

Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e seu Uso como Vetor Energético

C. H. F. da Silva, A. M. Carvalho, E. S. Tôres

Resumo- Os países desenvolvidos vêm acenando para um futuro onde toda energia deve estar envolvida com a preservação do meio ambiente e com a sustentabilidade. Fontes alternativas de energia convergem para o problema do armazenamento e estocar energia na forma química vem despontando como a solução para este problema. O hidrogênio é o insumo químico com maior capacidade de armazenar energia devido seu poder calorífico. A Cemig GT SA considerando a grande oportunidade de contribuir para a questão energética mundial, construiu um laboratório experimental visando desenvolver esta tecnologia, capacitar especialistas e quantificar os custos. Este artigo trata dos resultados do projeto de P&D Cemig/ANEEL 050 – Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio. Esse projeto, juntamente com os trabalhos científicos desenvolvidos no tema indicam resultados promissores para o futuro dessa tecnologia.

Palavras-chave— Hidrogênio, Eletrólise, Vetor Energético, Célula a Combustível.

I. INTRODUÇÃO

Os países desenvolvidos vêm acenando para um futuro onde toda energia deve estar envolvida com a preservação do meio ambiente e com a sustentabilidade, tanto na sua geração como na sua utilização. Fontes alternativas de energia convergem para o problema do armazenamento e estocar energia na forma química vem despontando como a solução para este problema. O hidrogênio é o insumo químico com maior capacidade de armazenar energia, haja vista seu grande poder calorífico. Os sistemas que o utilizam, geralmente possuem melhores eficiências e menores emissões de poluentes. A utilização de tecnologia ligada ao hidrogênio visa basicamente contribuir para a solução da questão energética., e para tal é necessário que a sua utilização passe por um trabalho de racionalização e efficientização. Acredita-se que em um médio prazo acontecerá a transição entre a economia do petróleo e a economia do hidrogênio. O hidrogênio ainda poderia representar o elo entre o sistema de energia e o setor de transporte, aumentando a flexibilidade e a robustez do sistema de energia como um todo [1],[2].

Apesar de ser o elemento mais abundante em nosso planeta, o hidrogênio não existe de forma isolada no meio ambiente. Para obtê-lo são necessários processos químicos, tais como a reforma de vapor, a oxidação parcial de hidrocarbonetos, a eletrólise, o processo termoquímico. Processo de produção como por exemplo: o fotobiológico, o fotoeletroquímico e outros tiveram as pesquisas

Este trabalho foi desenvolvido dentro do Programa P&D CEMIG/ANEEL.

C. H. F da Silva, A. M. Carvalho e E. S. Tôres trabalham na Cemig Geração e Transmissão SA (e-mail: chomero@cemig.com.br, amartins@cemig.com.br; estorres@cemig.com.br)

químico e outros tiveram as pesquisas direcionadas recentemente para a produção de hidrogênio. Existe a expectativa de que os resultados tenham sucesso.

O processo eletrolítico é bastante conhecido. A proposta de construção do laboratório experimental visa não só o dimensionamento correto dos custos de produção do hidrogênio usando as diversas faixas de custo de energia elétrica, como o aprendizado e qualificação de mão de obra nessa tecnologia que é nova para a empresa. A aplicação desta tecnologia acarreta o armazenamento de energia excedente no sistema elétrico na forma química [3].

Este artigo apresenta os resultados do projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D CEMIG/ANEEL 050 – Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio para uso como Vetor Energético.

II. P&D CEMIG/ANEEL 050

As primeiras discussões, na Cemig sobre o assunto hidrogênio podem ser encontradas em documentos internos que datam ainda da década de 1980. Em 1998 iniciaram-se estudos de viabilidade pela UNICAMP que resultaram na estruturação deste projeto [4]. O P&D CEMIG/ANEEL 050 se iniciou no ciclo 2000/2001 e foi encerrado em Maio/2006, tendo um custo total de R\$1.595.692,19. Seus principais objetivos foram:

- Construção do laboratório experimental para produção de Hidrogênio, pelos processos eletrolítico e de reforma de gás natural e derivados de petróleo;
- Capacitação e treinamento de mão-de-obra para produção e manuseio de Hidrogênio;
- Quantificação da energia consumida na produção de Hidrogênio;
- Análise da utilização do gás produzido como vetor energético e;
- Utilização do hidrogênio como fonte de geração distribuída (células combustíveis e grupos motores-geradores).

