

Avaliação do Gás de Síntese gerado pela Reforma de Biogás visando à Produção de SAF

Guilherme Henrique Gallo Lanza^{a*}, Lucas Bonfim-Rocha^a, Caliane Bastos Borba Costa^a

^aPós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR, Brasil

*guilhermehglanza@gmail.com

RESUMO

Este trabalho avalia os efeitos do equilíbrio termodinâmico em três rotas de reforma do biogás (reforma a vapor, reforma a seco e oxidação parcial) para produção de combustível sustentável de aviação. Simulações com reatores de equilíbrio foram utilizadas para analisar a composição do gás de síntese e seu impacto na razão hidrogênio/monóxido de carbono para aplicação na síntese de Fischer-Tropsch. A reforma a vapor gerou um gás rico em hidrogênio ($H_2/CO = 2,77$), o que demanda etapas de separação. A reforma a seco produziu gás com deficiência de hidrogênio ($H_2/CO = 1,09$), além de maior suscetibilidade à formação de carbono sólido. A oxidação parcial apresentou comportamento intermediário ($H_2/CO = 1,04$), influenciado pela composição do biogás e pelo fornecimento de oxigênio. Os custos de ajuste variam de 198 a 699 USD/t de biogás para a reforma a seco e de 192 a 678 USD/t para a oxidação parcial.

Palavras-chave: Síntese de Fischer-Tropsch, Reforma a vapor, Reforma a seco, Oxidação parcial, Simulação de processos.

1. Motivação

A mitigação das mudanças climáticas impulsiona a busca por soluções para a descarbonização de setores de difícil eletrificação, como a aviação, cuja dependência de combustíveis líquidos de alta densidade energética limita alternativas tecnológicas de curto prazo (Boyles, 2022). Nesse contexto, o Combustível Sustentável de Aviação (SAF - *Sustainable Aviation Fuel*) destaca-se como uma rota promissora, especialmente quando produzido por meio da síntese de Fischer-Tropsch (FT) a partir de gás de síntese (*syngas*) produzido de fontes renováveis, como o biogás. O Brasil possui posição estratégica devido à elevada participação de fontes renováveis em sua matriz energética e à ampla disponibilidade de biomassa residual proveniente dos setores agropecuário e sucroenergético (IRENA, 2025). A conversão eficiente de biogás em gás de síntese, no entanto, impõe desafios, particularmente no ajuste da razão molar H_2/CO , parâmetro crítico para a operação da síntese FT (Rabah, 2023).

Diferentes rotas de reforma produzem composições distintas de gás de síntese, frequentemente desalinhadas com os requisitos estequiométricos da síntese FT que visa à produção de SAF (Zhao *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2025). Além disso, o catalisador da síntese FT impõe restrições adicionais: catalisadores à base de cobalto requerem razões H_2/CO próximas de 2,0, enquanto catalisadores à base de ferro apresentam maior flexibilidade, porém menor seletividade para frações pesadas (Keunecke *et al.*, 2024). Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio da simulação de processos com reatores termodinâmicos, o impacto das rotas de reforma de biogás sobre a razão H_2/CO do gás de síntese, incorporando uma análise de sua adequação aos requisitos da síntese de Fischer-Tropsch e suas implicações quando o intuito posterior é a produção de SAF.

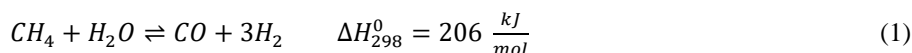
2. Metodologia

Esta seção detalha a estrutura conceitual e de simulação adotada para avaliar as diferentes rotas de geração de gás de síntese (*syngas*) a partir da reforma do biogás. A abordagem fundamenta-se na engenharia de sistemas em processos, visando integrar a etapa de reforma às exigências estequiométricas e econômicas da síntese de combustíveis de aviação (SAF), com foco no alinhamento de massa e energia entre as unidades do processo.

