OTIMIZAÇÃO DA REFORMA A SECO DO BIOGÁS PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Arthur de Almeida Martins (ITI/UEM), Diego Rafael Magero Elihimas (Coorientador), Caliane Bastos Borba Costa (Orientadora). E-mail: ra128579@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia (CTC) , Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharia Química / Modelagem, Simulação, Síntese, Otimização e Controle de Processos.

Palavras-chave: Otimização; Hidrogênio; Biogás.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo simular e otimizar o processo de reforma a seco do biogás para maximizar a produção de H□. Foi considerado um biogás contendo 60% de CH□ e 40% de CO□, com vazão de 6333 kg/h. O processo foi simulado no Aspen Plus v.15 e compreendeu as etapas de reforma a seco, deslocamento gás-água (WGS) e purificação do hidrogênio. A maximização da produção de H□ foi realizada por meio da ferramenta *Optimization* do Aspen Plus, considerando como variáveis de decisão as condições operacionais do reformador e dos reatores de WGS. Os resultados indicaram uma produção máxima de 811 kg/h de H□. Os resultados demonstram que ajustes adequados nas variáveis operacionais podem aprimorar a produção de H□, tornando o processo mais viável para aplicações industriais.

INTRODUÇÃO

A valorização energética de resíduos orgânicos por meio da produção de biogás constitui uma alternativa para o aproveitamento de matérias-primas de baixo valor agregado, possibilitando sua conversão em produtos de interesse energético e industrial. O biogás apresenta potencial como matéria-prima para a produção de hidrogênio devido à presença de metano e dióxido de carbono em sua composição, componentes que podem ser aproveitados em processos de reforma. O hidrogênio, por sua vez, apresenta ampla aplicação como vetor energético e insumo industrial, sendo empregado em processos químicos, refino, produção de amônia e metanol.
Entre as rotas de conversão do biogás, a reforma a seco do metano destaca-se por utilizar CH□ e CO□ como reagentes para a produção de gás de síntese, composto principalmente por H□ e CO. O desempenho do processo é influenciado pela composição da alimentação e pelas condições operacionais que afetam o equilíbrio das reações e, consequentemente, a produção de H□. Entretanto, a formação de carbono sólido constitui uma das principais limitações do processo, podendo contribuir para a desativação do catalisador. Assim, a otimização das condições operacionais é importante para maximizar a produção de H□ (Elihimas *et al.*, 2025).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo simular e otimizar o processo de reforma a seco do biogás, visando à maximização da produção de hidrogênio por meio da avaliação das principais variáveis operacionais do processo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo, foi considerado um biogás produzido a 35 °C, com composição de 60% de CH□ e 40% de CO□ em base seca e vazão total de 6333 kg/h. O modelo termodinâmico *Nonrandom Two-Liquid Redlich-Kwong* (NRTL-RK), o fluxograma do processo e os respectivos parâmetros foram baseados em Kourdourli *et al.* (2023). O processo de reforma a seco do biogás foi simulado no software *Aspen Plus v.15*, conforme apresentado na Figura 1.

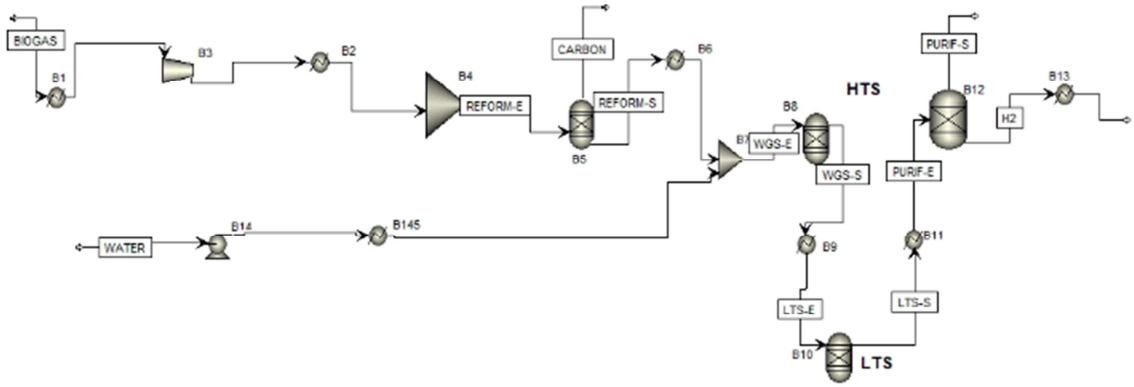


Figura 1 –Simulação do processo da reforma a seco do biogás.

A etapa de reforma a seco ocorre no bloco B5, representado por um reator de Gibbs (RGibbs), no qual os produtos foram definidos considerando as principais reações associadas à conversão de CH□ e CO□ em H□ e CO. A reação global da reforma a seco do metano é apresentada na Equação (1). Também foram incorporadas ao modelo as reações de decomposição do metano e do monóxido de carbono, apresentadas nas Equações (2) e (3), respectivamente. A inclusão dessas reações permitiu avaliar a formação de carbono sólido em função das condições de operação. Dessa forma, foram consideradas como possíveis espécies de equilíbrio: H□, CO, CO□, CH□, H□O e $C_{(s)}$. O gás de síntese produzido na reforma foi direcionado ao processo *Water Gas Shift* (WGS), constituído pelos estágios *High-Temperature Shift* (HTS) e *Low-Temperature Shift* (LTS). Ambos foram representados por reatores de Gibbs (RGibbs), considerando a reação de conversão de CO e H□O em CO□ e H□, apresentada na Equação (4).