III. RESULTADOS OBTIDOS – P&D CEMIG/ANEEL 050

A. Construção do Laboratório de Hidrogênio

Foi construída uma edificação para abrigar o laboratório experimental do P&D 050. O local escolhido para a instalação foi a Usina Térmica de Igarapé, onde se dispõe de espaço físico e principalmente água desmineralizada e deionizada de altíssima qualidade produzida para alimentar a caldeira da Usina Térmica. Essas características da água contribuem decisivamente para a pureza do gás hidrogênio produzido.

O laboratório foi construído em uma área de 1354 m², delimitada por cerca de segurança, sendo 284 m² de área construída. A Figura 1 mostra a fachada do Laboratório de Hidrogênio. Após a aquisição dos equipamentos e periféricos, realizou-se a montagem do laboratório, conforme projeto, englobando os aspectos civis, mecânicos, elétricos, hidráulicos e pneumáticos.



Figura 1 – Vista geral do Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio da CEMIG, Juatuba/MG.

Atendeu-se à legislação ambiental, trabalhista e demais leis e normas aplicáveis [5]. Em Dezembro de 2006 o laboratório aprovou suas instalações pelo Corpo de Bombeiros e obteve o Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros (AVCB). Em Maio de 2007 o laboratório recebeu a Autorização Ambiental de Funcionamento (AAF) emitida pela FEAM/MG. No laboratório é realizada coleta seletiva de lixo. Os resíduos sólidos são descartados conforme Sistema de Gestão Integrada da Gerência das Usinas Térmicas. O esgoto doméstico é direcionado para sistema de fossas sépticas e o efluente líquido do laboratório para o sistema de tratamento de resíduos da Usina Térmica de Igarapé. A sinalização de segurança é completa, informando proibições, exigências ou alertas necessários. Na ocorrência de vazamento de gases, em situação de emergência é emitido alarme sonoro para evacuação da instalação. Os vazamentos são detectados por detectores fixos de gases instalados nas salas onde existe esta possibilidade desta ocorrência. Os operadores do laboratório também contam com um detector de gases portátil, sensível a gases combustíveis e monóxido de carbono (CO). Em pontos chaves da instalação foram instaladas botoeiras para desligamento de emergência do processo de produção de hidrogênio. O material do piso feito escolhido de forma a não provocar faiscamento pelo atrito com os calçados de segurança. Foram avaliados os materiais construtivos da instalação, tendo-se o cuidado de escolher materiais resistentes à chama. Todas as salas possuem saída de emergência, portas corta-fogo e acesso a um amplo corredor, conforme é mostrado na Figura 2.



Figura 2 – Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio – corredor central.

B. Produção de Hidrogênio via Eletrólise da Água Alcalina

Denomina-se eletrólise da água um processo eletrolítico particular onde os produtos finais das reações desenvolvidas são hidrogênio e oxigênio, e o balanço das reações químicas envolvidas resulta unicamente na decomposição de água [6], conforme (1).



O fluxograma do processo de produção de hidrogênio via eletrólise da água alcalina implantado no Laboratório encontra-se na Figura 3

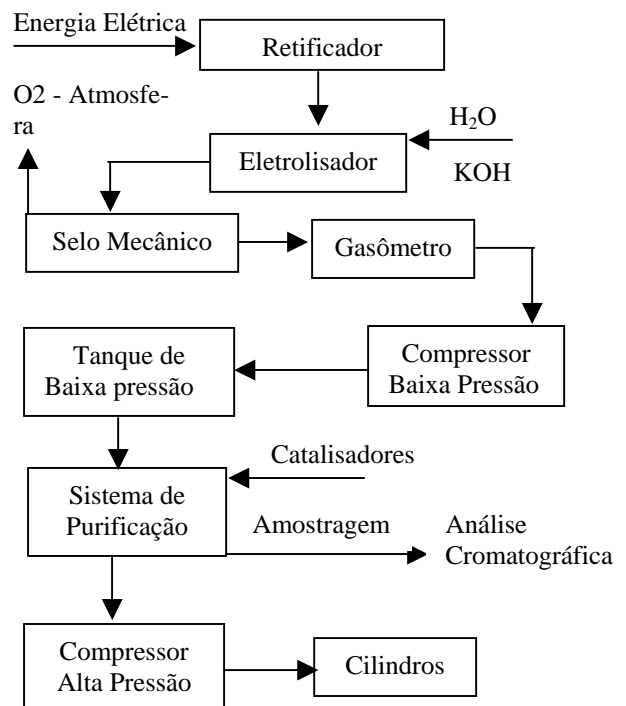


Figura 3 – Fluxograma do processo de eletrólise.

