

Laboratório de Produção de Hidrogênio da Cemig: Operação Experimental

Cláudio Homero Ferreira da Silva, Alaíse Junia Vieira Madureira, André Martins Carvalho

Resumo – O histórico da energia aponta para a descarbonização da fonte. Uma opção deste cenário é a chamada economia do hidrogênio, onde as fontes primárias produzem energia elétrica, calor e hidrogênio, com o uso de forma mais eficiente. O hidrogênio neste caso não é uma fonte e sim um vetor energético. Desta forma a Cemig GT SA construiu o laboratório de experimental de hidrogênio, instalação localizada na UTE Igarapé em Juatuba/MG e realizou o Projeto de P&D Cemig/Aneel nº181 (Código Aneel 0049-135/2005). Neste artigo são apresentadas as atividades operativas realizadas, bem como as dificuldades encontradas. São também apresentados os resultados de análise de eficiência e de custo de produção de hidrogênio realizados dentro do projeto. As conclusões indicam que as dificuldades ainda são muitas e a necessidade de maiores pesquisas. Contudo o hidrogênio e suas tecnologias ainda se mantêm promissores para o futuro, dados os benefícios inerentes.

Palavras-chave – Hidrogênio, Eletrólise, Reforma de etanol, célula a combustível.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos vem ocorrendo um grande interesse no conhecimento e uso do hidrogênio como armazenador de energia na forma química e seu uso como vetor energético, tanto na produção de energia elétrica via célula combustível, para uso como combustível em veículos, por se tratar de um combustível não-polvente e de alto poder calorífico [1]. Outro campo de interesse é a utilização do hidrogênio na purificação do silício de grau metalúrgico para grau eletrônico, para produção de células fotovoltaicas.

O hidrogênio como vetor energético é concebido para ser utilizado principalmente em equipamentos que promovem uma reação eletroquímica entre o hidrogênio e o oxigênio, gerando energia elétrica, calor e apenas água como resíduo. Notadamente é claro o apelo ambiental deste sistema. Entretanto este vetor energético possui ainda as seguintes possibilidades de aplicação: combustível automotivo, enriquecimento de combustão, principalmente considerando-se gases pobres resultantes de processos de gaseificação, geração de vapor e propulsão para foguetes espaciais. Percebe-se também que este gás faz interface entre os sistemas de energia e o sistema de transporte, podendo representar uma grande

oportunidade, abrindo um imenso mercado, mas trazendo consigo algumas questões que merecer ser mais bem tratadas, visto que participa de tecnologias de armazenamento e outros pilares das redes inteligentes ou *smartgrid*.

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 eletrólise alcalina da água e o processo de reforma. Alguns novos processos têm sido pesquisados e existe a expectativa de que os resultados tenham sucesso e também que consiga ter sucesso na ampliação de escala. De qualquer forma, é interessante lembrar que tal ação trata-se de um processo cuja eficiência é sempre menor que a unidade.

A proposta de construção do laboratório experimental visou 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 dentro dos negócios da empresa. Desta forma, o projeto consiste em produzir hidrogênio em alto grau de pureza, que será armazenado em cilindros de aço. Nesta produção, foram calculados os custos envolvidos no consumo de energia elétrica. Para tanto, estão instalados na planta de produção, um cromatógrafo que fará a análise qualitativa do gás. Estão instalados também, dois medidores de energia, sendo um para medir exclusivamente a energia consumida no eletrolisador e outro para medir a energia consumida em toda a instalação. As medições levaram ao custo e qualidade do hidrogênio. O hidrogênio produzido pelo processo de reforma de etanol, resultante do protótipo obtido no Projeto de P&D 108, encerrado em Agosto/2008 [2] também será qualificado em uma operação conjunta da instalação. A célula a combustível também terá avaliada em sua operação, integrando a instalação e compondo o leque de tecnologias pesquisadas e operadas na instalação, desde a produção do gás hidrogênio até o seu uso em células a combustível [3].

A seção II apresenta um breve histórico do desenvolvimento desta pesquisa. A seção III apresenta o laboratório de hidrogênio. Na seção IV encontram-se os resultados e principais discussões decorrentes da execução deste projeto. As conclusões do trabalho encontram-se na seção V e no encerramento do trabalho estão as referências bibliográficas para a elaboração deste artigo.

II. P&D CEMIG/ANEEL Nº 181 (CÓDIGO ANEEL 0049-135/2005)

As primeiras discussões, na Cemig sobre o assunto hidro-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

C. H. F da. Silva, A. J. V. Madureira e A. M. Carvalho trabalham na Cemig GT SA. (e-mails: chomero@cemig.com.br; alaise.madureira@cemig.com.br e amartins@cemig.com.br).

gênio 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 do Projeto de P&D Cemig/Aneel nº 050: Laboratório experimental para produção de hidrogênio para uso como vetor energético [4]. A montagem da instalação foi concluída em Maio/2006, possibilitando assim o início da operação da instalação. A Figura 1 mostra a fachada do Laboratório de Hidrogênio da Cemig.



