



GRUPO II
GRUPO PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO (GPT)

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO UTILIZANDO ENERGIA SECUNDÁRIA E SEU
USO COMO VETOR ENERGÉTICO

José Luiz Ávila Garcia *
CEMIG

RESUMO

Estamos dimensionando e se propõe construir na CEMIG, em conjunto com o Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP, uma planta para produção de hidrogênio eletrolítico a partir de energia fora de ponta ou secundária do sistema Sul-Sudeste.

O estudo está voltado para o uso de hidrogênio como vetor energético, ou seja, como um armazenador de energia que poderá ser utilizada na geração para o próprio sistema no horário de ponta ou como geração distribuída em locais ainda não atendidos pelas redes convencionais, ou ainda como reserva de suprimento. Será analisada também a possibilidade de uso do hidrogênio como insumo químico e como fonte de energia motora, isto é, utilização em veículos urbanos para transporte coletivo.

PALAVRAS-CHAVE

Energia – Eletrólise – Hidrogênio – Célula de Combustão - Geração

1.0 – INTRODUÇÃO

O sistema brasileiro de geração de energia elétrica é composto basicamente de usinas interconectadas,

planejadas para operar sob diferentes condições hidrológicas e diferentes condições de regulação.

Apesar da otimização da geração de energia elétrica existe sempre a possibilidade termos excessos de reserva hídrica, isto é, água que deveria ser turbinada mas não o é em função da demanda naquele momento. Esta água muitas vezes é vertida em função não só do

nível do reservatório que deve ser preservado, como em função dos reservatórios a jusante.

Outro enfoque sobre o sistema elétrico brasileiro é sua demanda diária que se comporta de forma não uniforme ao longo do dia formando a chamada “ponta de carga” ou “horário de ponta”. Remonta de longa data a idéia do armazenamento de energia sob as mais diversas formas sendo a forma de energia química a que melhor se desenvolveu até o presente sob a forma de acumuladores. No caso do hidrogênio eletrolítico o que se pretende é armazenar energia sob a forma química, energia elétrica será usada para promover a eletrólise da água que se decompõe em hidrogênio e oxigênio. Ambos os gases podem ser armazenados e utilizados, o oxigênio como insumo químico e o hidrogênio como energético ou insumo químico.

A CEMIG, interessada em desenvolver tecnologias emergentes, voltadas para a utilização de energia fora de ponta ou excedente do sistema Sul-Sudeste, vem desenvolvendo, com consultoria do Prof. Ennio Peres, da UNICAMP o projeto de produção de hidrogênio eletrolítico e sua utilização como vetor energético, descrito a seguir.

2.0 – DESENVOLVIMENTO

2.1 – Conceitos

Denomina-se processo eletrolítico todo aquele em que reações químicas são desencadeadas, a partir de uma fonte eletromotriz externa ao sistema químico. Em geral, o fornecimento de tensão e corrente é feito através de eletrodos, entre os quais existe um meio condutor iônico.

O processo de produção de hidrogênio através de eletrólise da água é utilizado há mais de cinquenta anos, tendo recebido um rápido desenvolvimento a partir dos anos 60, com a introdução do conceito de

eletrólise avançada, produto da tecnologia espacial dos países desenvolvidos.

Eletrolisadores convencionais, utilizam uma solução eletrolítica como meio condutor iônico e se distingue essencialmente por suas maiores dimensões e menores densidades de corrente (Ampères por unidade de área dos eletrodos), além do uso de materiais convencionais, tais como estruturas de aço carbono, diafragmas de amianto e superfície dos ânodos protegidas através de niquelação clássica (níquel fosco). Em geral operam com temperaturas entre 70 °C e 80 °C e apresentam rendimento entre 70% e 80%.

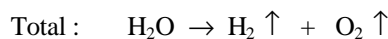
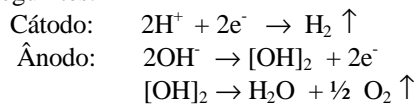
Eletrolisadores modernos são bastante semelhantes aos modelos convencionais, porém apresentam coberturas especiais nos eletrodos, com deposição de catalisadores e superfícies rugosas. Alguns modelos utilizam membranas separadoras à base de teflon ou outros materiais, permitindo a operação do eletrolizador em temperaturas mais elevadas, entre 80 °C e 120 °C e, conseqüentemente, sob pressão. Em geral, apresentam rendimentos entre 75% e 85%.

