

Produção de hidrogênio (Power to Gas) e suas aplicações na matriz energética

Hélio Nunes Souza filho (UNICAMP) - eng.hsnunes@gmail.com

Ana Beatriz Barros Souza (UNICAMP) - ana_bbeatriz@hotmail.com

Ennio Peres da Silva (UNICAMP) - lh2ennio@ifi.unicamp.br

Demostenes Barbosa da Silva (Instituição - a informar) - demostenes.silva@basengenharia.com.br

Diogo Oliveira Barbosa da Silva (BASE Energia) - diogo.silva@basengenharia.com.br

Juarez Corrêa Furtado (UNICAMP) - juarez_furtado@yahoo.com.br

Vitor Feitosa Riedel (Unicamp) - vitor.friedel@gmail.com

Resumo:

Resumo. Nos últimos anos há um aumento da participação das fontes intermitentes (eólica e solar) na matriz energética em diversos países e no Brasil. Esse novo contexto promove a descarbonização na matriz energética, o aumento da capacidade de produção de energia elétrica, ocasionando períodos de baixos preços de eletricidade e oferecendo uma oportunidade para o desenvolvimento de processos eletrointensivos flexíveis. O uso de medidas operacionais apropriadas relacionadas com a integração da rede elétrica existente e o mercado energético possibilita o desenvolvimento de processos denominados Power to Gas (PtG), que promove a conversão do excedente de eletricidade para outros transportadores de energia e produtos químicos úteis, dentre eles o hidrogênio, que pode ser obtido a partir da eletrólise da água. Atualmente as principais tecnologias de produção de hidrogênio eletrolítico são: alcalina, membrana de troca de prótons (PEM) e óxido sólido (SOEC). A eletrólise alcalina é uma tecnologia madura e amplamente utilizada na indústria. A eletrólise PEM encontra-se em fase inicial de comercialização, enquanto a SOEC ainda é usada em menor escala em projetos de pesquisa e demonstração. Nesse contexto, esse artigo faz uma síntese do atual estado da arte da tecnologia de produção de hidrogênio eletrolítico, analisando sua posterior injeção em tubulações de gás natural existente no Brasil. Essa análise é feita também em relação aos projetos desenvolvidos em outros países, mostrando as vantagens e as desvantagens do caso brasileiro em relação aos demais. Por fim, apresenta-se uma simulação de uma planta solar fotovoltaica e as relações entre a eletricidade produzida, a quantidade de hidrogênio gerada e as vazões que podem ser injetadas em algumas redes de gás natural existentes, desde que autorizadas pela Agência Nacional do Petróleo – ANP

Palavras-chave: *Palavras-chave: Energia Solar, Hidrogênio, Power to Gas.*

Área temática: *Outras fontes renováveis de energia*

Subárea temática: *Marés, ondas e outras fontes renováveis*

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (POWER TO GAS) E SUAS APLICAÇÕES NA MATRIZ ENERGÉTICA

Ana Beatriz Barros Souza – ana_bbeatriz@hotmail.com

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Ennio Peres da Silva – lh2ennio@ifi.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético

Demostenes Barbosa da Silva – demostenes.silva@basengenharia.com.br

Base Energia Sustentável

Diogo Oliveira Barbosa da Silva – diogo.silva@basengenharia.com.br

Base Energia Sustentável

Hélio Nunes de Souza Filho – eng.hsnunes@gmail.com

Juarez Corrêa Furtado Júnior – juarez_furtado@yahoo.com.br

Vitor Feitosa Riedel – vitor.riedel@basengenharia.com.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Resumo. Nos últimos anos há um aumento da participação das fontes intermitentes (eólica e solar) na matriz energética em diversos países e no Brasil. Esse novo contexto promove a descarbonização na matriz energética, o aumento da capacidade de produção de energia elétrica, ocasionando períodos de baixos preços de eletricidade e oferecendo uma oportunidade para o desenvolvimento de processos eletrointensivos flexíveis. O uso de medidas operacionais apropriadas relacionadas com a integração da rede elétrica existente e o mercado energético possibilita o desenvolvimento de processos denominados Power to Gas (PtG), que promove a conversão do excedente de eletricidade para outros transportadores de energia e produtos químicos úteis, dentre eles o hidrogênio, que pode ser obtido a partir da eletrólise da água. Atualmente as principais tecnologias de produção de hidrogênio eletrolítico são: alcalina, membrana de troca de prótons (PEM) e óxido sólido (SOEC). A eletrólise alcalina é uma tecnologia madura e amplamente utilizada na indústria. A eletrólise PEM encontra-se em fase inicial de comercialização, enquanto a SOEC ainda é usada em menor escala em projetos de pesquisa e demonstração. Nesse contexto, esse artigo faz uma síntese do atual estado da arte da tecnologia de produção de hidrogênio eletrolítico, analisando sua posterior injeção em tubulações de gás natural existente no Brasil. Essa análise é feita também em relação aos projetos desenvolvidos em outros países, mostrando as vantagens e as desvantagens do caso brasileiro em relação aos demais. Por fim, apresenta-se uma simulação de uma planta solar fotovoltaica e as relações entre a eletricidade produzida, a quantidade de hidrogênio gerada e as vazões que podem ser injetadas em algumas redes de gás natural existentes, desde que autorizadas pela Agência Nacional do Petróleo – ANP.

Palavras-chave: Energia Solar, Hidrogênio, Power to Gas.

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que 69 % das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEEs) no mundo sejam provenientes da queima de combustíveis fósseis, o que evidencia a importância da questão energética na mitigação do aquecimento global (Blanco,2014).

Analisando o cenário nacional, onde a matriz elétrica é predominante renovável e sustentada na maior parte pela fonte hidráulica, o consumo de energia elétrica per capita vem crescendo acima da evolução do PIB, elevando a intensidade energética da economia brasileira em torno de 2 % ao ano. Na ausência de melhorias em eficiência energética, esta demanda crescente tem sido sustentada também por uma ampliação das fontes térmicas não-renováveis (principalmente gás natural), em um processo de carbonização da matriz elétrica brasileira. A média diária de produção de gás natural do ano 2016 foi de 109,9 milhões de m³.dia⁻¹ e o volume de gás natural importado foi de 29,4 milhões de m³.dia⁻¹. Com isto, a participação na matriz energética nacional atingiu o patamar de 12,9 % (EPE,2017).

Apesar da diminuição da participação relativa da geração a partir de fonte hidráulica, esta fonte ainda responde por 60,26 % da capacidade de potência instalada, enquanto outras fontes renováveis de energia, como eólica e solar fotovoltaica, apresentam uma fatia do mercado de 9,2 % e 1,3 %, respectivamente (ANEEL,2019). Em relação ao crescimento da oferta no último ano, essas fontes obtiveram um crescimento significativo na participação na capacidade instalada de geração, de 26,5 % na geração eólica e 875 % na geração fotovoltaica (EPE,2017).

Com o aumento da participação de energias renováveis com maiores variações de produção diárias e sazonais, prevê-se que um excesso substancial de eletricidade que será gerado quando a produção exceder a demanda, podendo proporcionar a instabilidade nos sistemas de transmissão de eletricidade, a menos que sejam aplicadas medidas preventivas que proporcionem a segurança do sistema. Uma dessas medidas refere-se aos processos denominados

Power-to-gas (PtG), que promovem a conversão do excedente de eletricidade para outros transportadores de energia e produtos químicos úteis, dentre eles o hidrogênio (Aryal e Pedersen, 2017).

Para esse gás, existem três tipos principais de tecnologias de eletrólise da água: alcalina, membrana de troca de prótons (PEM) e óxido sólido (SOEC). A eletrólise alcalina é uma tecnologia madura e amplamente utilizada na indústria. A eletrólise PEM encontra-se em fase inicial de comercialização, enquanto a SOEC ainda é usada em menor escala em projetos de pesquisa e demonstração (Aryal e Pedersen, 2017).

Este artigo propõe a interação entre as infraestruturas de eletricidade e gás natural, projetando uma usina fotovoltaica (UFV), que estará interligada à rede de energia elétrica, que tanto suprirá a demanda dos eletrolisadores quanto a rede de distribuição. O hidrogênio eletrolítico será injetado em um gasoduto de gás natural e serão verificadas as mudanças no Poder Calorífico Superior (PCS) e no Índice de Wobbe (IW) da mistura do gás, conforme mostra a Fig.1.

