

Produção de Hidrogênio Musgo a Partir da Reforma a Vapor de Biogás e Integração Energética via Análise de Pinch

Vinícius Duarte Arrigoni*, João Pedro Oliveira Pereira, Kauê Galvan Carini, Pedro Coloniezi Garcia,
Admilson Lopes Vieira, Lisandra Ferreira de Lima

Departamento de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina-PR, Brasil

**viniciusarrigoni@alunos.utfpr.edu.br*

RESUMO

Este trabalho apresenta o processo e a simulação de uma unidade industrial de produção de hidrogênio musgo a partir da reforma a vapor de biogás. A simulação foi executada no software *DWSIM* 9.0.5, utilizando uma abordagem híbrida de *scripts* em *Python* para as etapas de purificação e reação. O processo contempla o pré-tratamento do biogás com óxido de zinco e aminas (MEA), seguido de reforma catalítica, reatores de deslocamento gás-água (WGS) e purificação final via *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Foi implementada uma etapa de captura de CO₂ pós-combustão utilizando membranas seletivas. A integração energética, otimizada via Análise Pinch no *Aspen Energy Analyzer*, permitiu uma redução de 60,5% na demanda térmica global, eliminando o consumo de utilidades de aquecimento externas. Os resultados indicam uma conversão de metano de 90,02% e rendimento de conversão de biogás em H₂ de 0,167 kg H₂/kg Biogás, validando a viabilidade técnica e ambiental da rota proposta no cenário de sustentabilidade e transição energética.

Palavras-chave: Hidrogênio Musgo, DWSIM, Biometano, Integração Energética, Descarbonização.

1. Motivação

A transição energética global impõe a substituição progressiva de vetores fósseis por alternativas de baixa intensidade de carbono. Nesse cenário, o hidrogênio destaca-se pela sua elevada densidade energética e versatilidade, consolidando-se como um elemento-chave para a descarbonização de setores de difícil eletrificação, como a siderurgia e o transporte pesado (IEA, 2024; IRENA, 2022). No contexto brasileiro, o aproveitamento do biogás derivado de resíduos do setor sucroenergético oferece uma rota estratégica para a produção do chamado “hidrogênio musgo”. Esta via não apenas mitiga passivos ambientais críticos da produção de etanol (EPE, 2024; Moraes *et al.*, 2015), como também promove a simbiose industrial e a economia circular, alinhando-se às projeções que colocam o Brasil como um potencial líder global, com capacidade de produção estimada em 1,8 bilhão de toneladas anuais (Agência Senado, 2024; BNDES, 2022).

O processamento térmico do biogás para a obtenção de H₂ de alta pureza, contudo, enfrenta barreiras técnicas e econômicas. A presença de compostos sulfurados e mercaptanos exige uma etapa rigorosa de dessulfurização em leitos de óxido de zinco (ZnO) para proteger os catalisadores de níquel no reformador, os quais são extremamente sensíveis ao envenenamento e à desativação prematura (Georgiadis *et al.*, 2020; Novochinskii *et al.*, 2004; Rostrup-Nielsen, 1984). Além disso, a reação de reforma a vapor é fortemente endotérmica, demandando um aporte térmico elevado que torna a eficiência da rede de trocadores de calor o principal determinante da viabilidade operacional e econômica da planta (Kemp, 2007; Smith, 2005).