Os modelos avançados, na maioria encontrados atualmente apenas como protótipos, caracterizam-se por serem extremamente compactos, com altas densidades de corrente e uso de catalisadores e metais nobres. Em geral operam a temperaturas superiores a 120 °C e apresentam rendimentos entre 80% e 90%.

Na grande maioria dos casos o eletrólito das células convencionais e modernas constitui-se de uma solução básica forte, em geral hidróxido de potássio – KOH – dissolvido em água deionizada, sendo respeitadas algumas condições de pureza. A concentração do eletrólito, a temperatura e a pressão de operação são otimizadas para cada modelo de célula. Em geral situados na faixa de 25 a 30%, 70 a 100 °C e 1 a 20 atm.

A presença do hidróxido de potássio é necessária para tornar o meio entre os eletrodos condutor, sendo sua concentração fixada de maneira a se obter a máxima condutividade (mínima resistividade) do eletrólito.

As reações processadas em cada eletrodo são as seguintes:



Como se pode medir facilmente, a passagem de 96.489 Coulombs de carga (1 Faraday) através da célula produz 1 grama de hidrogênio. A energia mínima consumida no processo é dada pela variação da energia livre de Gibbs e mede:

$\Delta G_{\min} (T = 300 \text{ K}, P = 1 \text{ atm}) = 120,61 \text{ kJ/g de H}_2$
o que corresponde a uma tensão mínima de 1,23 V, para as condições de temperatura e pressão especificadas.

Quanto à disposição dos eletrodos, existem duas formas básicas de arranjo nas células: unipolar (eletrolisadores tipo tanque) para produção de hidrogênio de até 100 Nm³/hora e bipolar (eletrolisadores tipo filtro-prensa) para produção acima de 100 Nm³/hora.

Na configuração unipolar a condução de eletricidade através da célula é feita com os eletrodos em paralelo, enquanto que na configuração bipolar os eletrodos estão em série.

Um sistema industrial de eletrólise convencional de água possui como componente principal o eletrolizador, onde se processa a produção de hidrogênio e oxigênio. Além desse componente existem outros, essenciais ao funcionamento do eletrolisado, como também aqueles responsáveis pela captação e armazenamento inicial dos gases produzidos. São utilizados: a) Retificadores de corrente do tipo convencional, de silício ou selênio, que apresentam características especiais de voltagem e de corrente. O dimensionamento do retificador é feito a partir da quantidade de gás requerida; b) Separadores de gases que têm forma diferenciada para cada tipo de arranjo. No arranjo unipolar os gases são separados no interior da célula e no arranjo bipolar a separação é feita fora da célula; c) Unidades de purificação que retiram a água arrastada e que são dimensionadas de acordo com a qualidade do produto final; d) Unidade de armazenamento que dependendo da destinação final do hidrogênio são mais ou menos complexos. São utilizados compressores “limpos”, que não contaminam o gás, elevando-se a pressão até a faixa necessária.

Por se apresentar como um gás nas condições ambientais, este é o estado natural e mais freqüente em que o hidrogênio é produzido, armazenado, transportando e utilizado. Neste estado possui baixa densidade por unidade de volume, acarretando dificuldades no seu confinamento, além dos cuidados específicos de segurança exigidos no manuseio deste gás. A estocagem do hidrogênio no nosso projeto será feita inicialmente em cilindros, ficando para um próximo passo e estudo a estocagem em forma de hidretos metálicos. O armazenamento do hidrogênio é feita em cilindros pressurizados, em geral com 150 ou 200 atm, contendo os cilindros entre 6 e 10 Nm³. Tal sistema exige o emprego de compressores, com conseqüente gasto de energia, além de cilindros fabricados com materiais especiais.

2.2 – Projeto

Para o estudo de viabilidade da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de energia elétrica fora do horário de ponta no sistema integrado Sul-Sudeste

vamos dimensionar uma planta com capacidade de produção de 10 Nm³/hora.

O dimensionamento do retificador de corrente é feito a partir da vazão de gás requerida.

1 Faraday = 96.489 Coulomb

1 g de H₂ = 0,0112 Nm³ de H₂

1 Nm³ de H₂ → 2.390 Ampéres

10 Nm³ de H₂ → 23.900 Ampéres ≅ 24.000 A

Como a amperagem máxima aconselhada para uma célula é de 15.000 A, dimensionaremos 2 células de 12.000 A.

