térmicas que advêm da queima do hidrogênio com oxigênio puro, o mesmo pode ser utilizado para aplicações específicas como soldagem, corte, fundição, pré-aquecimento e outros. Para essas aplicações o hidrogênio se mostra competitivo comparado aos gases já comercialmente existentes (oxi-acetileno, e.g.). Além disso, alguns experimentos foram realizados com o objetivo de constatar a influência da corrente pulsada sob condições de alta voltagem na eficiência da eletrólise, porém nenhum resultado conclusivo foi obtido. É necessária uma investigação mais aprofundada sobre este assunto, o qual demandaria um tempo maior de pesquisa.

*Palavras chave:* hidrogênio, eletrólise da água, combustíveis alternativos, energia térmica, combustão.

## 1. Introdução

O hidrogênio não é um combustível primário, encontrando-se quase sempre associado a outros elementos químicos, e para utilizá-lo é necessário extraí-lo de sua fonte de origem, o que normalmente implica no gasto de uma certa quantidade de energia. O hidrogênio assim produzido contém grande parte da energia química, térmica e/ou elétrica empregada em sua geração, a qual poderá ser recuperada praticamente em sua totalidade por meio de processos adequados. Dentre todos os combustíveis o hidrogênio é o que possui a maior quantidade de energia por unidade de massa, ou seja, cerca de três vezes o poder calorífico dos combustíveis derivados de petróleo.

Apesar da energia armazenada pelo hidrogênio ser menor do que a energia total utilizada na sua obtenção, o mesmo apresenta vantagens importantes que o qualificam como um dos combustíveis que irão, certamente, substituir os derivados de petróleo. A principal vantagem do hidrogênio é que reações químicas necessárias para reconverter-lo em energia produzem somente água como produto final, ou seja, não há emissão de gases poluentes ou gases de efeito estufa. Outras vantagens são seu alto poder calorífico, apesar da pequena massa específica, não ser tóxico e ser bastante reativo.

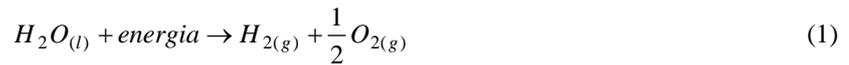
Por outro lado, as atuais tecnologias para o uso energético do hidrogênio não lhe conferem competitividade frente aos energéticos concorrentes. Além disso, não existe hoje no mundo infra-estrutura que instalada contemple, do ponto de vista comercial, as atividades de produção, armazenamento, transporte, distribuição e consumo do hidrogênio energético. Os desafios inerentes ao desenvolvimento da utilização do hidrogênio como vetor energético, embora expressivos, não configuram dificuldades intransponíveis.

A tecnologia do hidrogênio abrange várias áreas nos quais conhecimentos relativos a armazenamento, transporte e manuseio são inerentes à implementação de uma economia baseada nesse combustível. Entretanto, cabe ressaltar, que este trabalho não abrange todas as formas existentes de obtenção do gás hidrogênio, focalizando apenas o estudo específico da geração do hidrogênio através da eletrólise da água. O trabalho, mais em caráter prático-experimental, tem como foco o aprimoramento do processo da eletrólise, objetivando um aumento no rendimento na produção do hidrogênio. A construção do eletrolisador será feita de tal forma que os gases hidrogênio e oxigênio serão produzidos juntos e posteriormente consumidos na combustão para geração de energia térmica. No processo da eletrólise, como resultado tem-se a liberação de uma mistura estequiométrica entre hidrogênio e oxigênio, mistura essa com alto poder reativo e que produz elevadas temperaturas de chama quando em processo de combustão. Em virtude disso, por razões de segurança, evita-se armazenar grandes quantidades desse gás, sendo o mesmo consumido na queima logo após a sua produção. Convencionou-se nesse trabalho o nome “oxi-hidrogênio” para a mistura de hidrogênio e oxigênio proveniente do processo da eletrólise. Ou seja, toda vez que aparecer o termo oxi-hidrogênio este designa-se a mistura estequiométrica, isto é, dois átomos de hidrogênio para um átomo de oxigênio.