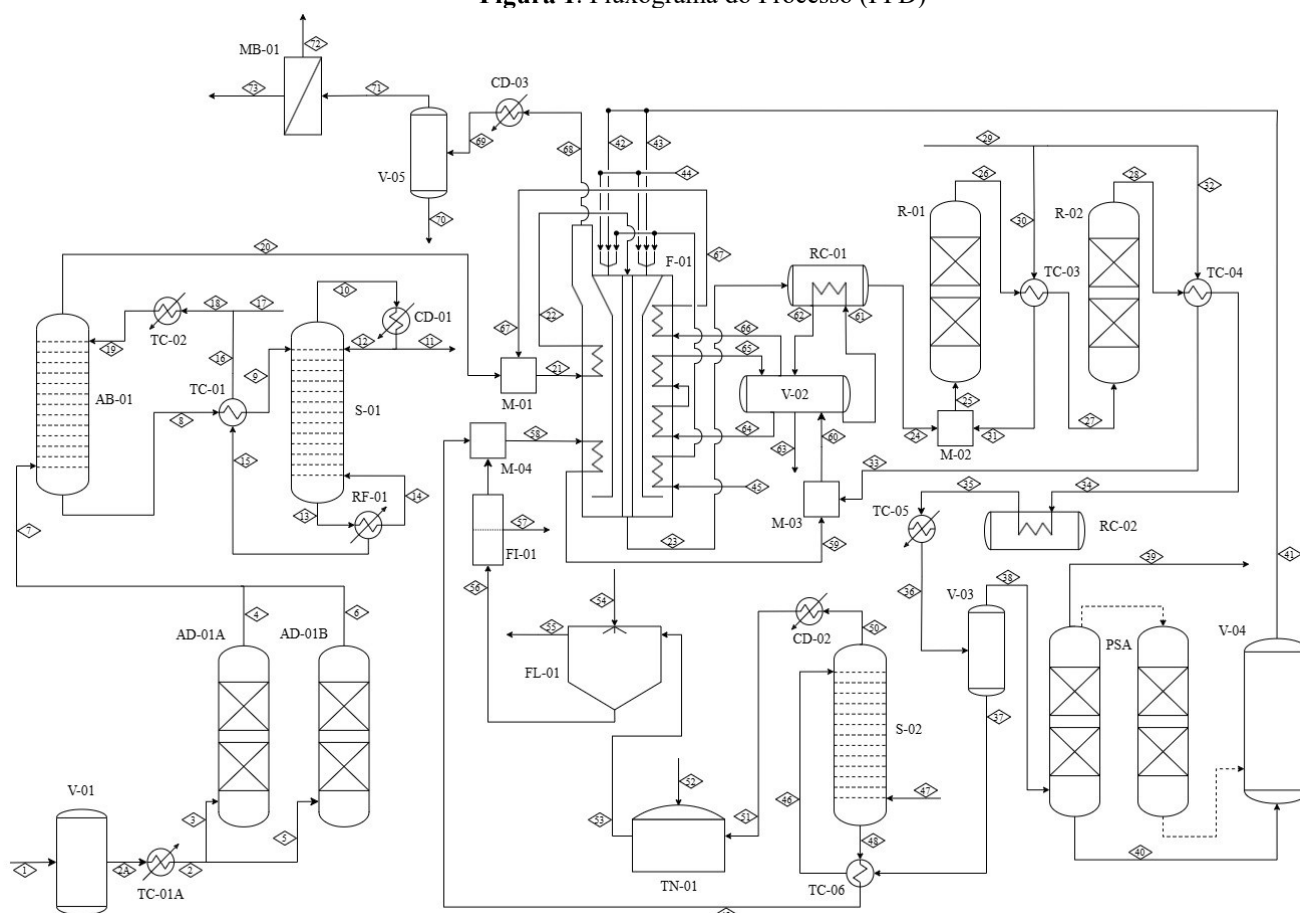
O objetivo deste trabalho é realizar o projeto conceitual e a simulação de uma unidade industrial capaz de processar biogás enriquecido para a produção de hidrogênio com pureza superior a 99,9%, atendendo aos requisitos técnicos para células a combustível (ISO, 2019; SAE International, 2020). O propósito central reside em otimizar a integração energética do sistema via Análise Pinch e implementar estratégias de captura de CO₂ pós-combustão, visando a configuração de uma planta com consumo mínimo de utilidades externas. Busca-se demonstrar que a aplicação da Engenharia de Sistemas de Processos, através do uso combinado de simuladores e linguagem de programação, permite projetar unidades com pegada de carbono negativa, atendendo às rigorosas demandas técnicas, ambientais e regulatórias do mercado atual (Brasil, 2024; Fajardy e Mac Dowell, 2017).

2. Metodologia

A modelagem da unidade de produção foi desenvolvida no simulador de processos *DWSIM 9.0.5*, operando em regime permanente. A estratégia de simulação baseou-se em uma abordagem modular para integrar as etapas de purificação da matéria-prima, reforma catalítica e purificação do hidrogênio. Para assegurar o rigor termodinâmico em diferentes condições de operação, o pacote de propriedades *Peng-Robinson* foi aplicado às seções de alta temperatura e pressão que envolvem gases de síntese (Koretsky, 2007). Paralelamente, utilizou-se o modelo *NRTL-Aqueous Electrolytes* na etapa de absorção química, garantindo a predição correta das interações iônicas e da especiação química do CO_2 em solução de monoetanolamina (MEA) (Plakia *et al.*, 2025).