Considerando que os produtos das reações envolvidas na eletrólise da água são apenas o hidrogênio e o oxigênio, cujo balanço das reações químicas resulta unicamente na decomposição da água temos:

Energia fornecida = Energia química do sistema

$$E \cdot Q = - \Delta G$$

E = tensão mínima para eletrólise

Q = carga transmitida à reação

ΔG = variação da energia livre de Gibbs da reação

$\Delta G = 120,61 \text{ kJ/g de H}_2 \rightarrow 1,23 \text{ Volts}$

Considerando os acréscimos decorrentes da sobretensão nos ânodos e cátodos, a sobretensão ôhmica do eletrólito e dos eletrodos a tensão total passa para 1,9 Volts, o que para nosso dimensionamento será considerada uma tensão de 2,0 Volts.

Assim sendo, a potência teórica requerida é de aproximadamente 4,54 kW por Nm³ de hidrogênio a ser produzido.

Para o projeto de produção de 10 Nm³/h de hidrogênio teremos um consumo de 45,4 kWh no eletrolizador, ao qual serão acrescidos o consumo dos periféricos, tais como compressores e a própria iluminação do galpão. Para tanto será instalado um medidor com a função de limitar o processo ao horário fora da ponta de carga e medir o consumo efetivo de energia.

O fator preponderante no sistema de eletrólise é a eficiência dos eletrolisadores que está relacionada diretamente com a sobretensão nos eletrodos. Esta sobretensão, por sua vez, é função da superfície dos mesmos e do material do qual é construído.

Faz parte do projeto a utilização de eletrodos revestidos de níquel fosco com a função de aumentar a superfície específica dos mesmos e minimizar a oxidação dos ânodos.

A produção de hidrogênio eletrolítico tem como insumos básicos a energia elétrica e a água. Sobre a água tecemos os seguintes comentários: a qualidade requerida é água deionizada com resistividade menor que 0,2 megohm-cm, sendo o consumo dimensionado

em 8,04 litros/hora; usaremos para tanto a água produzida para a Usina Térmica de Igarapé, com as seguintes características:

pH = 6,7

alcalinidade → 10 a 15

condutividade = 0,65 μ S/cm

dureza = 0,0

sílica < 0,02 ppm .

Assim sendo, a água atende superabundantemente as necessidades do processo de eletrólise.

A energia elétrica será disponibilizada do barramento de baixa tensão do sistema auxiliar da usina na tensão de 127 V para um conversor com capacidade de 2 Vcc e 12.000 A.

A operação do sistema se dará em regime intermitente pois o sistema está dimensionado para operar em horário fora da ponta de carga.

Assim sendo, a operação do sistema se dará em regime de turnos de 8 (oito) horas diárias, com os operadores trabalhando em revezamento.

2.3 – Segurança

Devido a sua grande inflamabilidade o hidrogênio preocupa a todos no que diz respeito à segurança. É comum que se registre comentários desfavoráveis à produção e armazenamento do hidrogênio em função do perigo que pode apresentar em caso de acidente. Observe-se que não existe registro de nenhum acidente grave envolvendo a produção de hidrogênio a nível mundial.

O tratamento que deve ser dispensado ao hidrogênio é o mesmo requerido pela produção, transporte e armazenamento de gás natural e GLP.

Considerando seu baixo peso molecular e densidade de 0,0899 g/l eventuais vazamentos levam o gás para a parte mais alta do ambiente onde o mesmo se encontra, sendo exigido por norma que os locais de produção e armazenamento de hidrogênio sejam bem ventilados e com abertura na parte superior da edificação.

Quanto aos riscos de explosão provocada por chamas ou centelhas a norma prescreve que seja alertado por meio de cartazes e avisos e que os operadores sejam treinados e instruídos para que se evite ao máximo a exposição do meio onde se produz e armazena hidrogênio à incidência de quaisquer riscos.

O hidrogênio é uma substância atóxica, insípida, inodora e incolor, sua presença no ambiente só é detectável via sistemas de detecção e alarme, sistemas estes que devem ser obrigatoriamente instalados no local de produção.

2.4 – Custos

A avaliação dos custos de produção do hidrogênio eletrolítico vai depender de diversas considerações que passamos a analisar :

2.4.1 – Produção de hidrogênio utilizando-se energia fora do horário de ponta de carga do sistema elétrico.

Considerando a produção de 10 Nm³/hora com três turnos de trabalho e produção de 2.800 Nm³/mês.