Os eletrolisadores (Figura 4) trabalham com solução eletrolítica de hidróxido de potássio (KOH) com concentração de 30%. O uso desta concentração tem como finalidade aumentar o comprimento da ligação oxigênio-hidrogênio diminuindo assim a energia necessária para o rompimento da ligação química. Estabelecendo-se uma determinada diferença de potencial, quebra-se a molécula de água em seus átomos constituintes, que por sua vez irão formar os gases oxigênio (O₂) e hidrogênio (H₂) expressos na Equação (01). Esses gases provenientes da eletrólise saem do eletrolisador e passam por um primeiro sistema de limpeza de gases (Scrubber), onde a solução eletrolítica arrastada é condensada e retorna ao eletrolisador. Os eletrolisadores foram especificados pela equipe de pesquisa e construído pela empresa Termoquip, possuindo as seguintes características:

- Tipo Tanque Unipolar;
- Eficiência de 80%;
- Tensão de operação: 1,9Vcc;
- Corrente máxima: 12.000 A;
- Densidade de corrente: 1.500 A/m²;
- Área total de eletrodo: 8 m²;
- Consumo de água para eletrólise: 8 l/h.



Figura 4 – Eletrolisadores.

Em seguida os gases passam pelo selo d'água, assegurando uma pressão mínima de 30 cm de coluna de água, a partir de onde acontece o enchimento do gasômetro (Figura 5) pelo hidrogênio. O gás oxigênio é liberado para a atmosfera.

O armazenamento do hidrogênio no gasômetro se deve à necessidade de se estabelecer um fluxo constante de alimentação para o compressor de baixa (Figura 6), que por sua vez comprimirá o gás, armazenando-o em um vaso de pressão. O desinteresse no aproveitamento do oxigênio produzido se deve ao baixo valor comercial quando comparado ao custo de sua produção (geração, limpeza, compressão e armazenamento). A capacidade de produção é de 10 m³/h de hidrogênio.



Figura 5 – Gasômetro.



Figura 6 – Baixa compressão.

Após o sistema de baixa pressão, o gás passará pelo sistema de purificação, mostrado na Figura 7. Existe neste circuito um ponto de amostragem, onde o gás será coletado para análise cromatográfica. Esta análise é realizada em um cromatógrafo Simple Cron da Cromacon Ciola equipado com *software* CSW 32 versão 1.4. Este equipamento composto basicamente por: uma válvula de 10 vias e 2 detectores, sendo um detector por ionização de chama (FID) e um detector por condutividade térmica (TCD). A Figura 8 mostra a sala de análises. A análise de traços de gases em hidrogênio, não é uma tarefa simples, sendo necessários procedimentos e métodos que assegurem a reprodutibilidade e confiabilidade das análises realizadas., como apresentado em [7].

O arranjo da purificação permite expansão, se necessário, e também a purificação seletiva pela passagem do gás em leitos com catalisadores. Inicialmente, espera-se que existam alguns contaminantes como descrito a seguir:

- A vedação do gasômetro é feita por uma camada de água. Considerando que o gás produzido terá contato como a água, por difusão haverá contaminação por ela;
- Considerando que a atmosfera que envolve todo o sistema é rica em nitrogênio, existe possibilidade de ocorrência desse composto, bem como traços de oxigênio;
- Considerando que a vedação do gasômetro é feita por água, pode acontecer a queda de insetos nesta interface, resultando em traços de contaminantes com carbono.

A depender do contaminante o leito será preenchido com o catalisador adequado.



Figura 7 – Sistema de amostragem e purificação.



Figura 8 – Sala de análises e cromatografia.

Após o sistema de purificação compressor de alta (Figura 7) que finalizará o processo de produção de hidrogênio ao comprimi-lo no interior de cilindros de armazenamento de

gás.



