



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/30  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E GERAÇÃO  
DE ENERGIA EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NA ITAIPU BINACIONAL**

**Marcelo Miguel (\*)  
ITAIPU BINACIONAL**

**Ricardo José Ferracin  
FPTI – FUNDAÇÃO PARQUE  
TECNOLÓGICO ITAIPU - BR**

**Gustavo Riveros  
FPTI – FUNDAÇÃO PARQUE  
TECNOLÓGICO ITAIPU - PY**

**Carina Bonavigo Jakubiu  
FPTI – FUNDAÇÃO PARQUE  
TECNOLÓGICO ITAIPU - BR**

**Helton José Alves  
UFPR – UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO PARANÁ**

**Angel Ambrocio Quispe  
FPTI – FUNDAÇÃO PARQUE  
TECNOLÓGICO ITAIPU - BR**

**RESUMO**

Para que o mundo se torne ambientalmente sustentável, é necessário investir no desenvolvimento de combustíveis que não contribuam para o efeito estufa e o hidrogênio tem sido estudado como uma das alternativas para isso.

A Itaipu Binacional, com apoio técnico do Parque Tecnológico Itaipu em convênio com a Eletrobras, concluiu a instalação de uma Planta de Produção de Hidrogênio - PPH, para armazenamento em cilindros e produção de energia elétrica utilizando células a combustível.

Este trabalho apresenta os dados de projeto da construção, instalação e comissionamento do sistema de produção, purificação, compressão e armazenamento de hidrogênio e operação da PPH.

**PALAVRAS-CHAVE**

Produção de hidrogênio, usinas hidrelétricas, eficiência energética, desenvolvimento sustentável.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O hidrogênio tem sido estudado como uma das alternativas para a substituição dos combustíveis fósseis por ter qualidade e quantidade suficientes. No entanto, apesar de ser o elemento mais abundante no universo, necessita de uma fonte de energia para ser extraído dos compostos químicos aos quais está associado na natureza.

O hidrogênio é considerado um transportador de energia e possui elevada capacidade de armazenamento de energia em massa. As formas mais utilizadas para a produção de hidrogênio são a reforma de combustíveis fósseis e a eletrólise da água. Esse trabalho direciona o estudo da produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, pois é um sistema limpo e o gás produzido é de elevada pureza. A eletrólise da água consiste na quebra da molécula de água em dois gases, hidrogênio e oxigênio, ao ser passada uma corrente elétrica no sistema. O gás hidrogênio produzido pode ser armazenado em cilindros na forma de gás para posterior uso em dispositivos conhecidos como célula a combustível que geram energia elétrica através de uma reação química.

Existem diversos processos para obtenção do hidrogênio. Em usinas hidrelétricas o processo de produção de hidrogênio mais adequado é a eletrólise da água, uma vez que requer somente água e energia. O Brasil e o Paraguai são países com matrizes energéticas predominantemente hidráulicas, facilitando a produção de hidrogênio pela eletrólise da água. A produção de energia elétrica pela Itaipu Binacional é de aproximadamente 98.000 GWh por ano e esta abastece parte do mercado brasileiro e paraguaio.

A motivação técnica principal do projeto é utilizar a energia elétrica produzida pela água que é liberada pelo vertedouro (energia vertida) para a produção de hidrogênio pela eletrólise da água. O gás produzido pode ser utilizado para alimentação de célula a combustível estacionária ou até mesmo ser o combustível de um carro elétrico movido à célula a combustível. Já existem carros elétricos e ônibus em operação na Itaipu e a possibilidade de adaptação de sistema de células a combustível nos mesmos é para um futuro próximo.

A utilização mais intensiva do hidrogênio em células a combustível depende das tendências de mercado. Como a questão ambiental está cada vez mais em pauta por causa dos danos à natureza e à saúde, o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente mais adequadas ganham incentivo e justificativas para investimento, estudo e desenvolvimento.

O armazenamento do hidrogênio produzido se torna mais uma alternativa de armazenamento de energia. O uso do hidrogênio em células a combustível para geração de energia pode ser de forma estacionária e/ou veicular, como mais uma fonte para a geração distribuída.

O aproveitamento desta energia pode aumentar a eficiência energética das usinas, fomentar o desenvolvimento tecnológico, a pesquisa e a inovação, assim como o desenvolvimento regional com a criação de novas unidades de negócio, contribuindo para a segurança energética, para universalização da energia em comunidades isoladas, além de viabilizar a introdução na matriz energética de um combustível totalmente descarbonizado para o desenvolvimento sustentável.