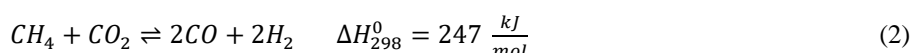
2.1. Fundamentos das rotas de reforma do biogás

A conversão do biogás em gás de síntese adequado à síntese de Fischer-Tropsch baseia-se na conversão termoquímica de metano e dióxido de carbono por meio de diferentes agentes oxidantes (Zhao *et al.*, 2020). Neste estudo, foram avaliadas termodinamicamente três rotas tecnológicas primárias. A primeira delas é a Reforma a

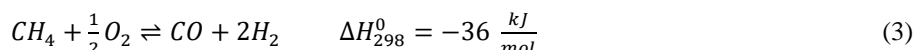
Vapor (SMR - *Steam Methane Reforming*), tecnologia amplamente consolidada na indústria e que utiliza vapor de água (H₂O) como agente oxidante. A SMR é caracterizada por sua natureza fortemente endotérmica e pela tendência a favorecer a formação de correntes ricas em hidrogênio, com razão teórica H₂/CO próxima de 3,0, conforme a estequiometria da reação de reforma a vapor, como mostrado na Equação 1.



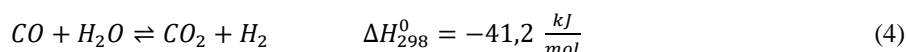
A segunda rota avaliada é a Reforma a Seco (DMR – *Dry Methane Reforming*), que apresenta considerável interesse ambiental por consumir simultaneamente dois gases de efeito estufa relevantes presentes no biogás, utilizando o próprio CO₂ como agente oxidante do metano (Zhao *et al.*, 2020). Trata-se de uma via endotérmica com tendência a formar carbono sólido em determinadas condições termodinâmicas, resultando tipicamente em razões H₂/CO próximas a 1,0, conforme representado na Equação (2).



A terceira rota avaliada é a Oxidação Parcial (POX – *Partial Oxidation*). Diferentemente das rotas de reforma convencionais baseadas em reações endotérmicas, a POX emprega oxigênio puro (O₂) em condições subestequiométricas como agente oxidante (Zhu *et al.*, 2014). Essa característica confere à rota um perfil exotérmico e uma taxa de reação elevada, contribuindo para a redução da demanda de energia externa do processo e resultando em um gás de síntese com razão H₂/CO mais próxima dos requisitos da síntese de Fischer–Tropsch (tipicamente próxima de 2,0), de acordo com a Equação (3).



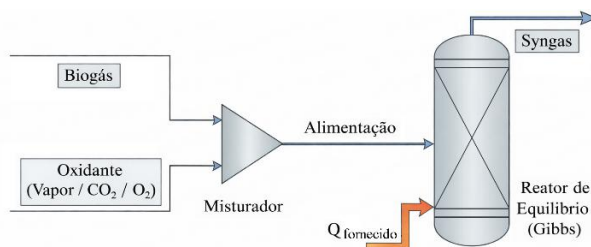
Estudos recentes investigam a integração de rotas de reforma do metano, combinando vapor, CO₂ e oxigênio em configurações como bi-reforma e tri-reforma, permitindo ajustar a razão H₂/CO e melhorar a integração energética, com redução da demanda endotérmica (Zhao *et al.*, 2020). Entretanto, essas configurações aumentam a complexidade operacional devido ao controle simultâneo das correntes e do regime térmico do reator (Singh *et al.*, 2025). Adicionalmente, segundo Zhao *et al.* (2020), reações de equilíbrio secundárias influenciam a composição do gás de síntese, destacando-se a reação de deslocamento gás-água (WGS - *Water-Gas Shift*), apresentada na Equação (4), e sua inversa (RWGS - *Reverse Water-Gas Shift*). Essas reações promovem a redistribuição de H₂ e de CO, impactando diretamente a razão H₂/CO do sistema.