Figura 9 – Alta compressão.

C. Aspectos de Controle e Segurança do Processo de Produção de Hidrogênio

Para o controle e segurança do processo de produção do hidrogênio, automatizou-se toda a planta [8]. Foram instalados no laboratório sensores de: temperatura e nível de solução dos eletrolisadores, nível do gasômetro, pressão de hidrogênio em pontos críticos do sistema, presença de hidrogênio no ar nas salas do laboratório e presença de oxigênio na linha de hidrogênio, sendo que qualquer um deles, em determinada situação, pode enviar para a central de comando um sinal de parada do processo de produção ou apenas de alarme.

A equipe técnica que fará a operação do laboratório foi treinada no Laboratório de Hidrogênio do Instituto de Física “Gleb Wataghin” (IFGW). O treinamento contemplou a abordagem de temas como a manipulação e as técnicas de análise de gases ultrapuros com traços de contaminantes via cromatografia gasosa e em segurança no manuseio, operação e prevenção de acidentes em plantas industriais que trabalham com materiais tóxicos e inflamáveis. Estes treinamentos aconteceram em 3 etapas e treinou 4 engenheiros e 5 técnicos.

Além destes treinamentos, foram ainda realizados os cursos regulamentares relacionados às Normas Regulamentadoras nº 10 e nº13 do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), treinamentos em CIPA e brigada de incêndio, técnicas de análise de risco industrial além de participação em congressos, seminários e workshops sobre o tema para atualização de conhecimentos.

Algumas características do hidrogênio que devem ser levadas em conta, considerando o aspecto de segurança são

listadas a seguir [9],[10]:

- O hidrogênio é classificado pela norma NBR-7502 como pertencendo ao grupo de risco 2.
- É mais leve que o ar e quando liberado no ambiente tende a se deslocar para pontos mais altos, acumulando-se junto ao teto em recintos fechados. Mas pode formar uma nuvem inflamável no ambiente caso não tenha por onde abandonar o meio.
- Em ambientes corretamente ventilados ele dissipa-se rapidamente.
- É incolor e inodoro, portanto, não é possível notar sua presença, são necessários sensores específicos.
- Possui chama levemente azulada, sendo na maioria das vezes incolor.
- Não é corrosivo.
- Não provoca envenenamento.
- Altamente inflamável.
- Alta densidade de energia por massa, três vezes mais do que a gasolina.
- Apresenta tendência a vazamentos.
- Alta velocidade de chama.
- Improvável que ocorra detonação em espaços abertos.
- O hidrogênio pode agir como asfixiante diluindo o oxigênio no ar. A inalação de ar com grandes quantidades de hidrogênio pode ocorrer sem que se note qualquer sintoma como tonturas;
- Pequenas concentrações, insuficientes para provocar a inconsciência podem ser inflamáveis, portanto, todas as precauções que se tomam com qualquer gás inflamável devem ser também tomadas com o hidrogênio.
- O hidrogênio inflama-se ao ar numa larga faixa de concentração (de 4 a 75% em volume), entrando em ignição por faíscas, descargas elétricas, fagulhas, cigarro aceso, chamas, etc.
- O hidrogênio líquido e o gás frio proveniente do líquido podem produzir queimaduras semelhantes àquelas com temperatura alta, na pele, olhos e outros tecidos.

Desta forma, durante os trabalhos no laboratório, busca-se de forma permanente, a eliminação de fonte de ignição e a detecção de possíveis vazamentos, utilizando para tal equipamentos apropriados. Busca-se também a ventilação apropriada para os ambientes de forma a não criar atmosfera explosiva. Isto é obtido por ventilação natural e ventilação forçada, calculada conforme [11].

Foram adotados equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC) aplicáveis e especificados segundo o SESMT da empresa. Estão sendo elaborados os procedimentos operacionais, incluindo um plano de atendimento à emergência, a serem seguidos durante a operação contínua do laboratório. Estas instruções estão sendo baseadas nas melhores práticas de mercado e norteadas especificamente por [12]-[13].

O laboratório possui maca para transporte de acidentados, kit de emergência, também especificado pelo SESMT da empresa, chuveiro de emergência e lava olhos, como na Figura 10.



