

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

**“ELECTROLYTICAL HYDROGEN PRODUCTION,
USING OFF-PICK ENERGY AND THE USE LIKE
ENERGETIC SUPPLY”**

**ASSESSORIA DE COORDENAÇÃO DO PLANEJAMENTO DO SISTEMA
ELETRO-ENERGÉTICO – ST**



Companhia Energética de Minas Gerais

**Assessoria de Coordenação do Planejamento do Sistema
Eletro- Energético**

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

Belo Horizonte, Novembro/ 1999.

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

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 de 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 elétrica sob as mais diversas formas, sendo a forma de energia química a que melhor se desenvolveu até o presente sob forma de acumuladores eletroquímicos, que no entanto ainda se encontram quase na forma em que foram concebidos. Já contam com algumas melhorias mas persistem os problemas iniciais, aos quais deve ser acrescido o problema, cada vez mais sério, do descarte após uso.

Estamos interessados em desenvolver tecnologias emergentes, voltadas para o armazenamento de energia excedente ou fora do horário de ponta do sistema Sul-Sudeste e sua utilização como fonte alternativa de energia elétrica naquele horário. Para isto, estamos desenvolvendo, com consultoria do Prof. Dr. Ennio Peres da Silva, da UNICAMP o projeto de produção de hidrogênio eletrolítico e sua utilização como vetor energético. O Projeto Hidrogênio Eletrolítico visa principalmente prover a CEMIG de conhecimento técnico sobre produção e manuseio de hidrogênio eletrolítico e seu uso como vetor energético.

Por determinação da ANEEL a forma de energia conhecida como energia secundária passou a denominar-se energia não assegurada.

Justificativa

É nosso objetivo a produção de hidrogênio eletrolítico, com o qual pode-se armazenar energia sob a forma de energia química; a energia elétrica gerada nos momentos de baixa demanda será usada para promover a eletrólise da água, produzindo hidrogênio e oxigênio. Em nosso projeto, o oxigênio será liberado para a atmosfera, uma vez que o processo de compressão do mesmo é caro e não se justifica economicamente. O hidrogênio, objeto principal do projeto, será utilizado em estudos, no gerador da Usina Térmica de Igarapé, em outros geradores do sistema CEMIG e poderá ser comercializado como insumo químico. Por se tratar de hidrogênio de alta pureza, seu valor comercial é elevado e poderá ser vendido a distribuidoras de gases como a White Martins, Air Liquide e outras que vierem a se interessar.

O objetivo principal, no entanto, é promover o conhecimento do hidrogênio como energético e como armazenador de energia e suprir a CEMIG do conhecimento tecnológico que acionará o futuro, com suprimento de energia limpa, já que o hidrogênio não polui, nem na sua produção nem no seu uso como energético.

Para viabilização do Projeto Hidrogênio Eletrolítico, estamos propondo a construção de um Laboratório de Hidrogênio, onde instalaremos uma planta de produção de 10 Nm³/hora. O Laboratório será o campo de testes da tecnologia de eletrólise onde, além da produção de hidrogênio serão feitas as medidas de consumo de energia, rendimento do processo e desenvolvimentos tecnológicos; para tanto o Laboratório estará disponível também para convênios com as universidades que já estudam o hidrogênio ou que queiram estudá-lo. Visamos com o laboratório treinar mão de obra específica para domínio da produção, purificação, armazenamento e uso de hidrogênio para fins energéticos, ou seja, uso como armazenagem de energia e sua reconversão em energia elétrica onde e quando necessário.

O local escolhido para a instalação é a Usina Térmica de Igarapé, onde dispomos de espaço físico, barramento na tensão necessária e principalmente água desmineralizada que é produzida para a caldeira da usina mas a bateria de produção trabalha com expressiva folga.

Já está em desenvolvimento e é por alguns países dominada a tecnologia de produção de energia elétrica via células de combustível, dispositivo que ao contrário do eletrolizador, usa hidrogênio para produzir energia elétrica.