Figura 1. Laboratório Experimental de Hidrogênio - Cemig – Juatuba/MG.

O P&D CEMIG/ANEEL 181 (Código Aneel 0049-135/2005) se iniciou no ciclo 2004/2005 e foi encerrado em Maio/2009. Resultou da parceria entre a Cemig Geração e Transmissão SA e a Universidade Estadual de Campinas (IFGW/UNICAMP e Hytron). Seus principais objetivos foram:

- Produção de hidrogênio para ser utilizado como vetor energético.
- Qualificar e quantificar o gás produzido;
- Purificar, monitorar a qualidade do gás usando o processo de cromatográfica gasosa;
- Quantificar os custos do hidrogênio
- Como objetivos secundários pode-se citar: quantificar a eficiência do eletrolisador utilizado no processo, mensurar o uso do hidrogênio como vetor energético via célula a combustível e analisar o uso do mesmo em outras aplicações;
- Disseminar e contribuir para o desenvolvimento e uso de energia elétrica via geração distribuída ou descentralizada de energia utilizando célula a combustível, que tem como combustível o hidrogênio.

A. Metodologia

A metodologia executada para se atingir o objetivo do projeto é apresentada a seguir:

- Levantamento de dados da planta instalada no Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio;
- Estudo dos equipamentos da planta e sua operação, bem como treinamento específico realizado na UNICAMP entre os dias 22 e 25/05/2007, através do curso: “Segurança em sistemas com hidrogênio” e “Análise de gases ultra purificados”, totalizando 40 horas de treinamento individual;

- Adequações técnicas na planta (sistema de cromatografia e legal (NR’s 10 e 13);
- Operação da planta em etapas unitárias;
- Operação contínua da planta e de forma integrada, com trabalho em turno de revezamento por 36 horas;
- Participação no Seminário Internacional “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”, realizado no Texas, EUA;
- Correção de falhas diversas que ocorram durante a operação, principalmente nos sistemas de retificação, cromatografia e eletrólise;
- Limpeza dos cilindros de hidrogênio;
- Análise de gases através de ensaios cromatográficos no CETEC e na UNICAMP e validação dos resultados de cromatografia do laboratório;
- Análises de consumo de energia;
- Operação da planta e compressão do hidrogênio produzido nos cilindros;
- Estudos do sistema de reforma de etanol;
- Estudos do sistema de produção de energia através de células a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*);
- Especificação e utilização do sistema de purificação.
- Análises de custo do hidrogênio produzido;
- Estudo da aplicabilidade da dissertação de mestrado de André Luis Furlan, desenvolvida dentro do projeto.

B. Benefícios do projeto

A meta final dos projetos de pesquisa e desenvolvimento Cemig/Aneel, em última análise, é a modicidade tarifária. Torna-se necessário que os projetos realmente ultrapassem as barreiras e se tornem de fato inovação, fechando o ciclo P&D&I (pesquisa, desenvolvimento e inovação), gerando produtos e serviços para a sociedade. Outras finalidades do programa estão relacionadas com o desenvolvimento regional, capacitação ao desenvolvimento tecnológico, fomento a pesquisa com a qualificação técnica-científica de pesquisadores, formação de mão-de-obra especializada e fortalecimento das instituições de pesquisa [6]. Notadamente o projeto alcançou em certa medida todas as diretrizes apontadas anteriormente para os projetos, mas de forma a ilustrar mais claramente são detalhados alguns itens a seguir:

- Através do projeto, foram possíveis a operação do laboratório, a produção e a análise de hidrogênio como vetor energético;
- A produção de hidrogênio nos chamados “horários fora de ponta” e posterior utilização no “horário de ponta” podem trazer uma redução de custo na geração, uma vez que se trata de uma forma de armazenar energia vertida e não aproveitada;
- A Cemig tornou-se a concessionária de energia elétrica pioneira nesse tipo de estudo e o retorno deste projeto pode ser percebido na valorização e fortalecimento da marca Cemig;
- Os resultados do trabalho permitiram a participação dos membros do projeto em evento internacional e nacional, divulgando o nome da UNICAMP, da Hytron e da Cemig.

C. Principais dificuldades

As principais dificuldades associadas com este projeto foram:

- Dificuldades de se encontrar peças, componentes e equipamentos apropriados para o trabalho com hidrogênio;
- Dificuldade de se encontrar fornecedores e atrasos nas entregas de peças e equipamentos;
- Necessidade de adaptações e construção de peças e equipamentos customizados;
- Falhas constantes e de diversas naturezas no sistema de cromatografia;
- Equipe reduzida;
- Necessidade de ajustes e adequações diversas no laboratório.

Alguns destes itens e/ou as suas conseqüências foram responsáveis pelo atraso no desenvolvimento de 5 meses no desenvolvimento do projeto, resultando ainda em ações de reposicionamento de atividades.