Figura 10 – Chuveiro de emergência e lava-olhos.

D. Problemas de Montagem

Durante os testes e o comissionamento foram detectados alguns problemas de projeto e de montagem. A seguir serão descritos sucintamente os problemas ocorridos bem como a solução adotada:

- **Montagem dos Eletrolisadores:** A construção do equipamento foi feita pela TERMOQUIP, tendo sido feita uma pré-montagem em fábrica. Considerando-se a grande sensibilidade de alguns componentes a vibração, ocasionada pelo transporte, que poderia danificá-los, a montagem final foi feita nas instalações da CEMIG. Na primeira tentativa de montagem dos eletrolisadores, houve problemas durante a passagem das mantas de amianto pelos eletrodos. Após a detecção deste problema, foi reprojeta e reconstruída toda a estrutura de fixação das mantas aumentando a abertura para passagem dos eletrodos entre as mantas. Tal ação teve resultado satisfatório permitindo a continuidade dos trabalhos de montagem e posterior teste dos eletrolisadores.
- **Vazamento no Fundo dos Eletrolisadores:** Após enchimento dos eletrolisadores com solução eletrolítica, foram verificados pequenos vazamentos no fundo dos mesmos. Foi feita a desmontagem da tubulação de água bruta, água desmineralizada, oxigênio, hidrogênio, e das instalações elétricas. Os eletrolisadores foram esvaziados e erguidos para que fosse feito o reparo individual dos equipamentos. Esta foi uma atividade bastante complexa e de grandes riscos devido à movimentação

de solução cáustica, de efeito tóxico e altamente corrosivo, bem como a possibilidade de acidentes com perdas materiais devido à possibilidade de danos aos eletrodos e isoladores durante a movimentação dos mesmos.

- **Potência Instalada Inferior a Necessária para o Transformador de Alimentação:** Durante o cálculo para dimensionamento foram utilizados apenas os números requeridos pelos eletrolisadores (tensão e corrente), desprezando a influência do fator de potência e do rendimento do retificador. Este problema foi detectado durante os primeiros testes funcionais do equipamento, realizados no final de 2004. Iniciou-se nesta mesma época os trabalhos para atualização de projetos e substituição do transformador, o que ocorreu em meados de 2005. Contudo o transformador instalado foi incompatível com o especificado. O processo de substituição foi reiniciado e este transformador foi instalado em março de 2006.
- **Tubulação de Saída dos Gases Mal Dimensionada:** Durante os testes iniciais, realizados em novembro de 2004, foi verificado um arraste excessivo de solução, devido à posição da tubulação de saída de H₂ e O₂. Foi feita a substituição completa da tubulação originalmente construída com mangueiras de nylon, por tubulação rígida em PVC. O diâmetro da tubulação também foi alterado de ¾ de polegada para 1¼ de polegada. Foi feito também um acréscimo na distância de subida dos gases antes que os mesmos fossem interligados, (eletrolisador 1 e 2) reduzindo desta forma o arraste de resíduos líquidos pelos gases.
- **Vazamento nos Vasos de Tratamento de Gás:** Durante testes de estanqueidade realizados utilizando nitrogênio, foi detectado vazamento nas paredes dos vasos de tratamento. Estes vasos deveriam suportar a pressão de 1 MPa. Contudo apresentaram vazamento à pressão de aproximadamente 0,2 MPa. Estes vasos foram reconstruídos, sendo aproveitados apenas os flanges dos mesmos. Foram feitos testes de estanqueidade pelo fabricante nos novos vasos de tratamento utilizando pressão de 1,5 MPa, conforme norma específica. Os vasos foram novamente testados pela CEMIG após sua instalação local, utilizando nitrogênio a uma pressão de 1 MPa. Em ambos os testes os equipamentos apresentaram desempenho satisfatório.
- **Compressor de Baixa Pressão:** Inicialmente foi adquirido um compressor de uso odontológico (ar comprimido sem contaminação por óleo) para fazer a pré-compressão do hidrogênio. A pré-compressão consiste em transferir do gasômetro para o tanque de armazenamento de gás o hidrogênio, nas pressões 0,1 e 1 MPa respectivamente. Este compressor apresentou aquecimento anormal devido ao funcionamento contínuo e ao aquecimento provocado pela compressão do hidrogênio. A causa deste fato é que o aquecimento pela compressão do hidrogênio é maior do que o aquecimento pela compressão do ar. Compressores isentos de óleo para grandes vazões são facilmente encontrados no mercado. Contudo para vazão compatível com a demanda do laboratório (aproximadamente 20 m³/h) são

raros e de preço elevado. Tendo em vista estes motivos, optou-se por adquirir um compressor originalmente utilizado para compressão de ar atmosférico, isento de óleo, adaptando-o para compressão de hidrogênio. Estas adaptações foram estudadas considerando-se os riscos inerentes a operação com um gás altamente inflamável como o hidrogênio.