Estamos buscando este nível de conhecimento, estudando ainda teoricamente a utilização destes equipamentos no sistema CEMIG. Assim que tivermos produção própria de hidrogênio e dominarmos a tecnologia de purificação e armazenamento, estaremos aptos a estudar de forma prática o uso das células de combustível.

Justifica-se cada vez mais que se estude e domine a alternativa energética do hidrogênio, como combustível do futuro, para a produção de energia limpa, principalmente com as restrições e perigos associados aos combustíveis nucleares e com o aumento das limitações e normas que restringirão o uso de combustíveis fósseis e dificultam os aproveitamentos hidrelétricos.

Desenvolvimento

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 distinguem 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%.

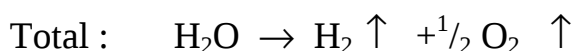
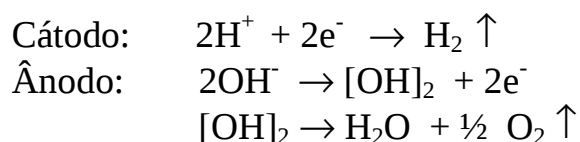
Eletrolisadores modernos são bastante semelhantes aos modelos convencionais, porém apresentam coberturas especiais nos eletrodos, com deposição de catalisadores e superfícies rugosas. Alguns modelos utilizam membranas separadoras à base de teflon ou outros materiais, permitindo a operação do eletrolizador em temperaturas mais elevadas, entre 80 °C e 120 °C e, conseqüentemente, sob pressão. Em geral, apresentam rendimentos entre 75% e 85% (Figura 1).

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 respectivamente 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 192.978 Coulombs de carga (2 Faradays) através da célula produz 2 gramas de hidrogênio (1 mol). 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.[1].

Quanto à disposição dos eletrodos, existem duas formas básicas de arranjo nas células: unipolar (eletrolisadores tipo tanque) em geral para produção de hidrogênio de até 100 Nm³/hora e bipolar (eletrolisadores tipo filtro-prensa) em geral para produção acima de 100 Nm³/ hora. Pela produção proposta e pelas facilidades construtivas, o modelo a ser adotado para este projeto será do tipo unipolar.

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 eletrolizador, 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 outros contaminantes gasosos (O_2 , N_2 , etc.) 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 complexas. 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, transportado 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. 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 feito em cilindros pressurizados, em geral com 150 ou 200 atm, contendo os cilindros entre 6 e 10 Nm^3 . Tal sistema exige o emprego de compressores, com conseqüente gasto de energia, além de cilindros fabricados com materiais especiais.

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 Nm^3 / hora.

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

$$1 \text{ Faraday} = 96.489 \text{ Coulomb}$$

$$1 \text{ g de } H_2 = 0,0112 \text{ } Nm^3 \text{ de } H_2$$

$$1 \text{ } Nm^3 \text{ de } H_2 \rightarrow 2.390 \text{ Ampéres}$$

$$10 \text{ } Nm^3 \text{ de } H_2 \rightarrow 23.900 \text{ Ampéres} \cong 24.000 \text{ A}$$

Como a amperagem máxima aconselhada para uma célula unipolar 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, a qual para nosso dimensionamento será considerada uma tensão de 2,0 Volts.

Assim sendo, a potência teórica requerida é de aproximadamente 4,54 kW por Nm^3 de hidrogênio a ser produzido.

Para o projeto de produção de $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 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 melhorar o desempenho dos cátodos e evitar 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 $\rightarrow 10$ a 15

condutividade = $0,65 \mu \text{ S/ cm}$

dureza = 0,0

sílica $< 0,02 \text{ ppm}$.

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 440 V para um conversor com capacidade de no mínimo 10 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.