## 2. Produção do hidrogênio pelo processo da eletrólise

O processo da eletrólise define-se como uma reação química desencadeada a partir de uma fonte de energia externa ao sistema químico. O fornecimento da tensão e da corrente contínua é efetuado entre os eletrodos do eletrolisador, sendo os mesmos separados por um eletrólito com boa condutividade iônica.

O processo particular que quebra a molécula da água em hidrogênio e oxigênio é denominado eletrólise da água. A reação total desse processo é:



A energia absorvida no processo é convertida em calor nos eletrodos e energia química na forma de hidrogênio gasoso. As reações nos eletrodos são descritas como:



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

## 2.1 Termodinâmica da eletrólise da água

A primeira lei da termodinâmica para um sistema aberto é (Shaaban et al.(1994)):

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

Onde  $Q$  é o calor fornecido ao sistema,  $W$  o trabalho líquido realizado e  $\Delta H$  a diferença de entalpia no sistema. Como o único trabalho realizado é a energia elétrica aplicada ao eletrolisador,  $W$  pode ser escrito como:

$$W = -n \cdot F \cdot E \quad (5)$$

Onde:

- $n$  número de elétrons transferidos;
- $F$  constante de Faraday (=23074 cal/volt equivalente);
- $E$  potencial elétrico [V];

Substituindo a Eq. (4) em (5) tem-se:

$$E = \frac{\Delta H - Q}{n \cdot F} \quad (6)$$

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

$$Q = T \cdot \Delta S \quad (7)$$

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

Substituindo a Eq. (7) em (6) resulta na definição do potencial mínimo reversível necessário para realização da eletrólise na condição de perdas nulas.

$$E_{rev} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{nF} \quad (8)$$

Na Eq. (8), o termo do numerador ( $\Delta H - T\Delta S$ ) é a variação da energia livre de Gibbs  $\Delta G$ . Nas condições normais de pressão e temperatura (1atm e 25C)  $\Delta H$  é igual a 68320cal/mol e  $\Delta G$  igual a 56690cal/mol. Portanto, o potencial reversível entre os eletrodos pode ser calculado por:

$$E_{rev} = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{56690}{2 \cdot 23074} = 1,23 \text{ volts} \quad (9)$$

Entretanto, devido às perdas no processo da eletrólise, o potencial requerido entre os eletrodos é maior do que o potencial reversível. Na Eq. (6),  $n$  e  $F$  são constantes, e considerando as mesmas condições de pressão, temperatura e concentração de eletrólito,  $\Delta H$  é constante e  $Q$  variará conforme  $E$  variar. Como o processo se torna irreversível,  $Q$  diminuirá e possivelmente pode tornar-se negativo quando a energia é perdida na 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 (thermoneutral voltage). Esse potencial é dado por:

$$E_{\text{termo}} = \frac{\Delta H}{nF} = 1,48 \text{ volts} \quad (10)$$

Entretanto, o potencial a ser aplicado nos eletrodos, porém, deve ser maior do que o calculado pela Eq. (10). 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:

$$E = E_{\text{rev}} + \text{Perdas} \quad (11)$$

Onde as perdas no processo da eletrólise são:

$$\text{Perdas} = E_{\text{anodo}} + E_{\text{catodo}} + E_{\text{tm}} + IR \quad (12)$$

Onde

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

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

$E_{\text{tm}}$  sobre-tensão da 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” (*overpotential*) 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:

$$\eta = \frac{\Delta H}{\Delta G + \text{perdas}} = \frac{E_{\text{termo}}}{E} \quad (13)$$

Entretanto, sobre 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% a 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.

## 2.2 Melhorias no processo da eletrólise

A análise termodinâmica da eletrólise da água mostra que a energia elétrica requerida para uma taxa de dissociação real pode ser reduzida se o número de elétrons envolvidos na reação (equação 6) for maximizado e as perdas que aumentam o potencial da célula (equação 11) forem minimizadas. A sobre-tensão de ativação é uma das perdas e representa a energia requerida para superar a barreira de potencial a qual retarda o processo de descarga iônica nos eletrodos. A sobre-tensão é predominante no anodo e representa a uma das maiores perdas no eletrolisador. Com o objetivo de facilitar a descarga iônica, e consequentemente a taxa de produção de hidrogênio, é necessário diminuir a barreira de energia no anodo.