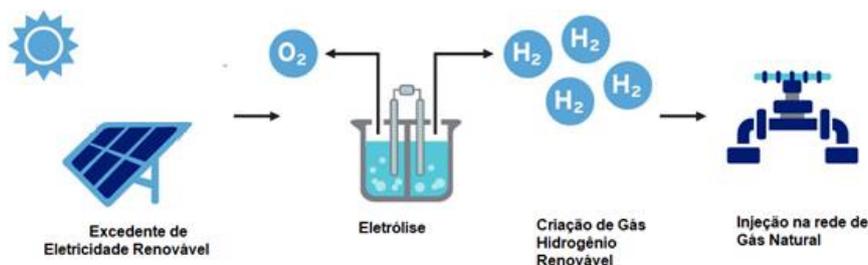


Figura 1-Esquema do processo

Fonte: <<https://www.socalgas.com/smart-energy/renewable-gas/power-to-gas>>

Dentre os parâmetros utilizados para as especificações necessárias do gás natural distribuído no Brasil, descritos na Norma Brasileira NBR 15.213, pode-se calcular as propriedades físico-químicas a partir da composição do gás, dentre os quais os citados PCS e IW, conforme Equação 1 e Equação 2 (ABNT, 2005).

$$PCS = \sum_{j=1}^N = x_j \times PC \quad (1)$$

$$IW = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

Onde: PCS é o poder calorífico superior do gás real em base volumétrica; e x_j é a fração molar do componente j ; W é o índice de Wobbe do gás real e d é a densidade relativa do gás real. Segundo essa NBR, o PCS é a quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante, enquanto o IW expressa a relação entre o PCS e a densidade relativa do gás (ABNT, 2005).

A norma da Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural ANP N° 16 (2008) estabelece os limites desses dois parâmetros: 35,00 a 43,00 MJ.m⁻³ para o PCS e 46,50 a 53,50 MJ.m⁻³ para o IW e. Estes índices são os principais parâmetros para a permutabilidade de gases combustíveis e suas faixas permitidas são especificadas para o fornecimento de gás e serviços de transporte, de acordo com as regras específicas do país e padrões internacionais de rede (ANP,2008). Esta norma, que estabelece a especificação do gás natural comercializado no país, não especifica a quantidade permitida de gás hidrogênio, de forma que esse gás, em princípio (há necessidade de se verificar as características da tubulação de gás, válvulas, compressores etc.), pode ser acrescentado ao gás natural, desde que não altere os indicadores citados. A partir dos dados referentes à vazão m³.h⁻¹ de gás natural pela ANP de 2016, é proposto um cenário de produção de 413.640 m³.dia⁻¹ de hidrogênio, equivalente a 5 % da vazão diária de gás natural, 8.272,8 m³.dia⁻¹, em seguida esse valor é dividido pelo número de horas de injeção na rede, obtendo um valor da vazão constante, 413.640 / 24 = 17.235 m³.h⁻¹. Considerou-se esse um valor mínimo, uma vez que ainda será necessária a criação de normas específicas no país para regular tal matéria.

Após essa injeção de hidrogênio, utilizando-se as Equações 1 e 2 calculou-se as alterações do PCS e do IW na rede de gás natural, mostradas na Fig. 2.



Figura 2 - Poder Calorífico Superior e Índice de Wobbe. Fonte: Elaborado pelo autor.

O intervalo de IW definido por especificações técnicas que limita a flutuação da composição que pode ser permitida, não requer intervenções técnicas nos dispositivos conectado à rede (Guandalini *et. al.* 2017). Assim, a injeção de hidrogênio oferece mais desafios em termos de impacto na operação da rede e nos clientes. De fato, o hidrogênio volumétrico, térmico e químico possuem propriedades que diferem fortemente das espécies típicas do gás natural (Guandalini *et. al.* 2017). De qualquer forma, pode-se concluir que o percentual de hidrogênio considerado, 5% em volume, manteve os dois parâmetros dentro do que está especificado pela norma da ANP.

2. ESTUDO PROPOSTO

O gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL), que é administrado pela Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG), com 2.593 km de extensão, transporta o gás natural que vem da Bolívia até o mercado brasileiro, passando por 136 municípios em cinco estados: Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (TBG, 2019).