- **Travamento do Gasômetro:** Durante os testes e início do processo de limpeza química ocorreu o travamento do gasômetro, que agarrava nas laterais devido a ovalização do mesmo e também devido à inclinação lateral da parte móvel. Quanto ao problema de ovalização da parte móvel, o gasômetro foi desmontado e desovalizado utilizando macaco hidráulico. Para verificar a solução do problema e acompanhar os trabalhos foram feitas medições de excentricidade durante o trabalho de enchimento/esvaziamento do gasômetro. Quanto ao problema de inclinação lateral da parte móvel, foram instalados três roletes uniformemente distribuídos pela circunferência do mesmo guiando seu movimento e resolvendo o problema.

E. Incorporação de Outros Projetos de P&D a Estrutura do Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio

O projeto P&D 008 – Célula a combustível de polímero condutor iônico a hidrogênio e a etanol direto foi iniciado em Fevereiro de 2000 e resultou no primeiro protótipo de célula combustível tipo PEM da América Latina, com potência de 1 kW, em parceria com: Clamper Indústria e Comércio, Unitech, Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI) e do Instituto de química da USP- São Carlos. A meta era produzir em escala pré-industrial uma alternativa eficiente de garantir formas limpas de geração de energia. Associando rendimento e confiabilidade, as células a combustível são em um médio prazo, uma das principais tecnologias de geração de energia. A sala disponível para a célula combustível onde (Figura 12) será feita a operação periódica desse equipamento, considerando a programação de mão-de-obra para tal e combustível obtido pela produção do laboratório. O funcionamento da célula a combustível é mostrado na Figura 13. O objetivo desta operação é avaliar o comportamento da célula e acompanhar qualidade do gás produzido.

A célula a combustível é uma tecnologia que utiliza a combinação química entre os gases oxigênio e hidrogênio para gerar energia elétrica, energia térmica e água [12]. As reações no anodo, catodo e global são apresentadas em (2)-(5). Onde Pt é platina, catalisador comum em células PEM.

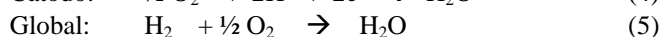
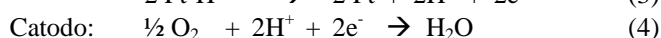
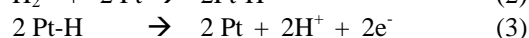
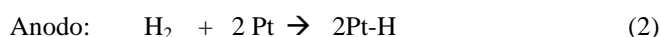




Figura 12: Célula tipo PEM no Laboratório de Hidrogênio.

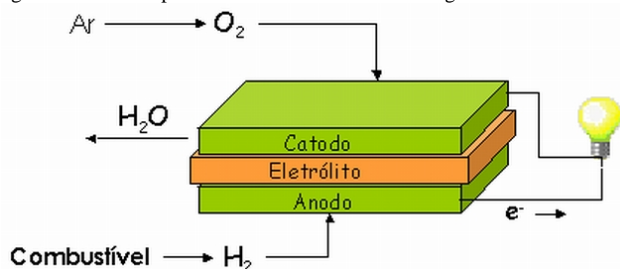


Figura 13: Esquema do funcionamento de uma célula a combustível unitária.

Alguns dos desafios relacionados a células a combustível estão associados com o custo e disponibilidade de catalisador e membrana polimérica, cujos temas serão desenvolvidos em projetos de P&D Cemig/Aneel, ciclo 2005/2006 em processo de aprovação pela Aneel.