### 2.2.1 Depolarização

Conforme citado no item 2.2, na decomposição eletroquímica da água, a sobre-tensão é predominante no anodo. Dessa forma, adicionando-se determinadas substâncias na parte do eletrólito que fica ao redor do anodo é possível reduzir a sobre-tensão que causa as perdas no eletrolisador. O depolarizador pode ser, por exemplo, o dióxido de enxofre ou o cloro. É importante que os mesmos sejam razoavelmente baratos, não tóxicos e fácil de serem removidos do eletrólito.

Uma das vantagens da depolarização é que ao invés de ocorrer à produção de oxigênio no anodo terá, muito possivelmente, a produção de um outro produto mais interessante que pode ser usado para venda.

### 2.2.2 Eletrólise com corrente pulsada

O uso de corrente pulsada em reações eletroquímicas não é uma técnica nova. Usando um interruptor mecânico e uma fonte de corrente contínua, John Bockris, professor de química da Universidade do Texas A&M (Texas A&M University), reportou dois fenômenos em 1952. Imediatamente após aplicar uma voltagem em um sistema eletroquímico, uma alta, porém não duradoura corrente era observada. Além disso, quando a voltagem aplicada era

desconectada ao sistema, uma quantidade de corrente significativa continuava a fluir durante um curto período de tempo. Em 1984, Ghoroghchian e Brockris projetaram um gerador para alimentar um eletrolisador com voltagem pulsada. Nesse trabalho, eles concluíram que a taxa de produção do hidrogênio tinha sido aumentada em aproximadamente duas vezes em relação à voltagem contínua. Suas conclusões foram confirmadas, posteriormente, por outros cientistas ao redor do mundo. Alguns atribuíram esse aumento na taxa de produção do hidrogênio a melhorias em relação à transferência de massa no eletrolisador.

Durante a eletrólise convencional, um filme de bolhas de gás forma-se sobre os eletrodos, aumentando a resistência de sobre-tensão. Quando o sistema é excitado com voltagem pulsada, a resistência de sobre-tensão das bolhas de gás é totalmente eliminada. Além disso, um efeito mais drástico sobre a eficiência pode ser observado se o sistema for alimentado com voltagem pulsada em frequências de ressonância com os componentes que fazem parte do processo eletroquímico (Shabaan et al(1994)).

### 2.2.3 Eletrólise sob altas temperaturas

Outra forma de se realizar a eletrólise e que é palco de muitas discussões é a eletrólise de alta temperatura. Comparativamente a eletrólise convencional, a eletrólise de alta temperatura quando operada na faixa de 800 a 1000°C oferece a vantagem de uma menor necessidade de energia específica (aproximadamente 35% inferior), apresentando uma taxa que varia de 2,6 a 3kWh/Nm<sup>3</sup> de hidrogênio produzido. Ao contrário da eletrólise convencional, que utiliza somente a corrente elétrica para retirar o hidrogênio da água, a eletrólise de alta temperatura aumenta a eficiência do processo pela adição de uma fonte de calor externa. Essa é a razão desse ser um campo considerado pouco promissor: a fonte externa de energia torna o balanço do processo altamente desfavorável.

Entretanto, uma idéia recente que tem despertado interesse é o aproveitamento de uma usina nuclear que além de fornecer a eletricidade para realizar a eletrólise proporciona temperaturas e pressões adequadas para viabilizar um processo eletrolítico com maior rendimento.

## 3. Trabalho experimental

A princípio, a idéia era construir um sistema composto de um painel fotovoltaico, um conversor CC/CC, um módulo eletrônico, o eletrolisador (maçarico), um borbulhador e o bico para queima. Porém, em virtude dos altos custos e de problemas operacionais com prazo, descartou-se a utilização de painéis solares, passando a operar o eletrolisador com energia proveniente da rede elétrica. Para alimentar o eletrolisador nos níveis de corrente e tensão requeridos, utilizou-se uma fonte estabilizadora de corrente contínua (15V e 20A) a qual foi dimensionada conforme projeto do reator. A configuração do sistema fica conforme Fig. (1) que segue.