Especificações

Faz parte do projeto a construção da instalação que vai abrigar a produção de hidrogênio. Por se tratar da produção de um gás de alta inflamabilidade a instalação deve ser apropriada e seguir exigências e normas específicas, não sendo possível aproveitar qualquer outra instalação já existente.

A instalação aqui especificada é um laboratório para produção e estudo sobre hidrogênio eletrolítico, hidrogênio produzido por reforma de etanol/metanol e uso de células de combustível.

Será um galpão de 600 m² construído numa área de 810 m² em terreno da Usina Térmica de Igarapé, sendo resguardada por norma a distancia de 15 m de qualquer outra construção e protegido por cercas de tela a ser construída na distancia média entre o extremo da área total e o galpão (7,5 m).

As plantas de construção civil e locação encontram-se anexas.

Estarão instalados fora do galpão um gasômetro para 50 Nm³ de hidrogênio e uma torre de resfriamento de água para 5,0 m³/hora.

O galpão vai abrigar um sistema de produção, purificação, compressão e armazenamento de hidrogênio, uma sala de controle, um laboratório, uma sala para reforma de etanol/metanol e uma sala para uso de células de combustível.

Os equipamentos que compõem o laboratório são :

1 Retificador de corrente com entrada de 440 Vca e saída de até 10 Vcc e 12000 A; 2 Eletrolisadores com capacidade para 5 Nm³ / hora; 2 Compressores de baixa pressão (até 10 kgf/cm²); 1 Linha de purificação usando resinas e catalizadores; 2 Compressores de alta pressão (até 200 kgf/cm²); 20 cilindros com capacidade para 10 Nm³.

O laboratório será equipado com um cromatografo para análise de gases, vidraria para preparo do eletrólito (KOH) e equipamentos para regeneração dos elementos do sistema de purificação.

Detalhes dos principais equipamentos:

- Eletrolisadores
 - . Tipo tanque (unipolar)
 - . Capacidade de geração de hidrogênio : 5,0 Nm³/h
 - . Consumo específico de eletricidade : 4,54 kWh/Nm³
 - . Eficiência : 80%

- . Tensão de operação : 1,9 V
- . Corrente elétrica : 12.000 A
- . Densidade de corrente : 1.500 A/m²
- . Área total de eletrodos (cátodo): 8 m²
- . Quantidade de cátodos : 6
- . Quantidade de ânodos : 5
- . Área específica de cada eletrodo : 1,6 m²
- . Dimensões para os eletrodos (área plana equivalente) : 1,40 x 1,14 m
- . Quantidade de eletrolisadores : 2, com previsão de mais 2 futuramente
- . Produção total de hidrogênio : 10 Nm³/h (20 Nm³/h futuramente)
- . Consumo total de água desmineralizada : 8 litros/hora.
- Retificador
 - . Tensão de alimentação : 440 Vca
 - . Tensão de saída (por eletrolisador) : 1,9 Vcc
 - . Corrente elétrica : 12.000 A
 - . Potência por eletrolisador : 22,8 kW
 - . Margem de segurança para operação : 20%
 - . Arranjo dos eletrolisadores : em série.

Estamos acoplando à planta de produção de hidrogênio eletrolítico, espaço para outro processo de produção que é a reforma de etanol/metanol, produção esta que estamos em vias de começar os estudos e desenvolvimentos, e espaço para ensaios, aprendizado e testes de células de combustível. Os equipamentos a serem contidos nestas salas ainda não foram especificados.

A sala de controle é o espaço onde se localizam os instrumentos de acionamento e medição do sistema de produção. O operador deverá monitorar o funcionamento dos equipamentos a partir de um painel instalado nesta sala, a mesma servirá também de escritório.

A energia para acionamento do sistema será proveniente do barramento que supre a Usina Térmica; será necessário um suprimento em 440 V para o retificador e um suprimento em 127/220 V para os demais equipamentos e iluminação.

Estamos projetando para ambos os suprimentos um sistema de medição do consumo de energia, uma vez que é parte do estudo conhecer o real consumo e custo da energia utilizada.