Apesar de que alguns países acenarem para uma condição em que o gás hidrogênio como vetor energético seja uma realidade próxima, uma cotação realizada em 2008 por técnicos da empresa indicam o contrário. Se existe tecnologia ela não se encontra facilmente disponível para o Brasil, principalmente pela ausência de garantias quanto à assistência técnica [5].

D. Incorporação de outros projetos ao Laboratório de Hidrogênio

Na operação do laboratório foram incorporados os seguintes projetos:

- P&D 008: Célula a combustível de polímero condutor iônico a hidrogênio e etanol direto. O protótipo de 1 kW foi incorporado à instalação e teve a sua operação realizada, principalmente durante algumas importantes visitas técnicas que ocorreram na instalação;
- P&D 108: Protótipo de reformador a vapor de etanol. Esse equipamento foi deslocado para a instalação considerando o final do P&D 108. Contudo o mesmo encontrava-se desconectado e caberia ao pessoal da Cemig fazer a conexão e operação integrada do equipamento de forma a quantificar e analisar os gases produzidos. Foram finalmente levantados os dados necessários para o fechamento do projeto;

Considerando a natureza tecnológica da instalação e o desdobramento em diversos outros projetos na cadeia das tecnologias do hidrogênio, é natural que este Laboratório Experimental se torne a instalação agregadora dos desenvolvimentos obtidos nos outros P&D. A Tabela 1 apresenta os projetos de P&D Cemig/Aneel em hidrogênio e células a combustível (CaC) cujos desenvolvimentos são aguardados para compor as tecnologias disponíveis no laboratório de hidrogênio e para posicionamento estratégico da empresa com relação aos projeto de pesquisa nessa área [7].

Observando os projetos realizados, pode-se perceber claramente que a execução dos mesmos é feita de forma a resolver os gargalos científicos e tecnológicos dos diversos processos. Nota-se também que os mesmos se encontram alinhados com os investimentos mundiais na área

[8],[9],[10],[11].

Tabela I. Projeto de P&D da Cemig nas tecnologias do hidrogênio.

P&D em Hidrogênio e CaC	09	10	11	12
Desenvolver a tecnologia PEMFC				
<i>Projetos em Andamento:</i>				
-GT228 – Nanotubos de carbono	X	X	X	X
-GT232 – Membrana polimérica				
Desenvolver a tecnologia de SOFC.				
<i>Projeto em andamento:</i>				
- 097 – Desenvolvimento de SOFC de 50 W	X	X	X	X
<i>Projeto Previsto:</i>				
- GT 291 – Célula tipo SOFC de 1kW				
Otimizar os sistemas para produção de hidrogênio por reforma de etanol				
<i>Projeto Previsto:</i>				
-GT 288 – Desenvolvimento de catalisadores para reforma de biomassa		X	X	
Desenvolver sistema para produção de hidrogênio de biomassa (biogás, glicerol, etc.)	X	X	X	
<i>Projetos em andamento:</i>				
-D237 – Gaseificação de biomassa e SOFC.				
Desenvolver sistema de combustão interna à hidrogênio				
<i>Projeto previsto:</i>				
GT 292 – Desenvolvimento de MCI movido à hidrogênio	X	X	X	X
Desenvolver aplicações em DLC para Células a Combustível	X	X	X	
<i>Projetos em Andamento:</i>				
-Cemig/Clamper/USP (Finep)				

III. RESULTADOS OBTIDOS

O Laboratório de Hidrogênio possui uma capacidade instalada de produção de 10 Nm³/h de gás hidrogênio. Um esquema simplificado do processo é mostrado na Figura 2.

A. Atividades Operacionais

Em Dezembro de 2006 o laboratório recebeu aprovação das 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 e com validade até 2011. No laboratório também é realizada coleta seletiva de lixo e os resíduos sólidos são descartados con-

forme Sistema de Gestão Integrada da Gerência das Usinas Térmicas. As sinalizações de segurança foram feitas à medida que se detectou a necessidade ou a regulamentação, informando proibições, exigências ou alertas necessários.

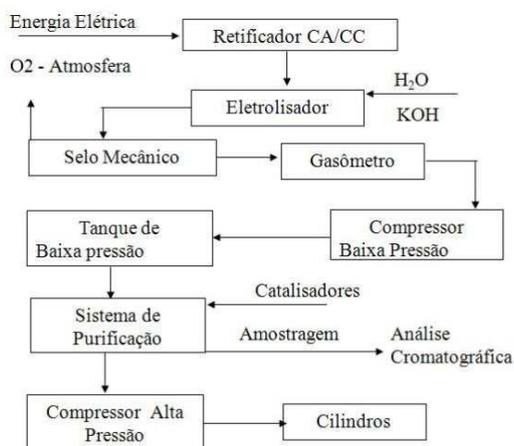


Figura 2. Esquemático simplificado do processo de eletrólise.