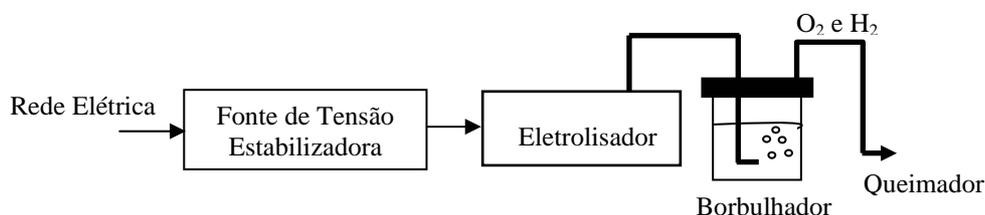


Figura 1. Esquema do sistema de geração e queima de hidrogênio.

Um dos dispositivos indispensáveis como parte integrante do sistema é o borbulhador, uma vez que atua como um mecanismo de segurança com o objetivo de evitar que a chama se propague para dentro do reator (eletrolisador). O mesmo consiste em um recipiente com água, onde os gases oxigênio e hidrogênio são borbulhados antes de serem encaminhado para a queima.

### 3.1 Características construtivas do eletrolisador

Para poder dimensionar o eletrolisador, um dos parâmetros limitantes é a potência disponibilizada. Para sustentar a chama no maçarico, deseja-se uma produção média de gás oxi-hidrogênio em uma taxa de 100 litros por hora. Dessa forma, para atender essa produção de gás, estima-se uma energia necessária de aproximadamente 300W. Logo, foram definidos como parâmetros iniciais uma voltagem de 15V e uma corrente de 20A as quais são fornecidos pela fonte estabilizadora.

Construtivamente, o eletrolisador foi dimensionado para operar com pressões em torno de 0,2 à 0,5kgf/cm<sup>2</sup>. A pressão é importante para propiciar a queima adequada do gás oxi-hidrogênio no bico queimador, uma vez que é necessária uma velocidade de escape dos gases entre 10 à 15m/s. Os eletrodos foram construídos no formato de um quadrado de lado medindo 8,5 centímetros, de aço inox 304. Logo, a área de cada eletrodo é de 8,5x8,5=72,25cm<sup>2</sup>, resultando em uma densidade de corrente por área de aproximadamente 0,28A/cm<sup>2</sup> (20A/72,25cm<sup>2</sup>) próximo dos limites máximos estipulados.

Considerando que a tensão de entrada foi fixada em 15V, o eletrolisador foi projetado com um total de 10 pares de eletrodos afim de se obter uma tensão de 1,5V por par, o mais próximo possível da tensão mínima necessária (1,48V)

calculada no item 2.1. Os eletrodos foram dispostos paralelamente uns aos outros com um espaçamento de 2,0 milímetros entre os mesmos. Os pares de eletrodos foram alocados separadamente com o principal objetivo de facilitar a dispersão das bolhas de oxigênio e hidrogênio produzidos. A carcaça do eletrolisador foi construída em acrílico para possibilitar a visualização interna. Todos os acessórios utilizados tais como conectores elétricos, parafusos, porcas, e outros, são de aço inox. Na tampa superior do eletrolisador foram instalados um medidor de pressão (manômetro) e um sensor de temperatura. As Fig's. (2) e (3) mostram o eletrolisador testado.

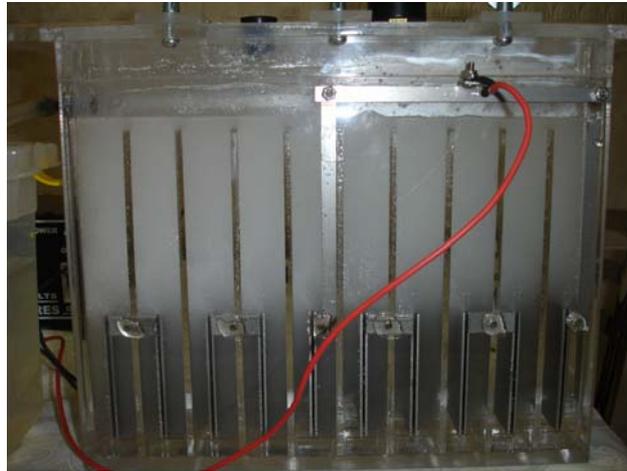


Figura 2. Visão geral do eletrolisador analisado.