O local escolhido para a instalação do empreendimento considerado nesse trabalho é no município de Campo Grande/MS, que possui diversos fatores que o viabiliza: a sua localização geográfica e sua irradiação solar média de 5,02 kWh.m⁻².dia⁻¹ para o plano inclinado e a irradiação solar para o plano inclinado com angulação igual à latitude tem um valor de 5,22 kWh.m⁻².dia⁻¹, o qual foi utilizado no cálculo, demonstrado na Figura 3 (TBG, 2019).

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
☑	Piano Horizontal	0° N	5,63	5,64	5,30	4,80	4,03	3,76	3,92	4,81	4,93	5,43	5,91	6,10	5,02	2,34
☑	Ângulo igual a latitude	20° N	5,14	5,40	5,42	5,34	4,84	4,70	4,81	5,57	5,20	5,30	5,45	5,48	5,22	,87
☑	Maior média anual	19° N	5,18	5,42	5,42	5,32	4,81	4,66	4,78	5,54	5,20	5,32	5,48	5,52	5,22	,88
☑	Maior mínimo mensal	26° N	4,92	5,24	5,36	5,41	4,99	4,90	5,00	5,69	5,19	5,18	5,23	5,22	5,19	,79

Figura 3- Irradiação solar para a região de Campo Grande/MS. Fonte: CRESESB (2019)

A UFV proposta está situada na Latitude: 20° 26' 34" Sul e Longitude: 54° 38' 47" Oeste. A partir dos dados descritos anteriormente, é proposto um cenário de produção de 413.640 m³.dia⁻¹ de hidrogênio, equivalente a 5 % da vazão diária de gás natural. Como a UFV e os eletrolisadores estão conectados à rede, estes últimos podem operar 24 horas por dia, produzindo hidrogênio a uma pressão de saída específica do trecho e vazão constante de 17.235 m³.h⁻¹. Após a produção, o hidrogênio é armazenado em tanques com pressão variável, possibilitando a sua injeção no gasoduto, antes da estação de compressão, utilizando a estrutura já disponível no próprio do gasoduto.

3. RESULTADOS

Os painéis utilizados para a geração de energia elétrica através da fonte solar são de p-Si, da marca Global Brasil, com 330 Wp de potência, eficiência de 16 % e área de 1,9 m². O eletrolisador escolhido apresenta um consumo médio de 5,4 kW.h⁻¹ para cada m³ de hidrogênio produzido.

A UFV suprirá a demanda energética imediata dos eletrolisadores e seu excedente de geração será injetado na rede, sendo recuperado nos horários onde a produção solar não é suficiente, mantendo a produção constante de gás.

O consumo diário dos eletrolisadores será de: $17.235 \times 5,4 \times 24 = 2.233.656$ kWh

A produção diária média de eletricidade de cada painel fotovoltaico será: $330 \times 5,22 = 1,7$ kWh

Portanto, o número de painéis requeridos será: $2.233.656 / 1,7 = 1.313.916$ painéis e a potência total da planta $1.313.916 \times 330 = 43,5$ MWp.

A área a ser ocupada dependerá do arranjo a ser utilizado, sendo usual haver um espaçamento entre as linhas de painéis. Apenas como referência, adotando-se 1 ha para cada 1 MWp, a área a ser ocupada será de 44 ha.

4. CONCLUSÃO

No caso analisado, a inclusão de 5 % de hidrogênio na rede de gás natural GASBOL, houve diferenças no PCS e no IW do gás transportado, mas dentro das especificações estabelecidas nas normas. Para efeito de comparação, a quantidade máxima de hidrogênio que pode ser injetada em um volume de gás natural em outros países ainda não possui um consenso, variando em função do padrão de qualidade do gás natural para os equipamentos de uso final. Por exemplo, na França é permitido um máximo de 6 % de H₂ por volume na rede de distribuição de gás, enquanto na Holanda permite-se 12 %, respectivamente (Guandalini *et. al.* 2017).

Com relação à planta solar fotovoltaica necessária para a inclusão de 5 % de hidrogênio no GASBOL, chegou-se a uma área de aproximadamente 44 ha. Dessa forma, observando-se que ainda há margem para aumentar o teor de hidrogênio sem comprometer os limites do PCS e do IW do gás transportado.