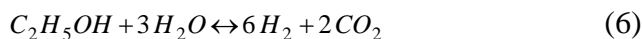
Outro projeto que foi incorporado à estrutura do laboratório e será operado de forma contínua é o protótipo II resultante do projeto de P&D Cemig/Aneel 108 – Produção de Hidrogênio através Reforma de Etanol.

Os principais processos termoquímicos para produção de hidrogênio são: gaseificação de biomassa e pirólise, reforma a vapor, oxidação parcial, reforma autotérmica e reforma oxidativa. As matérias-primas que podem ser utilizadas na produção de hidrogênio através da reforma a vapor são o gás natural, metanol, gasolina e etanol. Entre as várias matérias-primas de origem fóssil ou renovável que podem ser reformadas destaca-se o etanol devido à sua origem renovável e, também, pela viabilidade termodinâmica da reação de reforma do etanol para a produção de hidrogênio. A reforma a vapor do etanol é interessante pelo fato do Brasil ser um dos grandes produtores mundiais de cana-de-açúcar, com domínio de produção e distribuição de álcool combustível.

A produção de hidrogênio através da reforma a vapor ocorre, basicamente, em duas etapas catalíticas, sendo que uma etapa ocorre em altas temperaturas “reações de reforma a vapor – *Steam Reforming Reactions* (SRR)” e a outra etapa em temperaturas mais baixas “reações de troca água-gás – *Water Gas Shift Reactions* (WGSR)”.

Na primeira etapa há a conversão catalítica da mistura combustível/vapor d’água em um fluxo de gases de síntese que apresenta, geralmente, como produtos majoritários o H_2 e CO_2 e, como produtos secundários o CO , CH_4 e outros subprodutos que depende dos parâmetros de operação do processo de reforma. Além da reação de reforma a vapor uma outra reação que aparece na maioria dos sistemas de processo de reforma a vapor é a reação de troca água-gás – *water gas shift reaction* (WGSR). Esta etapa do processo remove parte do CO e produz hidrogênio adicional através da reação catalítica reversível exotérmica entre o CO e vapor de água. Esta etapa do processo se torna necessário devido à quantidade de CO presente nos produtos dos processos de reforma a vapor e oxidação parcial e, principalmente, pelos limites de concentração de CO suportados por determinados tipos de célula a combustível. As células a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* - PEMFC) suportam no máximo 10-100 ppm de monóxido de carbono no fluxo de alimentação do ânodo, então, torna-se necessário remover o CO antes de promover a alimentação deste tipo de célula a combustível com o gás de síntese proveniente do sistema de reforma a vapor.

A reação global da conversão de etanol a hidrogênio indica a produção de 6 moles de hidrogênio a partir de 1 mol de etanol através da reforma a vapor, como mostra (6):



A Figura 14 mostra o fluxograma do processo de reforma e a Figura 15 mostra o sistema de reforma integrado ao Laboratório de Hidrogênio.

Encontra-se em processo de aprovação projetos para pesquisa de novas rotas catalíticas e melhoramento no sistema de reforma a vapor de etanol.

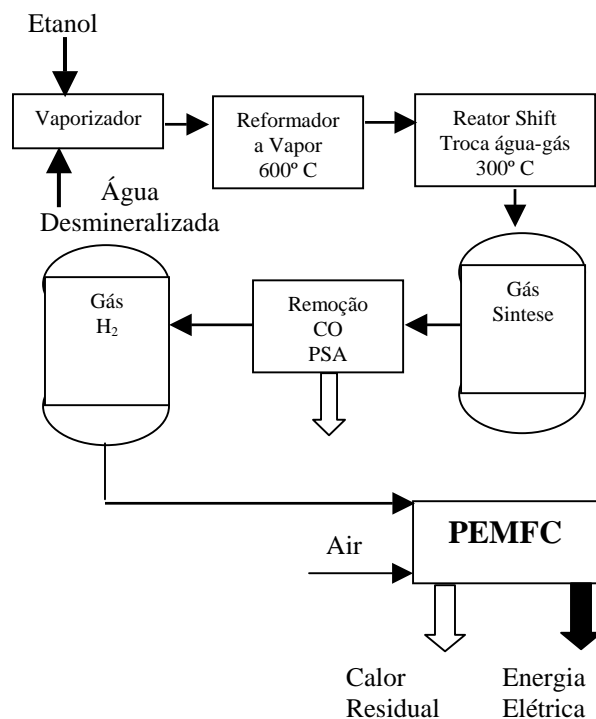


Figura 14 – Reforma de Etanol: Fluxograma.