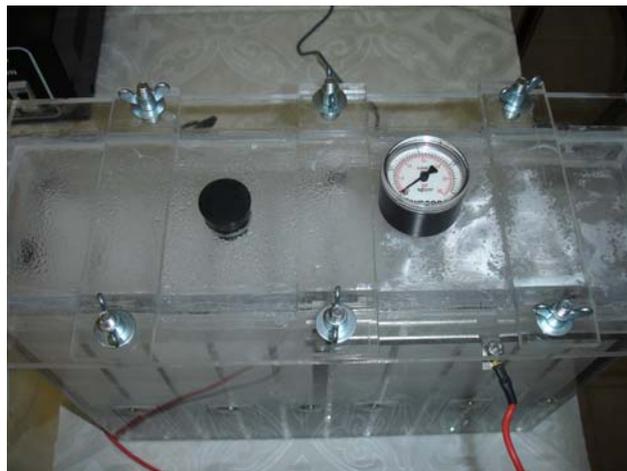


Figura 3. Detalhe do eletrolisador estudado.

A quantidade de gás produzido teórico, em um primeiro momento, pode ser calculada através da primeira Lei de Faraday que segue:

$$V = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} \quad (14)$$

Onde:

- $V$  volume de gás [L];
- $R$  constante dos gases =  $0,0820577 L \cdot atm / (mol \cdot K)$ ;
- $I$  corrente [A];
- $T$  temperatura [K];
- $t$  tempo [s];
- $F$  constante de Faraday =  $96485,31 As / mol$ ;
- $p$  pressão [atm];
- $z$  número de elétrons em excesso (2 para  $H_2$  e 4 para  $O_2$ );

Considerando condições normais de temperatura e pressão (1atm e 25°C) e admitindo que a eletrólise ocorra com uma corrente de 1 ampere durante 1 hora, a quantidade de gás produzido (nas condições ideais) é de:

$$V_{H_2} + V_{O_2} = 0,4564L + 0,2282L = 0,6846L$$

O valor calculado acima corresponde á 0,685 LPH/Amp ou 1,460 A/LPH para um par de eletrodos. Considerando que a fonte fornece uma corrente de 20A com 15V na saída (aprox. 300W) e que o eletrolisador é formado por 10 pares de eletrodos, a quantidade de gás produzida fica:

$$V_{TOTAL} = 0,685 \cdot 20 \cdot 10 \cong 137 \text{ Litros / h}$$

O número de eletrodos é função da voltagem de entrada. Procura-se sempre uma voltagem entre os eletrodos um pouco acima da voltagem ideal de 1,48V. Para o caso analisado tem-se uma voltagem de 15V/10pares=1,50 volts entre os pares de eletrodos.

Alguns experimentos foram realizados com a configuração descrita acima (15V e 20A) obtendo-se uma produção máxima de gás oxí-hidrogênio por volta de 100litros/h a uma temperatura medida de 70°C. Nos experimentos utilizou-se o hidróxido de potássio em raspas como eletrólito para aumentar a condutividade, a uma razão de 28% do peso total da mistura (água mais KOH).

Dessa maneira, a eficiência energética pode ser determinada dividindo-se o total de energia consumida pela quantidade de gás produzido, ou seja, 3,0W/LPH (ou **4,5W** por litro de hidrogênio produzido). Para uma eletrólise com 100% de eficiência a relação entre a potência consumida e produção de gás é de 1,48V/0,685=2,16W/LPH. Logo, o eletrolisador testado tem uma eficiência de 72% em relação a Lei de Faraday.

Em termos energéticos, tem-se:

- Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio: 119,6kJ/g (Tab. (1))

- Densidade do Hidrogênio: 0,083kg/m<sup>3</sup>

- Produção de 100l/h de oxí-hidrogênio: 33 litros de O<sub>2</sub> e 67 litros de H<sub>2</sub>

Logo a energia produzida é de 119,6kJ/g x 0,083g/l x 67l/h = 665,1kJ/h = 184,8W.

Como a potência entregue ao sistema foi de 300W, tem-se uma eficiência energética em torno de **62%**.

### 3.2 Combustão do hidrogênio

Quando duas moléculas de hidrogênio combinam-se com uma molécula de oxigênio, em presença de um agente ignidor, a reação é do tipo oxidante, exotérmica violenta, produzindo luz e calor intenso, gerando 119,6 kJ/g e água vaporizada (PCI). A liberação de tanta energia térmica pode ser aproveitada de várias maneiras, sem preocupação com a poluição, pois o subproduto é novamente água.