Para que a utilização de hidrogênio como fonte de energia se torne uma realidade, são necessários os esforços para a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação da comunidade científica internacional. A Itaipu Binacional, em conjunto com o Parque Tecnológico Itaipu e a Eletrobras, está se juntando a estes esforços e pretende se preparar para no futuro ser um fornecedor da tecnologia e produção do hidrogênio, tornando este mercado mais uma unidade de negócios.

Com base na experiência e conhecimentos adquiridos, a Planta de Produção de Hidrogênio - PPH é uma unidade de demonstração dessa tecnologia de armazenamento de energia e sua utilização no setor elétrico, visando promover a sua utilização futura em várias concessionárias de energia do setor elétrico e também em outras áreas produtivas.

## 2.0 - OBJETIVO

Este trabalho apresenta os detalhes do projeto de construção da Planta de Produção de Hidrogênio - PPH, principais equipamentos instalados, estrutura de funcionamento e dados preliminares já obtidos, com o objetivo de avaliar todo o processo de produção, purificação, compressão, armazenamento de hidrogênio e sua utilização em células a combustível para fornecimento de energia elétrica para o sistema de iluminação da Planta de Produção de Hidrogênio - PPH.

### 3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Itaipu é a maior usina em geração de energia elétrica do mundo. Desde o início de sua operação comercial, em 1984, vem abastecendo os mercados brasileiro e paraguaio com demandas crescentes de energia.

Apesar de 2013 e 2014 terem sido anos de estiagem, o mais comum é ocorrer excesso de chuvas, o que obriga a Usina a abrir as comportas do vertedouro para liberar água do reservatório, sem que a mesma passe pelas turbinas para a geração de energia elétrica. Isso ocorre porque não existe uma demanda por essa que é chamada de energia vertida turbinável. Para se ter uma noção da quantidade de energia vertida turbinável pela Itaipu Binacional, no ano de 2011 foi de 1152 GWh e em 2012 foi de 1156 GWh. Portanto, foi feita a construção de edifício e instalação de eletrolisador de última geração para utilizar esse excedente de energia.

Na Figura 1 estão fotos da Planta de Produção de Hidrogênio com os equipamentos instalados do sistema de produção, purificação, compressão e armazenamento de hidrogênio, que são: gabinete de controle do transformador de energia de 380 V, gabinete de controle do compressor Sera, gabinete de controle do transformador de energia de 220 V, gabinete de controle do eletrolisador, central de controle para detecção de vazamento de hidrogênio, eletrolisador H2Niditor, sistema para desmineralização de água, sistema para resfriamento de água, compressor Sera, buffer e cilindros para armazenamento. Além destes equipamentos, foi instalada a célula a combustível de 6 kW Mfield.



Figura 1: Fotos dos equipamentos instalados

Para a construção da Planta de Produção de Hidrogênio - PPH e instalação dos equipamentos que compõem o sistema de produção, purificação, compressão e armazenamento de hidrogênio, todas as requisitos das normas ATEX e ISO foram seguidos, além das orientações técnicas da H2Niditor e Hytron, empresas responsáveis pela instalação e comissionamento dos equipamentos, os quais foram adquiridos com recurso financeiro oriundo da Eletrobras. A instalação da célula a combustível de 6 KW foi feita pela empresa Neshy do Brasil.

O recurso financeiro para a construção da Planta Produção de Hidrogênio - PPH foi oriundo da Itaipu Binacional e a construção foi feita sob responsabilidade técnica da Fundação Parque Tecnológico Itaipu.

Cálculos teóricos foram efetuados para dimensionar aspectos importantes da operação da Planta de Produção de Hidrogênio - PPH, como por exemplo, a quantidade máxima de hidrogênio que pode ser armazenada. Foram instalados quatro conjuntos de cilindros, os quais podem operar separadamente, em um total de 46 cilindros com volume hidráulico de 50 l (0,050 m<sup>3</sup>).

A capacidade máxima de armazenamento de hidrogênio é de 800 m<sup>3</sup>, que podem ser comprimidos até a pressão máxima de 350 bar nesses 46 cilindros. Para se calcular a quantidade em massa (kg) de hidrogênio, utilizou-se a

equação dos gases reais. Utilizando os valores de pressão atmosférica (1 bar), temperatura (308 K) e volume de armazenamento de hidrogênio ( $800 \text{ m}^3$ ), obtém-se o valor de 32,3 mols de hidrogênio, que equivale a 64,6 kg.