2.2. Modelagem e simulação do processo de reforma

A modelagem e simulação das três rotas avaliadas foram realizadas no software comercial Aspen Plus (versão V14). Adotou-se a equação de estado cúbica de Peng–Robinson (PR) como modelo termodinâmico, amplamente utilizada para a descrição do comportamento de misturas gasosas leves e dos equilíbrios de fase em condições de elevada temperatura e pressão (Rabah, 2023). A configuração de *flowsheet* do modelo desenvolvido para o processamento do biogás está ilustrada na Figura 1. O arranjo modular foi estruturado com alimentação independente de biogás e de agentes oxidantes específicos de cada rota (H₂O, CO₂ ou O₂). Considerou-se a mistura de composição molar no biogás equivalente a 60/40 para a razão CH₄/CO (ANP, 2018), sendo a alimentação previamente tratada quanto a compostos sulfurados e outros contaminantes. No modelo, foram consideradas as espécies químicas envolvidas nas reações apresentadas, incluindo CH₄, CO₂, H₂O, CO, H₂ e C_(s), permitindo avaliar a composição do gás de síntese e a distribuição do carbono entre as fases em equilíbrio termodinâmico. Essas correntes são direcionadas a um misturador, promovendo a homogeneização antes da entrada no reator termoquímico isotérmico, do qual emerge a corrente de produto (*syngas*). O reator foi modelado como um reator de equilíbrio do tipo Gibbs, devido à sua capacidade de prever a composição do sistema sem necessidade de parâmetros cinéticos específicos, frequentemente indisponíveis em sistemas complexos. Considerando as elevadas temperaturas típicas da reforma do metano, em que o sistema tende ao equilíbrio termodinâmico, essa abordagem é adequada para análises de processo e é amplamente empregada em estudos de reforma para determinar a composição de equilíbrio por meio da minimização da energia livre de Gibbs (Tabrizi *et al.*, 2015).

Figura 1. Fluxograma de processo implementado no Aspen Plus para simular as rotas de reforma do biogás, considerando diferentes agentes oxidantes (H_2O , CO_2 e O_2).



2.3. Condições Operacionais e Análise de Sensibilidade

Para fins de comparação dos processos, a alimentação base da simulação foi padronizada em 100 kmol/h de biogás para todas as rotas avaliadas. As variáveis de operação (temperatura, pressão e razões molares dos agentes oxidantes em relação ao biogás) foram definidas com base em condições de referência reportadas na literatura, descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros operacionais de entrada definidos para a simulação das rotas de reforma.

Reforma	Temperatura do Reator ($^{\circ}C$)	Pressão (bar)	Razão Molar de Alimentação	Referência
SMR	900	25	Vapor/Carbono = 3,0	Fernandes <i>et al.</i> , 2006
DMR	900	10	$CO_2/CH_4 = 1,0$	Zhu <i>et al.</i> , 2014
POX	1000	30	$O_2/CH_4 = 0,6$	Zhu <i>et al.</i> , 2014

Os resultados obtidos foram posteriormente confrontados com as tendências e faixas reportadas no trabalho de Gopaul e Dutta (2015), por meio da comparação das razões H_2/CO geradas no simulador com dados experimentais e com simulações previamente estudadas para as rotas SMR, DMR e POX. Adicionalmente, foram realizadas análises de sensibilidade, nas quais a temperatura do reator foi variada de 500 $^{\circ}C$ a 1100 $^{\circ}C$ (em incrementos de 10 $^{\circ}C$) e a pressão de 1 a 40 bar (em incrementos de 1 bar), assumindo-se operação em regime de equilíbrio termodinâmico. Para ambas as análises, foram avaliadas a razão H_2/CO do gás de síntese, as vazões molares de H_2 , de CO e de $C(s)$, bem como a carga térmica do reator.

A viabilidade técnica do gás de síntese foi avaliada com base nos requisitos cinéticos e operacionais da síntese de Fischer–Tropsch. Para sistemas voltados à maximização de parafinas de cadeia longa, relevantes para a produção de SAF, catalisadores à base de cobalto são frequentemente empregados, apresentando baixa atividade para a reação de deslocamento gás-água (WGS) e demandando uma razão H_2/CO tipicamente próxima de 2,0 (Keunecke *et al.*, 2024). Em contraste, catalisadores à base de ferro apresentam elevada atividade WGS *in situ*, permitindo operação com atmosferas subestequiométricas, geralmente inferiores a 2,0, embora com menor seletividade para as frações parafínicas de cadeia longa (Akbarzadeh *et al.*, 2020).

2.4. Condicionamento do syngas e avaliação econômica

O método para avaliar a necessidade de condicionamento estequiométrico do gás de síntese baseou-se em um balanço de massa seletivo. A partir das correntes de saída do simulador, quantificou-se a necessidade de ajustar a composição do gás por meio do déficit ou do excesso mássico de hidrogênio, requerido para adequar a composição de cada corrente à razão molar H_2/CO próxima de 2,0, típica de sistemas catalíticos à base de cobalto.