O hidrogênio tem a mais alta energia por unidade de peso comparativamente com qualquer combustível, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais leve e não tem os pesados átomos de carbono. É por essa razão que o hidrogênio tem sido usado intensamente nos programas espaciais onde o peso é crucial. A quantidade de energia liberada durante a queima do hidrogênio é cerca de 2,5 vezes a dos hidrocarbonetos tais como a gasolina. A Tab. (1) mostra as propriedades químicas e os correspondentes custos dos diferentes combustíveis.

Tabela 1. Preço de mercado de vários combustíveis (base junho/2007).

Combustível	PCI por unidade de massa (kJ/kg)	PCI por unidade de volume (kJ/m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Referência R\$/m <sup>3</sup>	R\$/GJ
<b>Hidrogênio</b>	119.600	9.967	0,083	5 a 18	502 a 1.800
<b>Acetileno</b>	48.274	56.480	1,170	25	443
<b>Gás Natural</b>	49.694	35.780	0,720	0,50 a 1,60	14 a 45
<b>GLP</b>	46.044	100.836	2,190	29/butijão de 13kg	48
<b>Etanol hidratado</b>	26.378	21.334.000	809	1.570	74
<b>Metanol</b>	19.900	15.820.000	795	1.060	67
<b>Gasolina</b>	44.173	32.776.000	742	2.200	67
<b>Diesel</b>	43.335	36.922.000	852	1.540	42

O preço do gás hidrogênio indicado na Tab. (1) foi tomado de alguns fornecedores, e é possível verificar uma grande variedade e isso, em parte, é explicado, pois o preço depende da quantidade em m<sup>3</sup> de gás comprado. É possível verificar da Tab. (1) que em termos de energia, o hidrogênio é o que apresenta o maior custo comparado aos demais gases quando são considerados os preços de mercado dos gases combustíveis. Porém, se o hidrogênio for gerado através

de um eletrolisador, conforme o construído e testado nesse trabalho, com uma taxa de eficiência de **4,5kWh/Nm<sup>3</sup>**, e considerando que o único custo é o da energia elétrica, tem-se:

- Custo da Eletricidade: 0,24606 R\$/kWh (ELETROPAULO, 2007)
- Eficiência do Eletrolisador: 4,5kWh/Nm<sup>3</sup> de hidrogênio
- Custo Total: **R\$ 1,11/m<sup>3</sup>** de hidrogênio (111 R\$/GJ)

Logo, quando gerado da forma explicitada acima, o custo do hidrogênio é quase **5 vezes** menor do que aquele comprado no mercado. Além disso, comparando com o oxi-acetileno, o qual também é utilizado em aplicações que requerem altas temperaturas de chama, o hidrogênio apresenta-se muito mais viável economicamente, além de possuir uma maior temperatura de chama.

A máxima temperatura adiabática de chama que pode ser atingida, para um dado combustível e um certo estado nos reagentes, ocorre quando a mistura é estequiométrica. Para o caso da combustão do hidrogênio, quando operada com oxigênio puro, tem-se a maior temperatura de chama dentre todos os combustíveis. Essa é a principal vantagem de usar o gás oxi-hidrogênio, previamente produzido no eletrolisador nas quantidades estequiométricas, pois o mesmo pode ser utilizado para aplicações específicas que requeiram altas temperaturas de chama.

A Tab. (2) fornece a temperatura adiabática de chama de alguns gases combustíveis, assumindo a hipótese de que o combustível e o comburente estejam na temperatura ambiente de 20°C.

Tabela 2. Temperatura adiabática de chama para diversos combustíveis (Smith et al.(1952)).

Substância	Comburente	
	Ar (°C)	Oxigênio (°C)
Metano	1957	2810
Etano	1960	-
Propano	1980	2820
Butano	1970	-
<b>Hidrogênio</b>	<b>2300</b>	<b>4727</b>
Acetileno	2400	3100

Devido ao elevado grau de risco de acidentes associados à queima do gás oxi-hidrogênio, cuidados rigorosos foram tomados a fim de minimizar a probabilidade de incidentes. O uso do borbulhador como dispositivo de segurança, conforme já citado nesse relatório, é de extrema importância para isolar a chama do restante do sistema. Além disso, é importante salientar que o acúmulo de uma quantidade muito grande do gás deve ser evitado, procurando sempre consumi-lo logo após a sua produção.