$$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2\,CO + 2\,H_2, \quad \Delta H°_{298} = 247\ kJ/mol \tag{1}$$

$$CH_4 \leftrightarrow C_{(s)} + 2\,H□, \quad \Delta H°□□□ = 74{,}8\ kJ/mol \tag{2}$$

$$2\,CO \leftrightarrow C_{(s)} + CO_2, \quad \Delta H°_{298} = -172{,}7\ kJ/mol \tag{3}$$

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2, \quad \Delta H°_{298} = -41\ kJ/mol \tag{4}$$

Por fim, a corrente proveniente do sistema WGS foi direcionada à etapa de purificação do hidrogênio por Adsorção por Oscilação de Pressão (*Pressure Swing Adsorption* – PSA), representada por um separador do tipo SEP (B12), com eficiência de separação de 85% e pureza molar de H□ de 99,8%, conforme Kourdourli *et al.* (2023).

A otimização do processo foi realizada com o objetivo de maximizar a vazão mássica de hidrogênio produzido. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Optimization* do *Aspen Plus*, baseada no algoritmo de Programação Quadrática Sequencial. Foram consideradas como variáveis de decisão as condições operacionais do reformador e dos reatores WGS, além da vazão molar de água adicionada ao HTS. As faixas de operação das variáveis utilizadas na otimização foram definidas com base em condições reportadas na literatura (Tabela 1).

Tabela 1- Faixas de operação das variáveis consideradas na otimização.

Equipamento	Variável	Faixa	Referência
Reformador	Temperatura	700-1000 °C	Agún e Abánades (2025)
Reformador	Pressão	1-10 atm	Szczygiel *et al.* (2025)
HTS	Temperatura	300-500 °C	Chen *et al.* (2020)
HTS	Pressão	10-60 atm	Mendes *et al.* (2010)
HTS	Vazão de água	405-2025 kmol/h	Assumido
LTS	Temperatura	150-250 °C	Chen *et al.* (2020)
LTS	Pressão	10-40 atm	Mendes *et al.* (2010)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A função objetivo resultou em uma produção máxima de 811 kg/h de H□. O caso otimizado apresentou temperatura de 1000 °C e pressão de 1 atm no reformador. Ambas as variáveis atingiram os limites da faixa de busca, indicando que temperaturas mais elevadas e menores pressões favoreceram a produção de hidrogênio, estando de acordo com o princípio de Le Chatelier. Além disso, nas condições otimizadas, o processo teve 386 kg/h de carbono sólido. Nos reatores de WGS, as condições otimizadas foram de 350 °C e 15,5 atm para o HTS e 150 °C e 15,5 atm para o LTS, além da vazão de água de 760 kmol/h. De modo geral, os resultados demonstram que a otimização conjunta das condições operacionais do reformador e dos reatores WGS permitiu alcançar a máxima produção de H□.

Comparando com Elihimas *et al.* (2025), que otimizaram a reforma a vapor do biogás e obtiveram 931 kg/h de H□, observa-se comportamento semelhante ao

deste trabalho, com a otimização indicando baixa pressão (1 atm) e elevada temperatura (765 °C) como condições favoráveis à produção de H□.

CONCLUSÕES

A otimização do processo de reforma a seco permitiu obter uma produção máxima de 811 kg/h de H□ a partir de 6333 kg/h do biogás, com o reformador operando a 1000 °C e 1 atm. Para os reatores WGS, as condições ótimas foram 350 °C e 15,5 atm no HTS e 150 °C e 15,5 atm no LTS, com vazão de água de 760 kmol/h. Os resultados demonstram que a otimização das variáveis operacionais do reformador, dos estágios de WGS e da vazão de água, permitiu maximizar a produção de H□, evidenciando o potencial da otimização para melhorar o desempenho do processo.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001. Os autores agradecem a Origem Energia S.A. e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Brasil) – Processos: 141891/2023-8, 180670/2026-3 , 307705/2025-0.

REFERÊNCIAS

AGÚN, B.; ABÁNADES, A. Comprehensive review on dry reforming of methane: challenges and potential for greenhouse gas mitigation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 103, p. 395-414, 2025.

CHEN, W. H.; CHEN, C. Y. Water gas shift reaction for hydrogen production and carbon dioxide capture: a review. *Applied Energy*, v. 258, p. 114078, 2020.

ELIHIMAS, D. R. M. *et al.* Otimização da reforma a vapor do biogás para produção de hidrogênio. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química e Encontro Brasileiro sobre o Ensino em Engenharia Química. vol. 5, 2025, 2025, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...,** Galoá, 2025. Disponível em: <https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2025/trabalhos/otimizacao-da-reforma-a-vapor-do-biogas-para-producao-de-hidrogenio?lang=pt-br>. Acesso em: 29 Ago. 2026.

KOURDOURLI, F. *et al.* Modeling of hydrogen production from biomass bio-digestion under Aspen Plus. *Computers & Chemical Engineering*, v. 175, p. 108273, 2023.

MENDES, D. *et al.* The water-gas shift reaction: from conventional catalytic systems to Pd-based membrane reactors—a review. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, v. 5, n. 1, p. 111-137, 2010.

SZCZYGIEŁ, J. *et al.* Thermodynamical analysis and optimization of dry reforming and trireforming of greenhouse gases: a statistical approach. *ACS Omega*, v. 10, n. 30, p. 33536-33547, 2025.