Foram adotados equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC) aplicáveis e especificados segundo o Serviço de Saúde e Medicina do Trabalho (SESMT) da empresa. Em diversos pontos da instalação existem sensores de presença de hidrogênio e os operadores do laboratório também contam com um detector de gases portátil, sensível a gases combustíveis (hidrogênio) e monóxido de carbono (CO). Existem ainda diversos pontos de parada de emergência do processo de eletrólise, que é o único que possui operação remota, através da sala de controle, mostrada na Figura 3.



Figura 3. Sala de controle do Laboratório de Hidrogênio.

Os demais sistemas por exigirem operação manual e local não possuem esta exigência. O laboratório possui maca para transporte de acidentados, kit de emergência, também especificado pelo SESMT da empresa, chuveiro de emergência e lava olhos.

Durante o período de operação da instalação foi necessário que um representante do laboratório atuasse como em-

pregado designado na Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA) e Brigada de Incêndio da UTE Igarapé. A atividade foi executada, incluindo os treinamentos exigidos por estas comissões.

Foram elaborados os procedimentos operacionais, incluindo um plano de atendimento à emergência, a serem seguidos durante a operação contínua do laboratório. Estas instruções foram baseadas nas melhores práticas de mercado, utilizando de todos os conhecimentos obtidos em treinamentos, literatura e normas obtidos durante o desenvolvimento deste projeto. Alguns dos principais documentos são indicados foram [12]-[13]. A lista dos procedimentos operacionais (PO) criados para a operação do laboratório é dada a seguir:

- PO TE/LH-001 – Operação do cromatógrafo *Simple Chrom*, 14 páginas;
 - PO TE/LH-002 – Atendimento a Emergências, 18 páginas;
 - PO TE/LH003 – Operação da planta de produção de hidrogênio eletrolítico, 42 páginas;
 - PO TE/LH 004 – Operação do reformador de etanol, 16 páginas;
 - PO TE/LH 005 – Operação de células a combustível de 1 kW, 12 páginas.
 - Para a execução das atividades de operação foram necessários outros estudos e documentos conforme indicados a seguir:
 - Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) para o hidrogênio produzido. Considerando a possibilidade de transporte deste gás para ser utilizado como insumo químico se faz necessário o acompanhamento deste documento;
 - FISPQ para o gás de síntese produzido no processo de reforma de etanol. Este documento é orientativo para a equipe de resgate em caso de acidentes;
 - Análises de risco associadas às atividades de operação: na célula a combustível, no sistema de eletrólise, no sistema de reforma e no manuseio com cilindros;
 - Seqüência de manobras para partir e parar os sistemas: célula a combustível, eletrólise e reforma de etanol,
 - Foi elaborado também um software em Access para acompanhamento das atividades de operação, cuja tela de entrada é indicada na Figura 4.
- Através deste aplicado é possível realizar os seguintes acompanhamentos:
- Situação e controle de alarmes;
 - Anotações gerais e avisos;
 - Registro e controle de permissões para trabalho na área do laboratório e em equipamentos de processo;
 - Controle dos gases;
 - Operação do sistema de eletrólise;
 - Operação do sistema de reforma;
 - Operação da célula a combustível;
 - Operação do sistema fotovoltaico;
 - Medições e medidores de energia;
 - Ocorrências ambientais;
 - Incidentes de segurança;
 - Registro de visitas.

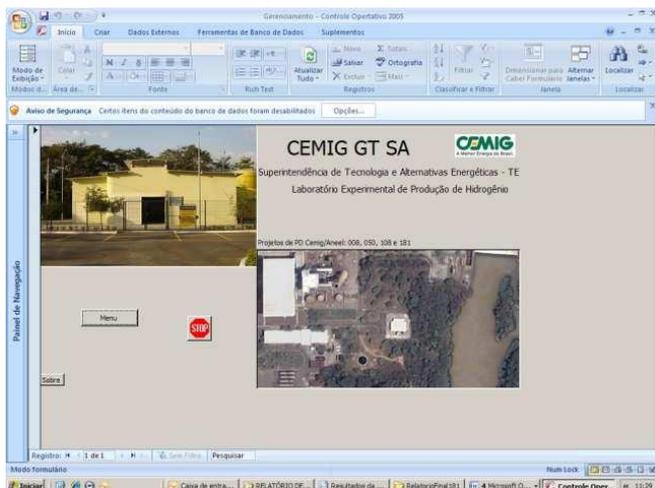


Figura 4. Software de controle operativo do Laboratório de Hidrogênio.