Após realizar alguns testes, constatou-se que o eletrolisador não estava apto a pressurizar o gás produzido, não sendo possível, portanto, realizar a queima.

#### 4. Conclusões

Considerando o fim da era do petróleo nas próximas décadas e os problemas ambientais devido às emissões de gases poluentes, a vertente que coloca o hidrogênio como possível substituto dos combustíveis fósseis ganha cada vez mais força. Conforme visto nesse trabalho, existem várias formas de se obter o hidrogênio, porém para que seja ambientalmente limpo, o hidrogênio deve ser obtido através de fontes renováveis de energia. Essas fontes incluem o uso da energia oriunda de geradores eólicos, células fotovoltaicas, biomassa, geotérmica e outros.

A ciência da eletrólise da água tem apresentado progressos expressivos no que diz respeito ao rendimento do processo. Estudos recentes sugerem que o rendimento da reação eletroquímica pode ser aumentado consideravelmente e vir a tornar-se atraente do ponto de vista energético. A combinação da topologia de células (par de eletrodos) em série com um mínimo espaçamento é muito eficiente, isso por que permite que as células operem o mais próximo possível da voltagem ótima de 1,48V. Adicionalmente as características construtivas, fatores como corrente contínua pulsada e depolarização podem ser decisivos no aumento da performance do processo da eletrólise da água para geração do hidrogênio. Alguns experimentos foram realizados com o objetivo de constatar a influência da corrente pulsada sob condições de alta voltagem na eficiência da eletrólise, porém nenhum resultado conclusivo foi obtido. É necessária uma investigação mais aprofundada sobre este assunto, o qual demandaria um tempo maior de pesquisa.

A execução do maçarico para a queima de hidrogênio, um dos objetivos do trabalho, não foi possível uma vez que o projeto do eletrolisador não permitiu a aplicação de pressões que apresentem velocidades adequadas sem ocorrer retorno da chama. A geometria escolhida para o eletrolisador não é favorável à aplicação de pressões necessárias para a alimentação de um maçarico. Um eletrolisador com construção em formato cilíndrico seria mais favorável para pressões mais elevadas e com isto podendo alimentar um queimador.

A utilização do hidrogênio como combustível térmico não é comum, exceto quando constitui parte do gás produzido em gaseificadores ou reformadores. Porém, ficou constatado que, quando o hidrogênio é gerado através de

um eletrolisador que apresente uma eficiência alta, o mesmo se torna muito viável economicamente para aplicações que requeiram elevadas temperaturas (fundição, corte, etc), uma vez que quando queimado com oxigênio puro produz uma temperatura adiabática de chama da ordem de 4727°C. Comparando, por exemplo com o gás oxí-acetileno que também é utilizado em aplicações semelhantes, o hidrogênio produzido dessa forma apresenta uma relação custo por energia quase **4 vezes** menor (111R\$/GJ do H<sub>2</sub> contra 443R\$/GJ do oxí-acetileno).

A familiarização com os diversos aspectos teóricos da tecnologia do hidrogênio faz concluir que a implementação do hidrogênio como vetor energético, considerando todos os fatores positivos tais como alta densidade energética e baixo impacto ambiental, faz com que o hidrogênio torne uma alternativa energética real para o futuro. O desenvolvimento de pesquisas relacionadas com esse combustível devem ser fomentadas com o objetivo de viabilizar a tecnologia do hidrogênio e por fim introduzir o mesmo nas matrizes energéticas do planeta.

## 5. Agradecimentos

Ao Prof. Doutor José Roberto Simões Moreira pela constante ajuda e por sempre indicar o caminho correto nos momentos de maior dificuldade.