Valores positivos indicam déficit de hidrogênio (necessidade de injeção), enquanto valores negativos indicam excesso (necessidade de remoção ou purificação). Para as rotas deficitárias, o impacto operacional (OPEX) foi estimado pela multiplicação da massa de H_2 requerida pelo custo nivelado do hidrogênio verde (LCOH), produzido por eletrólise em eletrolisadores alcalinos (AEL) e em membranas de troca de prótons (PEM), considerando valores da literatura entre 3,4 e 12 USD/kg H_2 , dependentes do custo da eletricidade e do fator de capacidade (IEA, 2023). Para cenários com superávit, adotou-se uma avaliação qualitativa baseada em custos referenciais de separação, como as unidades PSA/VPSA (Luberti e Ahn, 2022). Assim, a análise combina estimativas quantitativas para o déficit e qualitativas para o excesso, permitindo avaliar a intensidade do condicionamento do gás de síntese aos requisitos da síntese de Fischer–Tropsch, incluindo indicadores operacionais e o impacto econômico do fornecimento de hidrogênio externo.

3. Resultados

3.1. Avaliação dos resultados da reforma do biogás

A simulação do processamento do biogás evidenciou resultados distintos para cada rota de reforma, em concordância com tendências reportadas na literatura, o que indica impactos na seleção da rota para a produção de SAF. A distribuição das espécies em equilíbrio também indica diferenças operacionais relevantes entre as rotas. A Tabela 2 consolida as frações molares da saída em equilíbrio e as razões H₂/CO obtidas para as três vias avaliadas.

Tabela 2. Frações molares de saída em equilíbrio e razão final do gás de síntese.

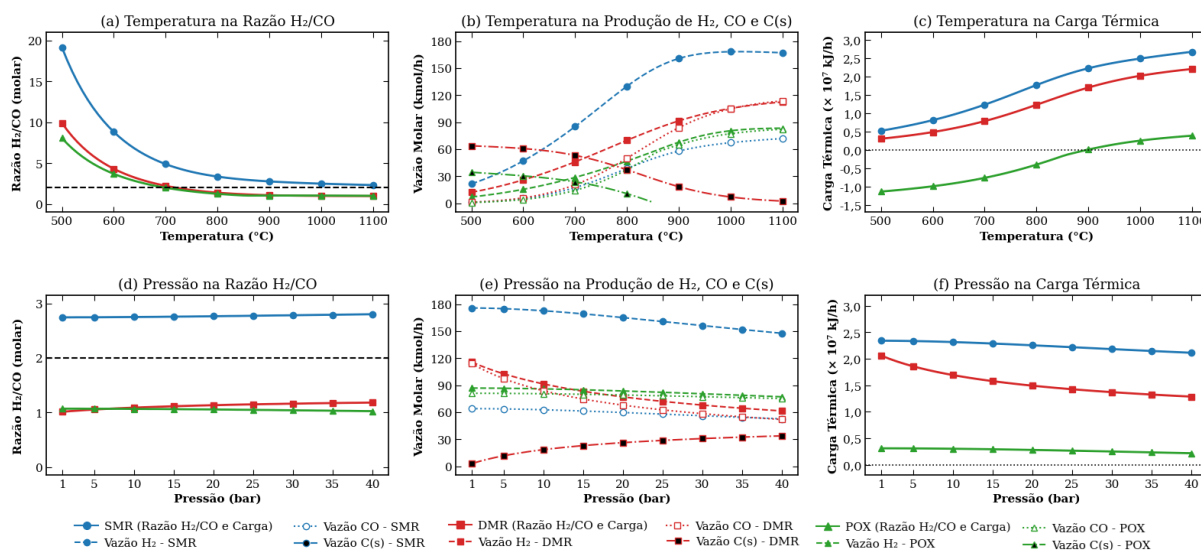
Reforma	Frações Molares					Razão H ₂ /CO		Desvio (%)	
	CH ₄	H ₂	CO	H ₂ O	CO ₂	C	teórica		simulada
SMR	0,0137	0,4129	0,1489	0,3303	0,0943	0,0000	≈ 3,00	≈ 2,77	7,7%
DMR	0,0305	0,4046	0,3710	0,0649	0,0473	0,0817	≈ 1,00	≈ 1,09	9,0%
POX	0,0118	0,3748	0,3597	0,1599	0,0938	0,0000	≈ 2,00	≈ 1,04	48,0%