Além destes acompanhamentos foi realizado um estudo preparativo de adequação da instalação às exigências do sistema integrado de gestão corporativa (SIG). Tal estudo foi efetivado tendo em vista o levantamento de necessidades de adequações da instalação às exigências das normas internacionais ISO 9000, ISO 14000, OHSAS 18000, principalmente considerando-se a possibilidade de vender o gás hidrogênio para empresas certificadas do setor de gases. Tal situação era uma possibilidade prevista para ocorrer após o término do projeto, dando uma aplicação de insumo químico para o gás produzido. Deste estudo preliminar resultou um plano de manutenção, um plano de treinamento, lista mestra de documentos interno, lista mestra de documentos externo e em na lista de registros

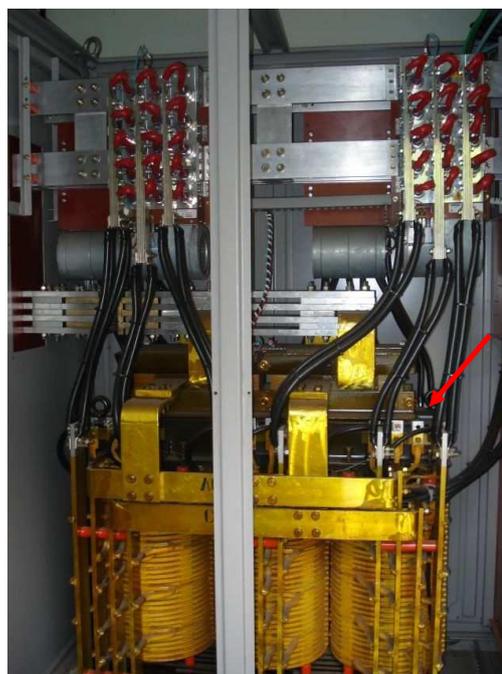
Paralelamente à operação do laboratório, dentro do P&D 181 (Código Aneel 0049-135/2005) foi feito a elaboração de manuais de operação e manutenção do sistema de reforma de etanol e propostas de melhorias no sistema, juntamente com estudo de análise de custo de produção de hidrogênio e de assistência técnica para montagem e desmontagem do reformador, além de discussões acerca da interligação dos protótipos de célula a combustível tipo PEM de 1 kW e o sistema de reforma de etanol de 1 m³/h [14],[15],[16],[17].

B. Problemas Operacionais

A seguir serão descritos alguns problemas operacionais relevantes que ocorreram durante a execução do projeto [18].

O retificador de corrente apresentou vários problemas desde o início das operações do laboratório experimental. Por diversas ocasiões foi necessária a manutenção do equipamento por parte do fabricante e, mesmo após as intervenções, o equipamento não funcionou a contento. Nos primeiros meses de operação o retificador apresentou a queima constante dos fusíveis de segurança, mesmo quando o equipamento estava sendo operado com baixas potências. Foram detectados e corrigidos problemas na linha de automação, passando por uma avaliação de que os fusíveis estavam subdimensionados. Outro problema diagnosticado no início das operações foi o aquecimento excessivo do retificador. Este problema é particularmente observado nos tirantes metálicos

que realizam o fechamento das placas do transformador que chegam ao rubro em situações de temperatura ambiente elevada. Desta forma a operação do sistema deve ser realizada com as portas do cubículo onde o retificador está instalado abertas, de forma a aumentar a dissipação do calor. Nessa análise e operação foi concluído que a queima dos fusíveis era acarretada por falta de circulação de ar de forma adequada na sala. A Figura 5 indica os pontos críticos onde ocorreram os problemas no retificador



(a)



(b)

Figura 5. Problemas no retificador.

Os eletrolisadores, dimensionados e construídos especialmente para esta planta apresentaram um desempenho pouco eficiente em termos da produção de hidrogênio, uma vez que ocorreram diversos problemas durante o projeto, como se segue:

- As caixas dos eletrolisadores apresentaram vazamentos nas soldas que causou a necessidade de manutenção e dificultou em muito a entrada do sistema em operação, uma

vez que a desmontagem de todo o equipamento é difícil e trabalhosa. Além disso, por se tratar de solução alcalina concentrada esta é uma operação de risco e de grande potencial de acidentes, sendo necessários todos os cuidados e precauções para realizá-la. Outros vazamentos ocorreram nos seguintes pontos: joelhos e juntas de PVC, do sistema de gases dos eletrolisadores, que precisaram ser substituídas por elementos de aço galvanizado;