A água para produção do hidrogênio será fornecida pelo sistema de produção de água desmineralizada da usina. A água para resfriamento dos eletrolisadores e compressores de alta pressão, assim como para os serviços gerais será fornecida pelo sistema de água potável da usina.

Operação

O processo de produção de hidrogênio aqui projetado, necessita de mão de obra para os atos de ligar ou desligar equipamentos, posicionamento da linha de purificação, regeneração dos elementos do sistema de purificação, análise cromatográfica do gás, abertura e fechamento dos cilindros na linha de enchimento e observação constante dos parâmetros e funcionamento do sistema e manutenção dos equipamentos. Para tanto é necessário somente um operador por turno de funcionamento; tal operador deve ter formação de técnico químico de nível médio, dada a natureza e complexidade das operações a executar.

O objetivo deste projeto é prover a CEMIG de conhecimento e domínio da tecnologia do hidrogênio e usá-lo como vetor energético; assim sendo, a planta destina-se ao aprendizado da produção e isto se faz produzindo. Como o produto é valorizado e requer extremo cuidado, toda metodologia de produção, cuidados com armazenagem e uso será aprendida e posta em prática na planta; planta esta que promoverá a qualificação da mão de obra necessária ao domínio da tecnologia e produzirá hidrogênio com qualidade para ser usado nas instalações da CEMIG ou comercializado.

É parte integrante do projeto quantificar os custos do hidrogênio produzido com energia fora do horário de ponta e com energia secundária; assim sendo, horários diversos de produção serão testados, e para tanto estamos dimensionando o treinamento e utilização de, inicialmente, dois operadores para a planta.

A operação da planta de produção de hidrogênio será gerenciada pelo gerente da Usina Térmica de Igarapé; os estudos serão desenvolvidos pela Assessoria de Coordenação do Planejamento do Sistema Eletro-Energético –ST ou pela Assessoria de Gestão Tecnológica e Energias Alternativas –TE.

Segurança

Devido a sua grande inflamabilidade a produção de 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 risco.

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.

Os comportamentos e sinalizações referentes ao manuseio do hidrogênio estão normalizados na CLT – Consolidação das Leis do Trabalho, sob NR 13, NR 16 e NR 20, assim como pela OSHA – Occupational Safety & Health Administration of U.S. Department of Labor – Norma 29-CFR.

Custos

A avaliação dos custos de produção do hidrogênio eletrolítico vai depender de diversas considerações que passamos a analisar. Uma primeira linha de análise será a da produção em pequena escala visando o aprendizado no manuseio e o domínio da tecnologia e uma segunda abordagem será para produção em escala industrial para aproveitamento de toda energia excedente na CEMIG.

1 – Produção de 10 Nm³ /hora de hidrogênio utilizando-se energia de consumo próprio da CEMIG, em horário normal e fora do horário de ponta de carga do sistema elétrico.

A) Considerando a produção em horário normal, citado como horário comercial, ou seja, das 07:30 às 17:30 horas, durante 22 dias ao mês, com utilização de dois operadores:

- Produção de hidrogênio – 2.200 Nm³ / mês.
- Custo dos insumos básicos – R\$ 0,494/Nm³.
- Custo da mão de obra – R\$ 1,806/Nm³.
- Custo da energia (energia de consumo próprio) – R\$ 1.041,15/ mês.
- Custo da construção – R\$ 140.000,00
- Custo dos equipamentos – R\$ 348.500,00
- Depreciação – R\$ 1,049/ Nm³
- Remuneração do capital – R\$ 2,703/Nm³
- Custo do hidrogênio – **R\$ 6,05/Nm³**

B) Considerando a produção de hidrogênio em horário fora da ponta de carga do sistema, ou seja, 20 horas diárias no período da 21:30 as 17:30 horas, durante 28 dias/mês, com operação em regime de turnos de revezamento, utilizando-se quatro operadores:

- Produção de hidrogênio – $5.600 \text{ Nm}^3/\text{mês}$.
- Custos dos insumos básicos – $\text{R\$ } 0,488/\text{Nm}^3$.
- Custo da mão de obra – $\text{R\$ } 1,419/\text{Nm}^3$.
- Custo da energia (energia de consumo próprio) – $\text{R\$ } 2.650,20/\text{mês}$.
- Custo da construção – $\text{R\$ } 140.000,00$
- Custo dos equipamentos – $348.500,00$
- Depreciação – $\text{R\$ } 0,412/\text{Nm}^3$.
- Remuneração do capital – $\text{R\$ } 1,062/\text{Nm}^3$.
- Custo do hidrogênio – **$\text{R\$ } 3,38/\text{Nm}^3$** .

Observamos que o no custo de construção não está incluído o valor do terreno, uma vez que o mesmo já pertence à CEMIG. Entendendo-se por construção, a construção civil, os arruamentos e as cercas.

2 – Produção de hidrogênio a partir da energia secundária disponível no sistema Cemig ou sistema Sul-Sudeste.

O presente estudo visa a utilização de energia secundária, atualmente conhecida como energia não assegurada, para produção de hidrogênio. É conhecida a sazonalidade da existência deste tipo de energia e no presente momento o sistema Cemig não dispõe da mesma, embora o sistema integrado Sul-Sudeste disponha.

No ano de 1998 a Cemig dispunha de 627.595,80 kWh de energia não assegurada, e poderia ter produzido $110.589,6 \text{ Nm}^3$ de hidrogênio eletrolítico que comercializado a $\text{R\$ } 10,00/\text{Nm}^3$ teria rendido à Cemig $\text{R\$ } 1.105.896,00$. A disponibilidade de energia não assegurada no ano de 1999 foi computada até Julho em 133.666,10 kWh o que poderia ter produzido $23.553,5 \text{ Nm}^3$ de hidrogênio e rendido $\text{R\$ } 235.535,00$. As considerações acima estão levando em conta o preço de venda do hidrogênio a $\text{R\$ } 10,00/\text{Nm}^3$, quando o mesmo é comercializado por empresas do setor a $\text{R\$ } 27,50/\text{Nm}^3$ o ultra puro (99,999 %) e a $\text{R\$ } 16,80$ o puro (99,96%).

Ocorre que para os próximos dois anos não há previsão de sobra de energia no sistema Cemig, embora exista no sistema Sul-Sudeste, energia esta cujo montante ainda não é conhecido e cujo preço passa agora a ser fixado em $\text{R\$ } 70,00/\text{MWh}$, mas não se tem informações de negócios feitos nestas bases.

Caso se opte por produzir hidrogênio com tal energia, o custo do mesmo será de $\text{R\$ } 3,23/\text{Nm}^3$, para uma produção de $5.600 \text{ Nm}^3/\text{mês}$.

Se dispusermos de 2.860,20 MWh de energia não assegurada no sistema Sul-sudeste por ano poderemos produzir 504.000 Nm³ de hidrogênio a um custo de R\$ 1,42/Nm³ (a partir da opção B). Tal custo leva em conta que será necessário um investimento muito maior e o custo deste investimento acresce em R\$ 0,31/Nm³ o custo do hidrogênio; ainda assim, com uma comercialização de todo o hidrogênio produzido – 504.000 Nm³/ano – ao preço teórico de R\$ 10,00 o investimento estará pago em menos de 4 meses.

Os custos estão tabelados nas planilhas anexas.

Análise Econômica

Nos itens (A) e (B), o custo da mão de obra é respectivamente 29,8% e 42,0%, mas o custo da construção não se alterará com a introdução de mais dois eletrolizadores, sendo que o custo dos equipamentos será incrementado em aproximadamente 20%. Assim sendo, dobrando-se a produção de hidrogênio nestes casos os custos finais serão respectivamente R\$3,27/Nm³ e R\$ 2,11/Nm³.