Em trabalho realizado pelo Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (NUPHI) da Fundação Parque Tecnológico Itaipu em conjunto com o Departamento de Tecnologia de Biocombustíveis da Universidade Federal do Paraná – *Campus* Palotina, dados de eficiência e consumo da célula a combustível de 6 kW tipo PEM instalada na Produção de Hidrogênio - PPH já foram obtidos. Também foi realizado teste preliminar com essa célula a combustível para fornecer energia elétrica para o sistema de iluminação da Planta de Produção de Hidrogênio - PPH. As 21 luminárias anti explosivas instaladas, com consumo aproximado de 70 W cada uma, correspondem a uma potência consumida total de 1470 W. A célula a combustível de 6 kW tipo PEM responde instantaneamente à demanda para o fornecimento de energia elétrica para o sistema de iluminação da planta, tendo acoplados a mesma um inversor e transformador que permitem realizar as conversões e conexões necessárias com o sistema de iluminação da PPH.

Com esses dados e mais a informação técnica do fabricante que a célula a combustível de 6 kW tipo PEM, para produzir 1 kWh (1.000 Wh) consome  $0,752 \text{ m}^3$  de hidrogênio, é possível calcular o consumo de hidrogênio pela mesma para fornecimento de energia elétrica ao sistema de iluminação da Planta de Produção de Hidrogênio conforme descrito a seguir.

Considerando a quantidade de hidrogênio consumida em kg para produção de 1 KWh e considerando a energia produzida em 1 hora de funcionamento da célula a combustível como 1.470 Wh (1,470 kWh) necessária para o sistema de iluminação da PPH, obtém-se que são consumidos  $1,1 \text{ m}^3$  de hidrogênio por hora.

Considerando também as condições de temperatura (308 K), o volume de hidrogênio consumido em 1 hora de funcionamento do sistema de iluminação ( $1,1 \text{ m}^3$ ) e a pressão atmosférica (1 bar) e utilizando-se a equação dos gases reais, calcula-se que a quantidade de hidrogênio consumida pela célula a combustível é de 0,086 kg.

Para dimensionar o quanto isso representa da produção de hidrogênio por hora, deve-se calcular a quantidade de hidrogênio em massa (kg) produzida por hora produzida pela PPH. De acordo com a especificação técnica do eletrolisador, à pressão de 1 bar e temperatura de 273 K ( $0^\circ\text{C}$ ),  $10 \text{ Nm}^3$  é a quantidade prevista de produção, o que equivale a 0,881 kg, utilizando-se novamente para calcular esse valor a equação dos gases reais.

Considerando a temperatura média do verão em Foz do Iguaçu como 308 K ( $35^\circ\text{C}$ ), a quantidade de hidrogênio produzida baixa para 0,780 g, utilizando-se o mesmo método de cálculo (uma diferença de 12%).

Desse modo, considerando que a capacidade máxima de produção é  $10 \text{ Nm}^3$  por hora, o que corresponde a 0,881 Kg de hidrogênio, o consumo de hidrogênio da célula a combustível de 6 kW tipo PEM para fornecer energia elétrica para funcionamento do sistema de iluminação da PPH equivale a 9,8 % da produção de hidrogênio por hora da mesma. Já considerando-se o valor de 0,780 Kg, isso corresponde a 11%.

Nas Figuras 2 e 3 estão os mostrados os resultados dos testes preliminares com dados medidos de corrente elétrica (A) e tensão média e das três fases do transformador (V) respectivamente, obtidos durante a realização de uma operação normal de funcionamento do eletrolisador em sua capacidade máxima de produção.

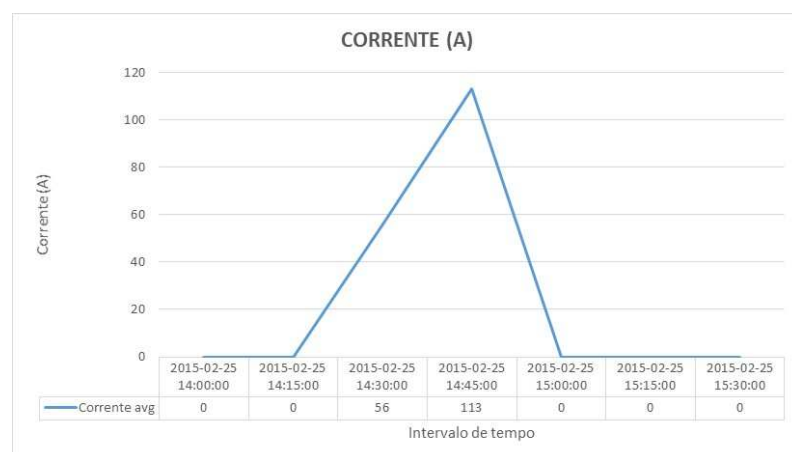


Figura 2: Gráfico da corrente elétrica gerada pelo eletrolisador (A).