- O sistema de controle de nível foi inutilizado, pois os sensores não resistiram à ação do hidróxido de potássio (KOH), foram realizadas substituições nos sensores, mas mesmo essa ação não produziu efeito. Desta forma construiu-se um sistema paralelo para verificação do nível, com mangueiras e controle visual, ou seja, verificação constante pelo operador do nível do eletrólito.
- Sem o controle automático do nível, ficaram sem utilização as válvulas automáticas utilizadas na tubulação de alimentação de H₂O para os eletrolisadores, sendo a realimentação feita com a operação de válvulas manuais.
- Transbordamento do selo d'água foi um problema recorrente. Foram feitas consultas para discussão e solução do problema, foi sugerida a desmontagem para eventual limpeza dos "scrubbers", verificações sobre o nível o eletrólito e solucionamos o problema via procedimento. Para que não haja elevação repentina do nível do eletrólito, causada pela formação rápida de gás, o procedimento operacional deve ser de elevação lenta da corrente para o eletrolisador, ou seja, elevação de 2.000 em 2.000 A a cada 15 minutos.
- As válvulas de drenagem dos eletrolisadores, assim como o sistema alternativo de controle de nível sofrem a ação constante do KOH e apresentam vazamentos que devem ser observados e sanados. A Figura 6 indica alguns dos pontos de vazamento.
- O cromatógrafo SimpleChrom da Cromacon Ciola instalado no laboratório com a função de qualificar o gás produzido foi de difícil operação. Tendo apresentado diversos defeitos e foi sendo em diversas ocasiões submetido a manutenções, inclusive na fábrica, mesmo assim ainda apresenta dificuldades para estabilização e leitura, tendo um funcionamento intermitente. O cromatógrafo em questão não é o instrumento mais indicado para as análises, uma vez que o limite de detecção não atinge na prática os valores necessários para se qualificar um gás hidrogênio com 99,99% de pureza, embora os resultados apresentados sejam semelhantes aos obtidos nas análises realizadas nos laboratórios do CETEC e da UNICAMP. Cabe ainda ressaltar que se trata de um equipamento chave para o processo e cujo funcionamento assegura que as medidas para a correta purificação do gás serão implementadas, além de certificar a qualidade do gás produzido. Para uma maior precisão das análises será necessária a troca do equipamento por um sistema de maior capacidade e melhor qualidade e agilidade nas análises. A Figura 7 mostra o equipamento indicando alguns pontos onde ocorreram problemas.



Figura 6. Problemas nos eletrolisadores: vazamentos de solução e de gás.

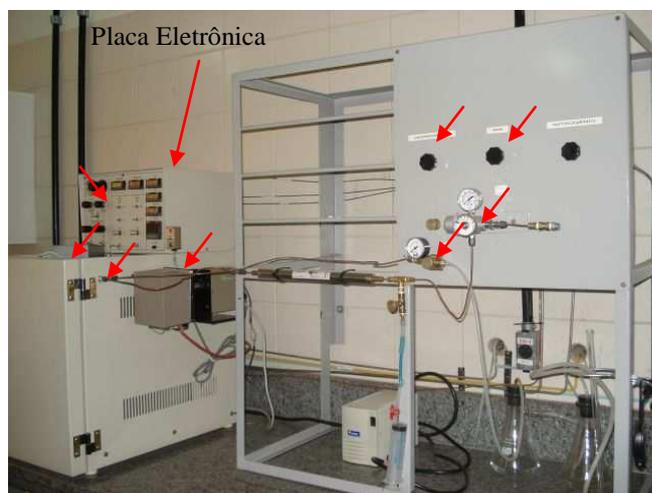


Figura 7. Problemas no cromatógrafo: vazamentos diversos e queima de componentes.

O leito de purificação teve efetivo funcionamento apenas o elemento para reação com oxigênio (paládio) e com sílica-gel para a eliminação de água. A equipe de pesquisa não conseguiu encontrar no mercado produtos químicos apropriados para a eliminação de nitrogênio e traços de carbono. Tais produtos serão necessários para o processo de purificação caso se deseje realmente um gás 4.0 ou acima. Para maiores purezas pode também ser necessário a montagem de um sistema criogênico com finalidade de aumentar a pureza do gás. Nesse caso poderia ser interessante a utilização do sistema pelo gás purificado originário na produção do siste-

ma de reforma, utilizando-se assim o mesmo sistema para as duas linhas de produção. É importante ressaltar que o gás produzido no sistema de eletrólise pode ser usado diretamente na célula a combustível, pois não possui CO em sua composição, mesmo sendo um gás com pureza apenas industrial (98%). O grande interesse em se purificar o hidrogênio neste caso é para dar uma finalidade como insumo químico de alto valor agregado, uma vez que o gás industrial possui um valor de aproximadamente R\$15,00 /m³ e o gás ultra purificado possui o valor na faixa de R\$ 100,00-150,00/m³. Nota-se que o valor agregado é bastante significativo, contudo menor do que as dificuldades de implementações associadas a purificação.

Outro problema que necessitou ser resolvido foi o dimensionamento e a instalação de um banco de capacitores para a correção do fator de potência da instalação. Tal situação onerava bastante a conta de energia do laboratório por demandar muita energia reativa. O fator de potência foi corrigido pela instalação de um banco de capacitor de 110 kVA. Entretanto o mesmo necessitou ser ampliado para uma potência de 170 kVA devido efeito de harmônicos no sistema.

O medidor de energia exclusivo do processo também exigiu diversas paradas, para troca e programação a fim de atender ao processo de medição com objetivo e subsidiar a análise de custos de produção.