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.

Considerando-se ainda que recentemente dois grandes fornecedores nacionais de hidrogênio, proveniente de reforma de hidrocarbonetos, apresentaram preços de US\$ 1.00 /Nm³ para suprimento de veículos em São Paulo, pode-se dizer que os custos do hidrogênio a ser produzido pela CEMIG são bastante competitivos, apesar de não ser este o objetivo deste projeto.

Perspectivas do uso do hidrogênio

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 Daimler-Benz -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 superior 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 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 grande parte da poluição do ar nos centros urbanos causada pela emissão de CO_2 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 turbinas a hidrogênio ou geração via células combustível. O hidrogênio em ambos os casos deve ser considerado como um armazenamento energético que pode ser transportado e usado onde e quando melhor convier.

No primeiro caso sistemas de geração com turbinas movidas 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 40 %.

Células 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. São equipamentos cujo desenvolvimento vem sendo acelerado, principalmente devido ao fato de gerarem uma energia limpa, ou seja, sem efluentes poluidores, haja vista que na geração de energia elétrica via células de combustível o efluente é água pura (H_2O), e completamente sem ruídos (Figura 2).

A Cemig esta desenvolvendo tratativas para um melhor conhecimento das células combustível e da possível instalação destes equipamentos em pontos do seu sistema elétrico, onde eles possam ser testados e avaliados.

Seu estudo e aprimoramento já se encontram em estado avançado em diversos países e já se registra a comercialização de células de 1 kW que funcionam como “non 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 que se conhece, via literatura, sobre eletrolisadores e células combustível, aponta para um rendimento do ciclo completo eletricidade/hidrogênio/eletricidade em torno de 32%, ou seja, quando se promove a produção de hidrogênio via eletrólise e seu posterior uso como vetor energético através de célula combustível, 68% da energia inicial é usada no processo. Assim sendo, o custo da energia final vai depender dos custos de investimento na célula combustível, do custo da mão de obra alocada na operação do sistema e de qual custo está sendo alocado para a energia inicial. Para os cenários de custos aqui analisados, considerando-se a opção B com um custo de energia elétrica de R\$ 70,00/MWh, ou seja, a produção de hidrogênio a R\$ 3,23/ Nm^3 , pode-se obter o seguinte custo final para a geração de energia elétrica, produzida através de uma célula de

combustível de 5 kW, operando 8 hs diárias, utilizando 1 operador em tempo integral:

- Produção de eletricidade – 1.200 kWh/mês
- Custo dos insumos básicos – R\$ 2.680,76/mês.
- Custo da mão de obra – R\$ 1.986,6/mês.
- Custo dos equipamentos – R\$ 28.500,00
- Depreciação – R\$ 158,33/mês
- Remuneração do capital – R\$ 349,12/mês
- Custo da eletricidade – **R\$ 4,312/kWh**

O custo da célula combustível considerada foi estimado em US\$ 15,000.00 (R\$ 28.500,00 considerando-se US\$ 1 = R\$ 1,90).

Como pode ser observado, o custo da energia elétrica produzida é extremamente elevado. Este fato é devido em primeiro lugar ao custo do hidrogênio, obtido em uma instalação experimental e em baixa produção. Estudos já realizados [2] mostram que para produção em larga escala o custo do hidrogênio eletrolítico é inferior a US\$ 0,2/ Nm³, ou seja, da ordem de 10 vezes inferior ao considerado. O segundo fator é o custo da mão de obra, muito pouco necessária à operação do sistema, que funciona praticamente todo automatizado. Neste caso a redução deste custo seria no mínimo para a metade. Por último, deve-se considerar a operação de apenas 8 horas diárias, significando uma ociosidade do equipamento da ordem de 2/3, o que reflete significativamente no custo do investimento, já bastante onerado nestes cálculos devido ao preço das células combustível, atualmente muito superior a seus custos de fabricação. Com estas considerações, o custo de geração da energia elétrica se situaria abaixo de R\$ 0,65/kWh.

