

---

# P197 - Unidade Integrada de Produção Industrial de Hidrogênio por Reforma de Gás Natural - Ciclo 2014/2015

Andrea A. Ferreira<sup>1</sup>; Maria Teresa V. Barbosa<sup>1</sup>; Antonio J. Marin Neto<sup>2</sup>;  
Cristiano S. Pinto<sup>2</sup>; Diego V. P. Cambra<sup>2</sup> & Daniel G. Lopes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Comgás

<sup>2</sup> Hytron

**Resumo** - Este trabalho descreve o desenvolvimento que culminou na análise técnica e econômica da tecnologia Hytron de reforma de gás natural integrada com um sistema de purificação PSA (*Pressure Swing Adsorption*), adequada à produção de hidrogênio ultrapurificado. A análise técnica do sistema de produção de hidrogênio, com capacidade nominal de 20 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub> 5.0, apurou, como principais indicadores de desempenho, o consumo específico de gás natural de 0,424 Nm<sup>3</sup> GN / Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> e o consumo específico de eletricidade de 0,418 kWh / Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. A eficiência termoquímica verificada foi de 78,90%, enquanto sua eficiência global foi de 71,57%, valor que representa 94,2% do limite termodinâmico calculado a partir do modelo desenvolvido. Do ponto de vista econômico, o hidrogênio gerado apresenta custo de 2,570 R\$/m<sup>3</sup>, considerando a tarifa industrial, classe 1, para o gás natural. Este valor é bastante competitivo dentro do mercado nacional para este tipo de gás.

Palavras-chave: hidrogênio; gás natural; reforma-vapor; *pressure swing adsorption*

## Introdução

O mercado consumidor de hidrogênio pode ser atendido de duas principais formas: através de cilindros pressurizados ou através da produção local deste insumo (também denominada geração *on-site*). No Brasil, a forma predominante de fornecimento é aquela que faz uso de cilindros pressurizados, sejam eles de pequeno porte (até 10 Nm<sup>3</sup> de produto, para utilizações tipicamente laboratoriais) ou de grande porte (utilizando *trailers* com até 5.000 Nm<sup>3</sup> de capacidade).

As utilizações de maior porte sofrem com altos custos logísticos, visto que pouco mais de 1% da massa rebocada pelo caminhão diz respeito ao produto propriamente dito. Aliado a isto, os consumidores de hidrogênio estão cada vez mais distantes dos centros de produção existentes.

Além disso, hoje não existem alternativas

economicamente viáveis para a produção local de hidrogênio em capacidades abaixo de 500 Nm<sup>3</sup>/h. Este fato se deve, principalmente, à indisponibilidade tecnológica no mercado nacional.

Dentre as rotas tecnológicas existentes para a produção local de hidrogênio, a reforma de gás natural é aquela que apresenta a maior economicidade, o que se deve ao baixo custo do gás natural frente aos insumos convencionais aplicáveis à produção de hidrogênio.

Neste contexto, existe um grande potencial de disseminação da tecnologia de reforma de gás natural dentro do parque industrial brasileiro consumidor de hidrogênio, em especial onde já há atendimento pela rede de gás natural.

Este trabalho descreve o desenvolvimento que culminou na análise técnica e econômica da tecnologia Hytron de reforma de gás natural integrada com um sistema de purificação PSA (*Pressure Swing Adsorption*), adequada à produção de hidrogênio ultrapurificado.

Com base nas premissas técnicas desenvolvidas para a otimização energética do processo de produção de hidrogênio purificado, foram realizadas as alterações necessárias no sistema de reforma-vapor de gás natural, ajustando suas condições operacionais do sistema e sua filosofia de controle.

A integração do reformador ao sistema de purificação também foi realizada pela equipe Hytron, de forma a conferir à unidade integrada de produção de hidrogênio funcionamento seguro, autônomo e eficiente.

O projeto originou uma unidade integrada demonstrativa de produção de hidrogênio a partir da reforma-vapor de gás natural com capacidade nominal de 20 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub>. O produto possui pureza nominal de 99,999% (padrão 5.0), podendo alcançar até o padrão 6.0.

## Desenvolvimento

Os itens a seguir descrevem os principais subsistemas da unidade integrada de produção de hidrogênio, com foco na composição e filosofia de funcionamento implantadas para o desenvolvimento de um sistema nacional destinado à produção local de hidrogênio.

### A. Subsistema de Reforma-Vapor de Gás Natural

O reformador faz uso de tecnologia proprietária de reforma-vapor de gás natural, que é previamente tratado para a remoção de odorificantes através do uso de peneiras moleculares. Ao forno reformador estão integrados, pelo circuito de gás de reforma, dois reatores de *shift*, para o pós-processamento do monóxido de carbono (CO) oriundo do reator endotérmico. O primeiro reator de *shift* opera em temperatura intermediária (330°C) enquanto o segundo opera a baixa temperatura (250°C), garantindo baixos teores residuais desta espécie química e maximizando a produtividade da unidade integrada.

O circuito de gás de reforma possui etapas de recuperação térmica, e dizem respeito ao economizador existente para a geração de vapor demandado pelo próprio processo de reforma. Entretanto, ao longo do circuito de gás

de combustão estão posicionados trocadores consecutivos para pré-aquecimento e adequação da temperatura dos insumos do processo. Esta integração configura a coluna HRSG (*Heat Recovery Steam Generation*) do sistema de reforma.