A comparação entre os valores teóricos e simulados da razão H₂/CO evidencia comportamentos distintos entre as rotas avaliadas. A SMR apresentou razão H₂/CO de 2,77, mantendo-se próxima do valor teórico. A DMR apresentou razão H₂/CO de 1,09, valor compatível com a natureza dessa rota e com a influência de reações de equilíbrio envolvendo CO₂. Já a POX apresentou razão H₂/CO de 1,04, valor inferior ao teórico para a oxidação parcial ideal do metano. Observa-se que a DMR é a rota mais suscetível à formação de carbono sólido nas condições de equilíbrio avaliadas, enquanto a SMR e a POX não apresentaram formação de C(s) na condição base. O desvio acentuado observado para a rota POX, em relação ao valor teórico de H₂/CO de 2,00, é tecnicamente plausível e justifica-se, em grande parte, pela composição do biogás adotado. Esse valor teórico é válido para a oxidação parcial ideal do metano puro. Entretanto, na presença de frações elevadas de CO₂, o sistema deixa de seguir exclusivamente a estequiometria ideal da POX, passando a sofrer influência de reações paralelas, como a reforma seca e a reação RWGS, que favorecem a formação adicional de CO e reduzem a razão H₂/CO do gás de síntese. Assim, embora o desvio em relação ao valor teórico seja elevado, o resultado simulado mostra-se fisicamente coerente com uma alimentação real de biogás.

3.2. Análise de sensibilidade das rotas avaliadas

Como evidenciado na Figura 2(a), a razão H₂/CO apresenta comportamentos distintos entre as rotas. Essa razão, na SMR, inicia-se com valores elevados e decresce com o aumento da temperatura, mantendo-se acima da razão tipicamente requerida para sistemas Fischer–Tropsch à base de cobalto em toda a faixa analisada. Na DMR permanece próxima ou inferior à unidade, enquanto, na POX, apresenta um comportamento intermediário, com aproximação gradual de H₂/CO ≈ 1 a temperaturas mais elevadas.

Figura 2. Análise de sensibilidade das rotas de reforma do biogás em função da temperatura (a–c) e da pressão (d–f), considerando razão H₂/CO, vazões molares e carga térmica.



A Figura 2(b) mostra que essas diferenças estão associadas à maior produção relativa de H_2 na SMR e à predominância de CO na DMR. Na POX, observa-se crescimento conjunto de H_2 e CO, porém sem atingir a proporção estequiométrica ideal para FT. De forma complementar, observa-se que a formação de carbono sólido é mais pronunciada na DMR, sobretudo em temperaturas mais baixas, enquanto na POX sua ocorrência se restringe à região de menor temperatura e na SMR não se verifica formação significativa de $C_{(s)}$ na faixa analisada. Já a análise térmica, apresentada na Figura 2(c), indica que SMR e DMR são endotérmicas, com maior demanda energética para a SMR, enquanto a POX apresenta comportamento próximo à neutralidade térmica em temperaturas mais elevadas.

Com relação à pressão, a Figura 2(d) indica leve aumento da razão H_2/CO na SMR e redução para DMR e POX. As Figuras 2(e) e 2(f) mostram que o aumento da pressão reduz as vazões molares gasosas e a carga térmica em todas as rotas, sendo a variação mais significativa na DMR, enquanto SMR e POX apresentam menor sensibilidade à pressão. No caso da DMR, observa-se ainda um incremento na formação de carbono sólido com o aumento da pressão, o que reforça a necessidade de avaliar essa rota não apenas sob a ótica da razão H_2/CO , mas também em termos de estabilidade operacional, uma vez que a deposição de carbono pode bloquear os sítios ativos do catalisador, levando à sua desativação.

Diante da razão de 1,09 obtida pela DMR, o uso de catalisadores à base de ferro surge como alternativa tecnicamente compatível, devido à sua atividade na reação WGS. Contudo, a presença de contaminantes no biogás, como H_2S e siloxanos, pode comprometer sua estabilidade e seu desempenho. Além disso, a propensão à formação de carbono sólido observada nessa rota impõe uma limitação operacional adicional. Nesse contexto, a aplicação da DMR em sistemas baseados em cobalto deve ser analisada com cautela, uma vez que a rota combina deficiência de hidrogênio com maior suscetibilidade à deposição de carbono. Ressalta-se que os resultados representam um limite termodinâmico ideal, sem considerar efeitos cinéticos nem limitações de transferência de massa e de calor.