Figura 15: Reformador de etanol e sua coluna de purificação – Laboratório de Hidrogênio.

IV. CONCLUSÕES

A CEMIG GT SA pôde com este projeto: avaliar oportunidades de negócios; subsidiar ações estratégicas; capacitar técnicos para trabalhos associados ao hidrogênio e viabilizar pesquisas em geração distribuída.

O CENEH (Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio – IFGW/UNICAMP) obteve o fortalecimento de seu grupo de pesquisa e reconhecimento como um centro de excelência nessa tecnologia.

O laboratório encontra-se montado, equipado em estágio de pré-operação experimental. Todos os equipamentos foram especificados e projetados pela equipe de pesquisa envolvida e sua aquisição foi 90% nacional. A estrutura montada permite o desenvolvimento de novos projetos de pesquisa, podendo contribuir decisivamente para a implantação de fato das tecnologias do hidrogênio.

A Cemig desenvolveu competência para projeto, manuseio, segurança e operação de sistema com hidrogênio e pesquisas com células a combustível.

Pode-se perceber claramente que o projeto atingiu plenamente os objetivos propostos quanto à construção de uma unidade experimental, capacitação de pessoal para trabalho com hidrogênio, bem como atende aos requisitos de P&D Aneel. A qualificação, quantificação, análise de custos e utilização do gás como vetor energético e insumo químico estão sendo realizados dentro do projeto de P&D CEMIG/ANEEL 181 – Produção de Hidrogênio no Laboratório Experimental.

O Laboratório incorporou também em suas atividades operativas a célula a combustível tipo PEM produzida dentro do P&D 008 e o reformador de etanol construído no P&D 108.

As tecnologias do hidrogênio são uma realidade e se mostram como uma importante opção na constituição do conjunto de soluções para a questão energética mundial.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Equipe de pesquisa das seguintes instituições: Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (IFGW/UNICAMP, Campinas), Grupo de Otimização de Sistemas de Energia (UNESP, Guaratinguetá) e Instituto de Química (USP, São Carlos) pela contribuição na elaboração deste documento.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. A. Silva, “Hidrogênio e Células a Combustível: diagnóstico da utilização dessa tecnologia alternativa para geração de energia”, Relatório de Estágio, TE, Novembro, 2006.
- [2] E. H. G. Neto, “Hidrogênio, Evoluir sem poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustíveis”, Curitiba, Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005
- [3] J. L. A. Garcia, “Produção de Hidrogênio Eletrolítico Utilizando Energia Secundária ou Fora de Ponta e seu Uso como Vetor Energético”, Relatório Técnico 1800-ST-32, Belo Horizonte, Dezembro, 1999.
- [4] ANEEL, “Revista de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel”, Nº 1, Brasília, Agosto, 2006.
- [5] C. H. F. Silva, “Descrição dos Processos do Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio - Medidas de Segurança Implementadas”, Relatório Técnico, TE/Abril/2006.
- [6] E. P. da Silva, “Eletrólise da água”, Seminário apresentado no curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas, 1990.
- [7] N. P. N. Junior, “Determinação cromatográfica quantitativa de gases leves em hidrogênio”, Tese de doutorado, UNICAMP, 1995.
- [8] A. M. Carvalho, R. J dos Santos, “Montagem do Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e Seu Uso Como Vetor Energético”,
- [9] S. A. Silva, A. J. V. Madureira, D. A. Silva, C. H. F. da Silva, “Procedimento de Segurança – Laboratório Experimental de Hidrogênio”, Relatório Técnico, Maio, 2007
- [10] R. Burke, “Hazardous materials chemistry for emergency responders”, CRC Press Inc., USA, 1997.
- [11] NPFA, “NPFA 69 – Standard on Explosion Prevention Systems”, NPFA, USA, 2002
- [12] NASA, “Safety standard for hydrogen and hydrogen systems”, Office of Safety and Mission Assurance, 1997, disponível em www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf;
- [13] E. P. da Silva, “Normas de segurança para manuseio e utilização de cilindros pressurizados contendo hidrogênio”, Emope Gráfica e Editora Ltda, 1992.