Portanto, o problema do uso direto de hidrogênio na rede de gás natural existente está relacionado a sua concentração nas tubulações, pois as mesmas foram projetadas para transportar apenas gás natural. Com a inclusão de hidrogênio na rede, existe a possibilidade de afetar a integridade dos dutos de distribuição e o desempenho de equipamento de uso final. Por outro lado, a diminuição do uso de fontes emissoras de GEE, como o gás natural, que emite $490 \text{ gCO}_2.\text{kWh}^{-1}$ (IPCC,2014), caso seja utilizado na geração de energia, com a inclusão de percentuais de volume de hidrogênio respeitando as condições de segurança, contribuiria para a descarbonização da matriz energética nacional. Para isso seria necessário mudanças nas normas vigentes e adequações da infraestrutura existente de gasodutos e equipamentos de uso final no país.

Agradecimentos

Os autores desejam expressar seu agradecimento a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Base Energia Sustentável e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pelo suporte e apoio financeiro para a realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

BLANCO *et. al.* (2014). Drivers, Trends and Mitigation. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.

Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 351–412.

EPE, Empresa de Pesquisa Energéticas. (2017a). Balanço Energético Nacional 2017 - Ano base 2016. Rio de Janeiro.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, BIG - Banco de Informações de Geração, 2019. Disponível em

<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>

ARYAL N; PEDERSEN R. Gas conditioning and grid operation. Technologies and-status of methanation of biogás.

Journal Future Gas, 2017.

ABNT, NBR 15213:2005: Cálculo do poder calorífico, densidade, densidade relativa e índice de Wobbe de combustíveis gasosos a partir da composição, Brasil, 2005, 44p;

ANP, Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural, RESOLUÇÃO ANP Nº 16, 2008, 3p.

GUANDALINI, G.; COLBERTALDO, P.; CAMPANARI, S. Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines in presence of hydrogen injections. Applied Energy, v. 185, p. 1712–1723, 2017.

TBG, Transportadora Brasileira gasoduto Bolívia-brasil S.A. Guia de Convivência. Disponível em

<<http://www.tbg.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C9FA42944514ED601446955B82D64>>.

CRESESB, “CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica,” 2014. Disponível em:

<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>.

PEREIRA, E., Martins, F., Costa, R., Gonçalves, A., Lima, F., Rüther, R., de Souza, J. (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2 a Edição.

ANP, Agência Nacional de Petróleo e Gás, Natural, Vazões Instantâneas/MS 2016, Disponível em

<<http://www.consultaesic.cgu.gov.br/busca/dados/Lists/Pedido/Item/displayifs.aspx?List=0c839f31-47d7-4485-ab65-ab0cee9cf8fe&ID=567641&Web=88cc5f44-8cfe-4964-8ff4-376b5ebb3bef>>

IPCC-Working Group III – Mitigation of Climate Change, Annex III: Technology - specific cost and performance parameters" (PDF). IPCC. 2014. p. 7. Retrieved 2018-12-14.

HYDROGEN PRODUCTION (POWER TO GAS) AND ITS APPLICATIONS IN THE ENERGY SYSTEM

Abstract: *In recent years there has been an increase in the share of intermittent sources (wind and solar) in the energy system in several countries and in Brazil. This new context promotes decarbonization in the energy matrix, increasing the power generation capacity, leading to periods of low electricity prices and providing an opportunity for the development of flexible electro-intensive processes. The use of appropriate operational measures related to the integration of the existing power grid and the energy market enables the development of processes called Power to Gas (PtG), which promotes the conversion of surplus electricity to other useful energy carriers and chemicals, among others. The hydrogen, which can be obtained from the electrolysis of water. Currently the main technologies for electrolytic hydrogen production are: alkaline, proton exchange membrane (PEM) and solid oxide (SOEC). Alkaline electrolysis is a mature technology widely used in industry. PEM electrolysis is in the early stages of commercialization, while SOEC is still used to a lesser extent in research and demonstration projects. In this context, this paper summarizes the current state of the art of electrolytic hydrogen production technology, analyzing its subsequent injection into existing natural gas pipelines in Brazil. This analysis is also made in relation to projects developed in other countries, showing the advantages and disadvantages of the Brazilian case in relation to the others. Finally, we present a simulation of a photovoltaic solar plant and the relationships between the electricity produced, the amount of hydrogen generated and the flows that can be injected into some existing natural gas networks, as long as authorized by the National Petroleum Agency - ANP.*

Keywords: *Solar Energy, Hydrogen, Power to Gas.*