- Custo da energia: R\$ 51,90 MW = US\$ 30,00 MW

- Custo dos insumos básicos : R\$ 0,038 / Nm³ = US\$ 0, 022 / Nm³

- Custo da mão de obra : R\$ 2,84 / Nm³ = US\$ 1,64 / Nm³

- Custos dos equipamentos, obras civis, montagem e manutenção : R\$ 418.900,00 = US\$ 242.138,73.

- Custo do hidrogênio : R\$ 5,543 / Nm³ = US\$ 3,204 / Nm³ .

2.4.2 – Produção de hidrogênio utilizando-se energia fora de ponta de carga do sistema .

Considerando a produção de 10 Nm³/ hora, com trabalho em turno único e diurno com produção de 2800 Nm³ / mês.

- Custo da energia : R\$ 51,90 / MW = US\$30,00 MW

- Custo dos insumos básicos : R\$ 0,038 /Nm³ = US\$ 0,022 / Nm³

- Custo da mão de obra : R\$ 1,72 /Nm³ = US\$ 0, 99/ Nm³

- Custo dos equipamentos, obras civis, montagem e manutenção: R\$ 418. 900,00 = US\$ 242.138,73

- Custo do hidrogênio: R\$ 4,124 /Nm³ = US\$ 2,384 Nm³ .

Observa-se que nos casos estudados o custo do hidrogênio depende substancialmente do custo da mão de obra empregada . Considerando-se que a equipe de produção pode ser a mesma para uma planta de eletrólise até 10 vezes maior, podemos elaborar outra planilha de custos para uma equipamento com capacidade de até 100 Nm³/ hora caso um estudo de mercado venha sinalizar a possibilidade de consumo do gás.

3.0 – ANÁLISE ECONÔMICA

Haja vista a possibilidade de comercialização do hidrogênio com insumo químico e considerando que o preço do hidrogênio ultra puro é de R\$ 27,50 / Nm³ é amplamente viável que se produza com a finalidade de comercialização.

Como energia motriz, ou seja, como combustível para transporte coletivo urbano, o estudo deverá ser aprofundado em função do custo dos veículos.

Sobre os veículos temos a comentar que aqueles desenvolvidos pela Ballard no Canadá diferem em

muito dos veículos utilizados no transporte coletivo urbano no Brasil e que seria necessário uma “tropicalização” dos mesmos e ensaios para que se possa medir o consumo de combustível e a eficiência do hidrogênio como energia motriz. Considerando o poder calorífico do hidrogênio (33,9 Mcal/kg) e o do óleo Diesel (10,9 Mcal/kg) e as eficiências registradas na literatura dos veículos movidos a estes combustíveis, 35 % para ônibus elétricos (célula de combustível) e 25 % para ônibus com motor Diesel, notamos que já se avizinha a possibilidade do uso do hidrogênio como combustível motor do transporte coletivo urbano e deve ser considerado o fato que tal utilização eliminará a poluição do ar nos centros urbanos causada pela emissão de CO₂ e outros gases proveniente da queima do óleo Diesel.

O uso de hidrogênio eletrolítico como gerador de energia elétrica para suprir as necessidades no horário de ponta ou como geração descentralizada pode seguir duas vertentes : geração com grupo motor gerador ou geração via células de combustível.

No primeiro caso sistemas de geração com grupos motor gerador movidos a hidrogênio poderão ser instalados em locais onde se registre a necessidade de reforço no sistema elétrico, embora seja conhecido o baixo rendimento deste tipo de aplicação, em torno de 30 %.

Células de combustível são equipamentos capazes de produzir energia elétrica através da reação química de formação da água a partir de seus componentes primários, hidrogênio e oxigênio.

Seu estudo e aprimoramento já se encontram em estado avançado e já se registra a comercialização de células de 1 kW que funcionam como “no top” e células de 250 kW que funcionam como sistema de geração descentralizada. O rendimento já alcançado nas células de combustível ultrapassam 50% o que torna atrativa uma investigação aprofundada do uso desses equipamentos.

O hidrogênio em ambos os casos deve ser considerado como um armazenamento energético que pode ser transportando e usado onde e quando melhor convier.

4.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) SILVA, ENNIO PERES da. Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio (1991) – Brasil.
- (2) HYDROGEN ENERGY PROGRESS X – Proceedings of the 10 th World Hydrogen Energy Conference (1994) USA.