## 6. Referências

- Bolton, J. R. **Solar photoproduction of hydrogen**. Ontario: Hydrogen Program of the International Energy Agency, 1996. 51p.
- CEPEL, Grupo Eletrobrás - **Encontro Brasileiro de Energia do Hidrogênio**, realizado em São Paulo no ano de 2006.
- Da Silva, E. P. **Introdução a Tecnologia e Economia do Hidrogênio**. Campinas, SP: Ed. UNICAMP, 1991, 204p.
- Mackenzie, B., **The Pulsed Electrolysis of Water**, Transaction of the Moscow Energy Institute No. 558, 1982.
- Ministry of Power, **The Efficient Use of Fuel**, London – 1958.
- Keating, Eugene L., **Applied Combustion** – U.S. Naval Academy Annapolis, Marland – 1993.
- Kenneth, K. Juro. **Principles of Combustion** – second edition , January 2005, 760p.
- Kuo, Kenneth K., **Principles of Combustion** – 1986.
- Pyle, W, Healy, J., Cortez, R., **Solar Hydrogen Production by Electrolysis** – Home Power, 1994.
- Rifkin, J. **A Econômica do Hidrogênio**, M. Books, 2003, Primeira Edição.
- Rose, J. W., Cooper, J.R. **Technical Data on Fuel** – seventh edition, 1997.
- Shaaban, Aly H, **Pulsed DC Anode Depolarization in Water Electrolysis for Hydrogen Generation** – Air Force Civil Engineering Support, August 1994.
- Smith, Marion L, Stinson, Karl W., **Fuels and Combustion**, McGraw-Hill Book Company, Inc – 1952.
- Tomasquim, M.T., **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**, 1ª Ed., Editora Interciência, 2003.
- Wyllen, J. Van, Sonntag, R.E., Borgnakke, C., **Fundamentos da Termodinâmica** – 6º edição, Edgard Blucher, 2003.
- Ministério de Minas e Energia – [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br) – acessado em junho de 2007
- ANEEL, 2005. Banco de Informação de Geração, [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br) acessado em junho de 2007.
- “Global Assessment of Hydrogen-Based Technologies”, [www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fouad.pdf](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fouad.pdf) , acessado em julho de 2007.
- Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil – Brasil H<sub>2</sub> Fuel Cell Expo/Seminar 2007; [www.portalh2.com.br/prtlh2/images/artigos/a48.pdf](http://www.portalh2.com.br/prtlh2/images/artigos/a48.pdf) - acessado em junho de 2007
- Centro de Gestão de Estudos Energéticos - [www.cgee.org.br](http://www.cgee.org.br) – acessado em junho de 2007.
- National Hydrogen Association – [www.hydrogenassociation.org](http://www.hydrogenassociation.org) – acessado em agosto de 2007
- National Renewable Energy Laboratory – [www.nrel.gov/hydrogen](http://www.nrel.gov/hydrogen) - acessado em setembro de 2007
- <http://www.hydrogen.org/Knowledge/Ecn-h2a.htm> - acessado em setembro de 2007

## GENERATION AND BURNING OF HYDROGEN GAS OBTAINED THROUGH ELECTROLYSIS PROCESS

**Roberto Liberato Neto**

[roberto.liberato@yahoo.com.br](mailto:roberto.liberato@yahoo.com.br)

**José Roberto Simões Moreira**

[jrsimoes@usp.br](mailto:jrsimoes@usp.br)

**Abstract.** Nowadays they said that known oil reserves in the world will remain last around 50 years. After these oil reserves decrease, the prices in a next future will reach impracticable market values for its using as fuel. Considering this fact, the hydrogen society is a term that has received world notoriety. A reasonable green option is to obtain the hydrogen gas through a molecule splitting process called electrolysis of water. Since then, the work's focus is the detailed study about the electrochemical reaction for hydrogen generator, looking for many ways to improve the process performance, basically, increasing the energy efficiency of the entire process. Finally, the primary subject is to build a welding hydrogen machine and then analyze the technical and economical viability ahead others existing technologies. Considering the thermal properties that results from hydrogen burn, its can be utilize in several applications such as welding, cutting, brazing, pre-heating among others. For these applications the hydrogen seems to be competitive compared to the fuel gases commercially available (oxy-acetylene, e.g.). In addition, some experiments have been performed to evaluate the influence of the pulsed current under high voltage conditions in the efficiency of electrolysis, but no conclusive results were obtained. Its necessary a deeper investigation on this matter, which requires more time of study.

**Keywords:** *hydrogen, electrolysis of water, alternative fuels, thermal energy, combustion.*