C. Eficiências e Custo de Produção

Após todas as adequações que se fizeram necessárias na planta, foi possível:

- Produzir hidrogênio pelo processo de eletrólise (o eletrolisador foi operado por aproximadamente 187 horas durante a execução do projeto);
- O sistema oxigênio (O₂) teve uma eficiência na redução deste contaminante na ordem de 99,5%. Já para o elemento nitrogênio (N₂), a redução da contaminação foi de 26%. No caso de elementos carbônicos detectado na cromatografia na forma de metano (CH₄) a eficiência esteve na faixa de 4,40 à 10,64%. Tal variação ocorreu em função do tipo de zeólita utilizada no sistema de purificação;
- Qualificar o hidrogênio produzido. Através de análises cromatográficas foi possível caracterizar o hidrogênio produzido no laboratório. O teor médio de hidrogênio foi de 99,86% e de contaminantes 0,002% de O₂; 0,132% de N₂; 0,0022% de CH₄. Ensaios no Laboratório de Hidrogênio (IFGW/Unicamp) e no Cetec confirmam os resultados obtidos.
- Analisar o custo do hidrogênio produzido. Nas condições em que o sistema foi operado, obteve-se um custo para o hidrogênio de R\$ 28,56/m³.
- Medir a eficiência elétrica do eletrolisador, que resultou em eficiência média de 48,15%.
- A análise do custo de produção de hidrogênio em US\$/kWh de poder calorífico inferior para o sistema de reforma de etanol, é muito influenciada pela variação dos preços dos combustíveis, responsáveis pelo fornecimento de calor para a reforma. Com os preços fornecidos, o menor custo de produção de hidrogênio ocorre com o uso de eletricidade e etanol, seguido do gás natural, gás liquefeito

de petróleo. Os custos de produção de hidrogênio diminuem com o aumento do período de amortização do investimento e com a diminuição das taxas de juros. Observa-se, também, uma tendência de aumento das diferenças nos custos de produção de hidrogênio, com o reformador operando com eletricidade e etanol e o custo de produção de hidrogênio com o reformador operando com outras fontes de calor e etanol, conforme se aumenta as taxas de juros e com a diminuição do tempo de operação anual do sistema de reforma. O custo de produção de hidrogênio com o reformador operando com eletricidade e etanol é menor que o custo de produção de hidrogênio com o reformador operando com outras fontes de calor (respectivamente, etanol, gás natural e GLP) e etanol nas condições que ocorrem maiores custos ao sistema, com juros de 20% anuais, 5000 horas anuais de operação e *pay-back* 1 ano. Nas análises realizadas o custo de produção de hidrogênio por reforma de etanol ficou na faixa de USD0,431-0,850/kWh [12].

A Tabela II apresenta a situação dos cilindros relacionados com o gás produzido e sua qualificação ao final do projeto.

Tabela II. Conteúdo dos cilindros.

Amostras	Conc. de contaminantes % mol/mol			%Pureza
	O ₂	N ₂	CH ₄	
Cil. 1	0,00183	0,12000	0,00209	99,8761
Cil. 2	0,00150	0,11500	0,00208	99,8814
Cil. 3	0,00180	0,12667	0,00203	99,8695
Cil. 4	0,00086	0,12000	0,00213	99,8770
Cil. 5	0,00079	0,14500	0,00250	99,8517
Cil. 6	0,00101	0,13500	0,00234	99,8617
Cil. 7	0,00295	0,16500	0,00298	99,8291
Cil. 8	0,00119	0,12000	0,00214	99,8767
Cil. 9	0,00309	0,13000	0,00233	99,8646
Cil. 10	0,00200	0,13000	0,00202	99,8660
Cil. 11	0,00128	0,13500	0,00200	99,8617
Cil. 12	0,00323	0,14500	0,00219	99,8496
Cil. 13	VAZIO	VAZIO	VAZIO	-
Cil. 14	VAZIO	VAZIO	VAZIO	-
Cil. 15	VAZIO	VAZIO	VAZIO	-

D. Capacitação

Capacitação da equipe técnica que atua no Laboratório através dos seguintes cursos:

- “Segurança em Instalações e Serviços de Eletricidade- NR 10 Básico”, Escola de Formação e Aperfeiçoamento Profissional (EFAP) da Cemig, 2007;
- “Treinamento Complementar de Segurança na Operação de Processos - NR 13”, EFAP, 2007;
- “Implementação de Metodologia para Análise de Gases e

Procedimentos de Segurança na Operação de Sistemas que Utilizam Hidrogênio”, UNICAMP, 2007.

- Participação em congressos: AGRENER (2006), IV Citenel (2006), WICaC (2006), 1º Encontro Brasileiro de Energia do Hidrogênio (2007), IWFC (2008), *Fuel Cell Seminar & Exposition* (2007) e Workshop de Célula à Combustível (2008), Congresso Internacional de Cooperação Industria Universidade (Unindu, câmara temática de tecnologias de hidrogênio no âmbito ibero-americano).
- Título de Mestrado: “Análise comparativa de sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região Amazônica” defendida por André Luis Furlan em 2008.

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. Pode-se participar de diversos fóruns técnicos, inclusive contribuindo com a experiência da Empresa nesta área dada pelos Projetos de P&D realizados. Além disso, diversos projetos encontram-se em andamento sobre as tecnologia de hidrogênio e espera-se que os resultados sejam agregados ao Laboratório de Hidrogênio, que se torna assim um espaço de demonstração tecnológica. Foi desenvolvida na Empresa competência para projeto, manuseio, segurança e operação de sistema com hidrogênio.