A Planta de Produção de Hidrogênio - PPH foi inicialmente inaugurada no dia 18/12/2014 e até o início do mês de março foram feitos testes para ajustes comuns na produção e correção de problemas operacionais. Já foram produzidos aproximadamente 70 kg de hidrogênio e estão programados uma série de ensaios em condições padronizadas para definição da eficiência energética desse processo de produção de hidrogênio por eletrólise e seu uso em células a combustível.

Também foram feitos testes preliminares para avaliar alguns parâmetros elétricos da Planta de Produção de Hidrogênio - PPH utilizando o software PowerView, fornecido pela Shneider Electric, o qual monitora os dois transformadores de energia instalados, sendo um de 380 V e outro de 220 V. O transformador de 380 V fornece energia elétrica em corrente alternada para o sistema de produção de hidrogênio, o qual é transformado em corrente contínua no painel de comando do eletrolisador.

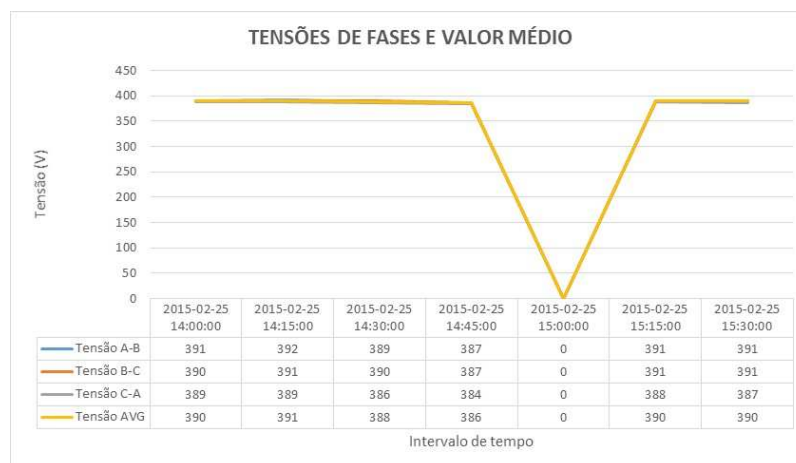


Figura 3: Gráfico da tensão média e das três fases medida do transformador (V).

De acordo com a especificação do eletrolisador, a potência consumida para produzir 10 Nm<sup>3</sup> de Hidrogênio é de 47 kW e corrente de 100 A. Utilizando o valor médio de tensão de 390 V e corrente de 113 A medidos, a potência consumida calculada é de 44 kW.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

A operação da Planta de Produção de Hidrogênio consiste em uma operação simples. Todos os equipamentos funcionam com alto grau de automatização e com extrema segurança, já que se algum dos parâmetros configurados no equipamento não estiver dentro dos valores estabelecidos, o eletrolisador, se estiver em operação, entra em processo de desligamento automático. Caso algum desses parâmetros não esteja correto, o eletrolisador não inicia a produção de hidrogênio até que o parâmetro seja ajustado.

Estão sendo feitos os levantamento de todas as peças internas de todos os componentes do eletrolisador e dos equipamentos acessórios, além da célula a combustível, para elaborar plano de manutenção preventiva, com substituição de peças fornecidas por representantes nacionais quando possível.

Os dados de potência consumida e corrente elétrica gerada estão próximos dos especificados pelo fabricante.

Observa-se a influência significativa da temperatura no rendimento da produção de hidrogênio.

A célula a combustível de 6 kW tipo PEM instalada na PPH funciona corretamente e pode fornecer energia elétrica para 285 luminárias de 70 W, considerando sua potência máxima de produção de energia elétrica (6 kW).

O projeto desenvolvido na área de hidrogênio desenvolvido pela Itaipu Binacional, Eletrobras e Fundação Parque Tecnológico Itaipu tem por finalidade aumentar a capacidade de geração de energia elétrica da Itaipu, principalmente ao utilizar seu excedente de energia, cuja tecnologia pode e deve ser utilizada por outras concessionárias do setor elétrico.