### B. Subsistema de Purificação de Hidrogênio

A tecnologia PSA de purificação faz uso de 09 colunas adsorvedoras integradas e controladas através do acionamento do conjunto de duas válvulas rotativas multivias, tecnologia proprietária da empresa *Xebec*.

Além da corrente de hidrogênio ultrapuro oriunda do sistema PSA, com pureza final nominal de 99,999% (padrão 5.0), a etapa de purificação gera também uma corrente de gás residual e de baixa pressão (*raffinate*). Esta é reutilizada como o combustível principal do forno reformador. Este arranjo permite a redução dos custos operacionais da unidade, uma vez que minimiza o consumo específico de gás natural e controla a composição do efluente aéreo do sistema.

Uma vista da unidade demonstrativa de produção de hidrogênio está presente na Figura 1.



**Figura 1** – Unidade integrada de produção de hidrogênio ultrapuro

## Resultados

O desenvolvimento proposto foi alcançado após 28 versões de *software* de controle do subsistema de reforma-vapor de gás natural, e 11 versões para o *software* de controle da unidade integrada de produção de hidrogênio.

A análise técnica da unidade integrada apu-

---

rou os seguintes indicadores de desempenho:

- Consumo Específico de Gás Natural:  $0,424 \text{ Nm}^3 \text{ GN} / \text{Nm}^3 \text{ H}_2$ ;
- Consumo Específico de Água:  $1,85 \text{ L H}_2\text{O} / \text{Nm}^3 \text{ H}_2$  (desconsiderando-se a recuperação e reuso do condensado);
- Consumo Específico de Eletricidade:  $0,418 \text{ kWh} / \text{Nm}^3 \text{ H}_2$ ;
- Consumo de Nitrogênio:  $5,5 \text{ Nm}^3$  (por ciclo completo de partida e desligamento).

Do ponto-de-vista energético, a eficiência termoquímica verificada para o sistema foi de 78,90%, considerando unicamente a razão entre a quantidade de hidrogênio produzido e a quantidade de gás natural consumido.

A análise de eficiência energética global, considerando também o *input* elétrico demandado pelo processo e suas utilidades, revelou eficiência de 71,57%, quando considerada a demanda elétrica média de 5 kW.

Considerando-se o valor obtido pelo modelo termodinâmico desenvolvido e utilizado para determinação da eficiência energética do processo, a saber, 75,9%, o resultado demonstrado alcançou 94,2% do limite termodinâmico calculado, o que denota não somente um adequado modelo termodinâmico estabelecido, como também um projeto executivo e de integração eficiente.

A análise econômica do sistema mostrou que o custo final do hidrogênio ultrapuro é de  $2,570 \text{ R\$/m}^3$ . Os principais contribuintes para esse valor são respectivamente o custo do gás natural (OPEX), da PSA importada (CAPEX), do reformador (CAPEX), de manutenção do sistema, eletricidade e água (OPEX). Essa melhor aferição foi possível no período de extensão do projeto.

## Conclusões e Contribuições

O sucesso demonstrado pelo desenvolvimento deste projeto, e após verificação temporal da estabilidade dos resultados alcançados (que determinarão os fatores de disponibilidade e confiabilidade reais), permitirá que as principais aplicações para o hidrogênio

possam ser atendidas com tecnologia nacional e o uso de gás natural.

Dentre estas aplicações destacam-se a hidrogenação e recuperação de óleos e gorduras (vegetais, animais e minerais), a produção de atmosferas sintéticas em processos metalúrgicos, produção de vidro temperado (composição de atmosferas sintéticas), produção de especialidades químicas e fármacos, além das aplicações energéticas do hidrogênio, incluindo Estações de Abastecimento Veicular.

Além dos valores calculados para o custo do hidrogênio produzido, o consumo específico de eletricidade apresentado traz nele embutido uma vantagem do processo de reforma desenvolvido sobre o processo de eletrólise da água, outra possível rota para a produção de hidrogênio.

Na eletrólise da água há o consumo de eletricidade para a dissociação da água em seus componentes (hidrogênio e oxigênio). Embora mais simples de se descrever, os sistemas de eletrólise da água possuem consumos específicos de eletricidade de  $5,0$  a  $6,0 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ H}_2$ , portanto, de 14 a 17 vezes mais eletrointensivos que o sistema demonstrado neste projeto.

Esta característica possui influência direta sobre a viabilidade econômica destes processos concorrentes para produção de hidrogênio, com desvantagem do processo eletrolítico, o qual faz uso de um insumo (eletricidade) com valor agregado muito superior ao do gás natural.

Considerando-se o consumo nominal de gás natural como igual a  $7,6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , e o intervalo de pressão útil das cestas de GNC (forma de suprimento da unidade demonstrativa), pode-se verificar que cada uma das duas cestas existentes é capaz de prover uma autonomia operacional de 8,5 horas.

Para operação da unidade em maiores horizontes temporais, ou para exploração pré-comercial da unidade demonstrativa, considera-se fundamental prover uma estratégia de abastecimento diferente da atual, isto é, através da rede de gás natural local, o que se destaca como um dos principais pontos de atenção para a continuidade do desenvolvimento deste projeto e sua implementação comercial.