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, além de ter produzido uma dissertação dentro do projeto.

O laboratório encontra-se montado, equipado foi operado experimental dentro do P&D 181 (Código Aneel 0049-135/2005). Os objetivos do projeto na proposta deste P&D foram atingidos. Houve a produção de gás por eletrólise durante aproximadamente 187 horas e produção também por reforma de etanol. Além disso houve também a operação da célula a combustível. O gás produzido por eletrólise possui uma pureza de 99,8% com contaminação de 0,002% de O₂; 0,132% de N₂; 0,0022% de CH₄. Os resultados detalhados para a operação do sistema de reforma podem se encontrar em [19]. Toda a documentação necessária para a operação da instalação em termos de controle, segurança e registros foi realizada. O sistema de purificação foi utilizado obtendo sucesso na redução de oxigênio e água. O custo de produção de hidrogênio por eletrólise alcalina foi de R\$ 28,56/m³. Os grandes problemas enfrentados durante a execução deste projeto foram relacionados com problemas técnicos associados com os equipamentos de eletrólise, de retificação e de análise cromatográfica. Destes, o sistema cromatográfico pode ser indicado como o mais problemático, principalmente em termos de sensibilidades, intermitência, defeitos e falhas de diversas naturezas e dificuldades de assistência técnica pelo fabricante. A instalação é objeto de

visitação de pesquisadores e empresas interessadas em trocar de informações e desenvolvimento tecnológico.

As tecnologias do hidrogênio são uma realidade, com grandes dificuldades a serem enfrentadas, em projetos de maior dimensão, envolvendo ainda equipes multidisciplinares. Entretanto se mostram ainda como uma importante opção para um futuro de médio/longo prazo na constituição do conjunto de soluções para a questão energética mundial.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe de pesquisa do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (IFGW/UNICAMP, Campinas) e da empresa incubada Hytron Assessoria Tecnológica em Energia e Gases Industriais Ltda. pela contribuição na elaboração deste documento.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. S. Peres, E. S. Torres, "P&D181 - Produção de Hidrogênio por processo eletrolítico e reforma de etanol, em alto grau de pureza para utilização como vetor energético no laboratório da UTE Igarapé da CEMIG", Cemig GT SA., Belo Horizonte, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 181, 2005.
- [2] E. S. Torres, C. H. F da Silva, A. M. Carvalho, "P&D 108 - Produção de Hidrogênio através da Reforma de Etanol", Cemig GT SA., Belo Horizonte, Relatório Final, P&D Cemig/Aneel nº 108, 2008.
- [3] M.I. Caires, J. H. Diniz, "P&D 008 - Célula combustível de polímero condutor iônico", Cemig SA., Belo Horizonte, Projeto de Pesquisa Cemig/Aneel nº 008, 2000.
- [4] C. H. F. da Silva, A. M. Carvalho, E. S. Tôres, "Laboratório Experimental para Produção de Hidrogênio e seu Uso como Vetor Energético", in IV Citenel, Araxá, 2007.
- [5] C. H. F da Silva "O estado comercial de células a combustível", Cemig GT AS, Relatório Técnico, 2008.
- [6] Aneel, "Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica", Brasília, 2008.
- [7] C. H. F da Silva, A. J. V. Madureira, "Tecnologias do Hidrogênio dentro do Planejamento Estratégico 2008-2013", Cemig GT SA, TE/AE001/08, 2008.
- [8] Larsen, H, Feidenhans'l, R. Petersen, L. S. Hydrogen and its competitors, Risø National Laboratory, 2004.
- [9] Larsen, H, R. Petersen, L. S. Future Energy Systems – Distributed production and use, Risø National Laboratory, 2005.
- [10] Larsen, H, R. Petersen, L. S. Future options for energy technology, Risø National Laboratory, 2007.
- [11] Larsen, H, R. Petersen, L. S. Renewable energy for power and transport, Risø National Laboratory, 2006.
- [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.
- [14] M. E. Silva, "Manual de Operação e Manutenção do Sistema de Reforma de Etanol", Relatório Técnico, 2006.
- [15] M. E. Silva, "Propostas de melhoria no Sistema de Reforma de Etanol", Relatório Técnico, 2006.
- [16] M. E. Silva, "Análise de custo de produção de hidrogênio em USD/kWh de poder calorífico inferior", Relatório Técnico, 2006.
- [17] M. E. Silva, "Assistência Técnica: Montagem, desmontagem e interligação do sistema de reforma", Relatório Técnico, 2007.
- [18] J. L. A. Garcia, P. F. Palhavan "Relatório 24 Projeto de P&D 181", Relatório Técnico, 2009
- [19] C. H. F. da Silva, A. J. V. Madureira, E. S. Tôres, A. M. Carvalho "Produção de Hidrogênio através de Reforma de Etanol", V Citenel, Belém, 2009.