3.3. Análise econômica da adequação do gás de síntese

A viabilidade das rotas de reforma avaliadas depende não apenas do balanço de massa, mas também da necessidade de ajuste da razão H_2/CO para atender aos requisitos da síntese de Fischer–Tropsch. A análise econômica foi conduzida de forma comparativa, sendo qualitativa para rotas com excesso de hidrogênio e quantitativa para aquelas com deficiência. A rota de reforma a vapor (SMR) apresentou perfil super-hidrogenado, favorecendo a etapa de síntese, porém exigindo separação e possível reaproveitamento do hidrogênio excedente por meio de unidades como PSA/VPSA, o que adiciona complexidade operacional e custos ao processo.

Por outro lado, tanto a Reforma a Seco (DMR) quanto a Oxidação Parcial (POX) apresentaram correntes deficitárias em hidrogênio em relação à razão H_2/CO igual a 2,0. Para a condição base analisada, a DMR apresentou o maior déficit, estimado em aproximadamente 154 kg/h, enquanto a POX apresentou uma necessidade inferior, da ordem de 149 kg/h, refletindo sua maior proximidade em relação à razão ideal.

Considerando valores de custo nivelado do hidrogênio (LCOH) entre 3,4 e 12 USD/kg H_2 , os custos operacionais adicionais associados à suplementação de hidrogênio variam de aproximadamente 523 a 1846 USD/h para a DMR e de 507 a 1792 USD/h para a POX, evidenciando a maior penalização econômica associada à rota DMR. Quando normalizados pela vazão de alimentação adotada (100 kmol/h de biogás), esses valores correspondem a aproximadamente 198 a 699 USD/t de biogás para a DMR e 192 a 678 USD/t de biogás para a POX.

Entretanto, a análise não deve se restringir ao custo de suplementação de hidrogênio. A POX, apesar de apresentar menor déficit de H_2 , requer fornecimento de oxigênio, o que implica custos adicionais associados à sua produção ou separação, além de maior complexidade operacional. Para a DMR, soma-se a isso a maior propensão à formação de carbono sólido nas condições avaliadas, o que sugere possíveis penalizações operacionais adicionais não diretamente capturadas pelo custo de suplementação de hidrogênio. Sob o ponto de vista energético, conforme evidenciado nas análises de sensibilidade (Figura 2(c) e 2(f)), a POX apresenta comportamento próximo à neutralidade térmica em determinadas condições, o que pode representar uma vantagem energética quando comparada às rotas endotérmicas, como a SMR e a DMR, que demandam maior aporte de calor.

Portanto, observa-se que a escolha da rota mais adequada não depende exclusivamente da razão H_2/CO , mas sim de uma avaliação integrada entre custo de hidrogênio, custo de oxigênio, demanda energética, estabilidade operacional e complexidade do processo. Nesse contexto, a POX apresenta vantagens associadas à menor necessidade de ajuste estequiométrico, enquanto a DMR pode demandar maior investimento em condicionamento do gás e maior atenção a restrições operacionais. A SMR, embora energeticamente mais exigente, oferece maior disponibilidade de hidrogênio, podendo ser vantajosa em cenários onde a integração com unidades de separação seja tecnicamente viável.

4. Conclusão

A avaliação das rotas de reforma do biogás evidenciou que a composição do gás de síntese é fortemente dependente da rota empregada, impactando diretamente sua adequação à síntese de Fischer–Tropsch. A SMR apresentou elevada produção de hidrogênio, com razão H_2/CO próxima ao valor teórico, porém gerando correntes super-hidrogenadas que demandam etapas adicionais de separação. A DMR produziu gás de síntese com baixa razão H_2/CO , influenciada pela presença de CO_2 e por reações de equilíbrio, como a RWGS, resultando em deficiência significativa de hidrogênio e maior suscetibilidade à formação de carbono sólido em condições de equilíbrio. A POX apresentou comportamento intermediário, com razão H_2/CO mais próxima dos requisitos da síntese, embora inferior ao valor teórico, devido à influência da composição do biogás e de reações paralelas.