Portanto, deve-se considerar a planta de hidrogênio aqui apresentada como uma unidade experimental, para aquisição e teste de tecnologias e preparação de pessoal, sendo que o hidrogênio a ser gerado apresenta por isto mesmo um custo muito elevado que, ainda assim, possui competitividade enquanto insumo químico (hidrogênio ultra-puro), como já foi mencionado.

Pelo exposto pode-se perceber a importância que o hidrogênio poderá ter no futuro próximo como insumo energético, justificando-se assim que estudos e plantas experimentais sejam desenvolvidas e avaliadas, permitindo o conhecimento mais profundo desta tecnologia e qualificando pessoal tanto para a tomada de decisões como para a operação destes sistemas. Neste sentido torna-se pertinente, além da geração eletrolítica de hidrogênio, a inclusão de um espaço para estudos do desempenho de células combustível, considerando principalmente que o hidrogênio

necessário a estes estudos estará disponível na planta, e de formas alternativas de geração, como a reforma de etanol, que vem sendo bastante considerada para fins automotivos.

Referências

- [1] SILVA, ENNIO PERES da. Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio, Editora da UNICAMP, 1991 – Brasil.
- [2] SOUZA, SAMUEL NELSON MELEGARI. Aproveitamento da Energia Elétrica Secundária para Produção de Hidrogênio Eletrolítico. Tese de Doutorado, Planejamento Energético/FEM/UNICAMP, 1998 – Brasil.

Bibliografia

- (1)HYDROGEN ENERGY PROGRESS X – Proceedings of the 10 th World Hydrogen Energy Conference (1994)- USA.

CUSTOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Energia elétrica não assegurada CEMIG

	PRODUÇÃO	CUSTO ENERGIA	INSUMOS	MÃO DE OBRA	REC. CAPITAL	DEPREC.	T O T A L	TOTAL
	Nm3/mês	R\$/MWh	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/Nm3
Horas/dia	2 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 2 funcionários, 22 dias/mês							
4,5	1.000	0,0	14,46	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.243,18	12,24
9,0	2.000	0,0	28,93	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.257,65	6,13
10,0	2.200	0,0	31,82	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.260,54	5,57
13,5	3.000	0,0	43,39	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.272,11	4,09
18,0	4.000	0,0	57,85	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.286,57	3,07
20,0	4.400	0,0	63,64	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.292,36	2,79
	2 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 4 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	5.000	0,0	72,32	7.946,40	5.947,38	2308,14	16.274,24	3,25
19,0	5.600	0,0	80,99	7.946,40	5.947,38	2308,14	16.282,91	2,91
20,0	6.000	0,0	86,78	7.946,40	5.947,38	2308,14	16.288,70	2,71
	4 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 4 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	10.000	0,0	144,63	7.946,40	6.731,38	3.441,36	18.263,77	1,83
19,0	11.200	0,0	161,99	7.946,40	6.731,38	3.441,36	18.281,13	1,63
20,0	12.000	0,0	173,56	7.946,40	6.731,38	3.441,36	18.292,70	1,52
	1 Eletrolizador de 70 Nm3/h, 5 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	35.700	0,0	516,34	9.933,00	23.559,83	12.044,76	46.053,93	1,29
19,0	39.900	0,0	577,08	9.933,00	23.559,83	12.044,76	46.114,67	1,16
20,0	42.000	0,0	607,46	9.933,00	23.559,83	12.044,76	46.145,05	1,10

CUSTOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Energia elétrica de consumo próprio da CEMIG