## 5.0 - AGRADECIMENTOS

Às entidades ITAIPU BINACIONAL, Eletrobras, Fundação Parque Tecnológico Itaipu, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Universidade Oeste do Paraná e Universidade Federal do Paraná, bem como seus representantes, pelo apoio e suporte no desenvolvimento do trabalho aqui apresentado.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEMER, P. M. U.S. Department Of Energy (Comp.). Hydrogen and Fuel Cells Program: Priority Research Areas for Hydrogen Production, Storage and Fuel Cells. Disponível em: <<http://www.hydrogen.energy.gov/science.html>>. Acesso em: 27 mar. 2013.

Dos SANTOS, F. M. S. M.; Dos SANTOS, F. A. C. M.. O COMBUSTÍVEL "HIDROGÊNIO". Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millennium/millennium31/15.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

ENERGIAS Renováveis: Hidrogênio. Disponível em: <<http://www.lamtec-id.com/energias/hidrogenio.php>>. Acesso em: 27 mar. 2013.

GARCIA, J. L. A. Produção de Hidrogênio Eletrolítico Utilizando Energia Secundária e seu uso como Vetor Energético. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia, XV, 1999, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, 1999.

GASEOUS EQUATION OF STATE CALCULATOR. Disponível em: <<http://antoine.frostburg.edu/chem/senese/javascript/realgas.shtml>>. Acesso em: 08 mar.2015.

GELLER, H. S. O Uso eficiente da eletricidade: uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: INEE, 1994.

GOMES NETO, E. H.. Hidrogênio, evoluir sem poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. 240p. Curitiba, PR: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005.

JARDINI, J. A. et al. Alternativas não convencionais para transmissão de energia elétrica: estado da arte. 447p. ISBN.978-85-85041-04-2, pg284.Brasília, 2011.

LABORATÓRIO de Hidrogênio (LH2): O hidrogênio como vetor de energia. Disponível em: <<http://portal.ifi.unicamp.br/br/dfa/lh2>>. Acesso em: 08 abr. 2013.

LIU, H., ALMANSOORI, A., FOWLER, M., ELKAMEL, A. Analysis of Ontario's hydrogen economy demands from hydrogen fuel cell vehicles; International Journal of Hydrogen Energy, 34, 2012, p.8905–8916.

PADILHA, J. C. et al. An evaluation of the potential of the use of wasted hydroelectric capacity to produce hydrogen to be used in fuel cells in order to decrease CO<sub>2</sub> emissions in Brazil. Elsevier: International Journal of Hydrogen Energy 34, 2009.

PINTO, C. da S. et al. Itaipu hydroelectric power plant and its experimental hydrogen production unit. 69p. (Especificação técnica: esp-002/07) Foz do Iguaçu, PR: International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems - 22ND ECOS, 2009.

RIFKIN, J.. A Economia do Hidrogênio: a criação de uma nova fonte de energia e a redistribuição do poder na Terra. 300p. São Paulo, SP: M. Books do Brasil LTDA, 2003.

SANTOS JÚNIOR, A. C. F.. Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio: estudo de caso na Itaipu. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SÓRIA, M. A. Z. et al. Dams & The World's Water. CIGB – Commission Internationale des Grands Barrages. Paris, 2008.

SOUTO, J. J. de N. Estruturação da economia do hidrogênio no Brasil In: Brasil Fuel Cell Expo/Seminar 2007: Curitiba, 2007.

SOUZA, S. N. M. de Aproveitamento da Energia Hidroelétrica Secundária para Produção de Hidrogênio Eletrolítico. 1998. 192p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

WORLD ENERGY COUNCIL. Energy for Tomorrow's World – Acting Now!. World Energy Council. Londres: 2000.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo Miguel é engenheiro sênior da Itaipu Binacional, graduado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, mestre em engenharia de produção pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, especialista em eficiência energética pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI e em gestão da qualidade e produtividade pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE.

Ricardo José Ferracin é Gerente do Projeto Hidrogênio Itaipu/Elektrobras e Professor na Universidade do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Bacharel, Mestre e Doutor em Química pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCar e Especialista em Gestão de Projetos e Pessoas pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC/PR.

Gustavo Riveros, Doutor e Mestre em Planejamento Energético pela UNICAMP, Bolsista de Pesquisa na Fundação Parque Tecnológico Itaipu – PY.

Carina Bonavito Jakubiu possui graduação em tecnologia em controle de processos químicos pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Helton José Alves é Professor Adjunto e Vice-Diretor do Setor Palotina da UFPR, graduado em química pela Universidade Estadual de Maringá – UEM, mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, e Doutor em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

Angel Ambrocio Quispe é aluno do curso de Engenharias Renováveis da Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA e Bolsista de Pesquisa da Fundação Parque Tecnológico Itaipu -BR.