Sob a perspectiva técnico-econômica, a necessidade de condicionamento do gás de síntese mostrou-se determinante na seleção da rota. A DMR apresentou maior penalização associada à suplementação de hidrogênio e maior sensibilidade a restrições operacionais, enquanto a POX demandou menor ajuste estequiométrico, embora implique custos adicionais com fornecimento de oxigênio. A SMR, apesar da maior demanda energética, oferece maior disponibilidade de hidrogênio e potencial de integração com unidades de separação. Dessa forma, conclui-se que não existe uma rota superior, sendo a escolha dependente de uma avaliação integrada entre disponibilidade de insumos, custos operacionais, estabilidade do processo e requisitos da síntese. Como perspectivas futuras, destacam-se a incorporação de modelos cinéticos e o estudo de configurações híbridas, como bi-reforma e tri-reforma, bem como análises técnico-econômicas mais abrangentes.

Agradecimentos: Esse estudo foi financiado parcialmente pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001 e processo 88887.147708/2025-00. Os autores também agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Brasil), processo 307705/2025-0.

Referências

- A. A. Rabah: Optimization of Syngas Quality for Fischer–Tropsch Synthesis, *Journal of Energy* (2023), 1842187, 2023.
- A. Keunecke, M. Dossow, V. Dieterich, H. Spliethoff e S. Fendt: Insights into Fischer–Tropsch Catalysis: Current Perspectives, Mechanisms, and Emerging Trends in Energy Research, *Frontiers in Energy Research* (12), 1344179, 2024.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução ANP nº 734, de 28 de junho de 2018. Brasília, DF: ANP, 2018.
- D. Singh, P. Sirini e L. Lombardi: Review of Reforming Processes for the Production of Green Hydrogen from Landfill Gas, *Energies* (18), 15, 2025.
- F. A. N. Fernandes e A. B. Soares Jr.: Modeling of Methane Steam Reforming in a Palladium Membrane Reactor, *Latin American Applied Research* (36), 155–161, 2006.
- F. F. Tabrizi, S. A. H. S. Mousavi e H. Atashi: Thermodynamic Analysis of Steam Reforming of Methane with Statistical Approaches, *Energy Conversion and Management* (103), 1065–1077, 2015.
- H. Boyles: Climate-Tech to Watch: Sustainable Aviation Fuel, *Information Technology & Innovation Foundation*: 2022.
- International Energy Agency (IEA): Global Hydrogen Review 2023, International Energy Agency: 2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA): Brazil’s Biofuel Industry: Lessons, Challenges and Opportunities, International Renewable Energy Agency: 2025.
- M. Luberti e H. Ahn: Review of Polybed Pressure Swing Adsorption for Hydrogen Purification, *International Journal of Hydrogen Energy* (47), 10911–10933, 2022.
- O. Akbarzadeh, N. A. M. Zabidi, G. Wang, A. Kordijazi, H. Sadabadi, S. Moosavi, A. A. Babadi, N. A. Hamizi, Y. A. Wahab, M. A. Rahman, S. Sagadevan, Z. Z. Chowdhury e M. R. Johan: Effect of Pressure, H_2/CO Ratio and Reduction Conditions on Co–Mn/CNT Bimetallic Catalyst Performance in Fischer–Tropsch Reaction, *Symmetry* (12), 698, 2020.
- S. G. Gopaul e A. Dutta: Dry Reforming of Multiple Biogas Types for Syngas Production Simulated Using Aspen Plus: The Use of Partial Oxidation and Hydrogen Combustion to Achieve Thermo-Neutrality, *International Journal of Hydrogen Energy* (40), 6307–6318, 2015.
- X. Zhao, B. Joseph, J. Kuhn e S. Ozcan: Biogas Reforming to Syngas: A Review, *iScience* (23), 101082, 2020.
- X. Zhu, K. Li, J.-L. Liu, X.-S. Li e A.-M. Zhu: Effect of CO_2/CH_4 Ratio on Biogas Reforming with Added O_2 through an Unique Spark-Shadow Plasma, *International Journal of Hydrogen Energy* (39), 13902–13908, 2014.