	PRODUÇÃO	CUSTO ENERGIA	INSUMOS	MÃO DE OBRA	REC. CAPITAL	DEPREC.	T O T A L	TOTAL
	Nm3/mês	R\$/MWh	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/Nm3
Horas/dia	2 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 2 funcionários, 22 dias/mês							
4,5	1.000	104,24	487,71	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.716,43	12,72
9,0	2.000	104,24	975,43	3.973,20	5.947,38	2308,14	13.204,15	6,60
10,0	2.200	104,24	1072,97	3.973,20	5.947,38	2308,14	13.301,69	6,05
13,5	3.000	104,24	1463,14	3.973,20	5.947,38	2308,14	13.691,86	4,56
18,0	4.000	104,24	1950,85	3.973,20	5.947,38	2308,14	14.179,57	3,54
20,0	4.400	104,24	2145,94	3.973,20	5.947,38	2308,14	14.374,66	3,27
	2 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 4 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	5.000	104,24	2438,56	7.946,40	5.947,38	2308,14	18.640,48	3,73
19,0	5.600	104,24	2731,19	7.946,40	5.947,38	2308,14	18.933,11	3,38
20,0	6.000	104,24	2926,28	7.946,40	5.947,38	2308,14	19.128,20	3,19
	4 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 4 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	10.000	104,24	4877,13	7.946,40	6.731,38	3.441,36	22.996,27	2,30
19,0	11.200	104,24	5462,38	7.946,40	6.731,38	3.441,36	23.581,52	2,11
20,0	12.000	104,24	5852,55	7.946,40	6.731,38	3.441,36	23.971,69	2,00
	1 Eletrolizador de 70 Nm3/h, 5 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	35.700	104,24	17411,35	9.933,00	23.559,83	12.044,76	62.948,94	1,76
19,0	39.900	104,24	19459,74	9.933,00	23.559,83	12.044,76	64.997,33	1,63
20,0	42.000	104,24	20483,94	9.933,00	23.559,83	12.044,76	66.021,53	1,57

CUSTOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Energia elétrica não assegurada Sul-Sudeste

	PRODUÇÃO	CUSTO ENERGIA	INSUMOS	MÃO DE OBRA	REC. CAPITAL	DEPREC .	T O T A L	T O T A L
	Nm3/mês	R\$/MWh	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/Nm3
Horas/dia	2 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 2 funcionários, 22 dias/mês							
4,5	1.000	70,0	332,26	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.560,98	12,56
9,0	2.000	70,0	664,53	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.893,25	6,45
10,0	2.200	70,0	730,98	3.973,20	5.947,38	2308,14	12.959,70	5,89
13,5	3.000	70,0	996,79	3.973,20	5.947,38	2308,14	13.225,51	4,41
18,0	4.000	70,0	1329,05	3.973,20	5.947,38	2308,14	13.557,77	3,39
20,0	4.400	70,0	1461,96	3.973,20	5.947,38	2308,14	13.690,68	3,11
	2 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 4 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	5.000	70,0	1661,32	7.946,40	5.947,38	2308,14	17.863,24	3,57
19,0	5.600	70,0	1860,67	7.946,40	5.947,38	2308,14	18.062,59	3,23
20,0	6.000	70,0	1993,58	7.946,40	5.947,38	2308,14	18.195,50	3,03
	4 eletrolisadores de 5 Nm3/h, 4 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	10.000	70,0	3322,63	7.946,40	6.731,38	3.441,36	21.441,77	2,14
19,0	11.200	70,0	3721,35	7.946,40	6.731,38	3.441,36	21.840,49	1,95
20,0	12.000	70,0	3987,16	7.946,40	6.731,38	3.441,36	22.106,30	1,84
	1 Eletrolizador de 70 Nm3/h, 5 funcionários, 30 dias/mês							
17,0	35.700	70,0	11861,80	9.933,00	23.559,83	12.044,76	57.399,39	1,61
19,0	39.900	70,0	13257,30	9.933,00	23.559,83	12.044,76	58.794,89	1,47
20,0	42.000	70,0	13955,06	9.933,00	23.559,83	12.044,76	59.492,65	1,42