O processamento inicia-se com o tratamento do biogás bruto para garantir a integridade dos catalisadores de níquel no reformador (Rostrup-Nielsen, 1984). A complexidade química das etapas de adsorção de compostos sulfurados em leitos de óxido de zinco (ZnO) e da absorção de dióxido de carbono por MEA foi abordada mediante a integração de *scripts* customizados em *Python* com a base do simulador (Medeiros, 2023). Essas rotinas permitiram a implementação de modelos de equilíbrio e taxas de transferência de massa mais precisos para essas operações unitárias, descrevendo com maior fidelidade a seletividade e a eficiência de remoção de contaminantes (Georgiadis *et al.*, 2020; Novochinskii *et al.*, 2004). O biometano enriquecido é então direcionado ao reformador primário, seguido por dois estágios de reação de deslocamento gás-água (HTS e LTS). A modelagem desses reatores também foi elaborada utilizando *scripts* em *Python* para descrever a cinética reacional rigorosa (Xu e Froment, 1989), permitindo avaliar a conversão de metano sob a condição de 1360°C e razão vapor/carbono (S/C) de 2,0. A configuração detalhada das unidades operacionais e as correntes estão representadas no Fluxograma de Processo (PFD) da Figura 1.

Figura 1. Fluxograma do Processo (PFD)



LEGENDA:

AB-01: Coluna de absorção química	FL-01: Filtro	PSA: Adsorção por oscilação de pressão	S-01/02: Torre de stripping	V-01: Vaso pulmão
AD-01A/B: Coluna de adsorção química	FL-01: Flotador	R-01/02: Reator adiabático de leito fixo	TC-01/03/04/06: Trocador de calor - corrente de processo	V-02: Vaso de vapor
CD-01/02/03: Condensador	M-01/02/03/04: Misturador	RC-01/02: Recuperador de calor	TC-02/05: Trocador de calor - utilidade fria	V-03/05: Tanque flash
F-01: Forno reformador	MB-01: Membrana seletiva	RF-01: Refervedor - utilidade quente	TN-01: Tanque de neutralização	V-04: Vaso de purga

A etapa final do projeto consistiu na integração energética do sistema através da aplicação da Análise Pinch (Smith, 2005). O procedimento envolveu a extração de dados térmicos de 20 correntes do processo, identificando as necessidades de aquecimento e resfriamento para a construção do diagrama de Rede de Trocadores de Calor no software *Aspen Energy Analyzer*. A partir da determinação do Ponto de Estrangulamento (Pinch Point), projetou-se a Rede de Trocadores de Calor com o intuito de maximizar a recuperação de energia. O projeto priorizou o pré-aquecimento da carga reacional e a geração autossuficiente de vapor a partir do calor sensível do gás de síntese e do aproveitamento térmico dos gases de exaustão do forno, visando a eliminação da demanda por utilidades de aquecimento externas como vapor saturado. (Kemp, 2007).

3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos através da modelagem cinética e termodinâmica no *DWSIM* demonstram a eficácia da rota tecnológica proposta. A utilização de *scripts* customizados em *Python* permitiu uma simulação rigorosa da etapa de purificação, garantindo que o biometano alimentado no reformador apresente níveis de contaminantes como H_2S inferiores aos limites críticos de tolerância do catalisador, que para o envenenamento por enxofre em leitos de níquel é tipicamente inferior a 0,1 ppm (Georgiadis *et al.*, 2020; Rostrup-Nielsen, 1984). Conforme apresentado na Tabela 1, o balanço de massa global revela uma conversão de metano de 90,02%, valor que se alinha aos desempenhos reportados na literatura para reformas em altas temperaturas e razões vapor/carbono otimizadas, onde a conversão termodinâmica de equilíbrio é favorecida acima de 800 °C (Xu e Froment, 1989). Após passar pelas etapas de deslocamento (HTS e LTS) e purificação por PSA, o fluxo atingiu uma pureza superior a 99,9%, além de apresentar um rendimento de 0,17 kg H_2 /kg de biogás. Este rendimento é comparável à produção de hidrogênio a partir de gás natural fóssil, que varia entre 0,25 a 0,33 kg H_2 /kg de gás natural, considerando que o biogás utilizado possui uma fração significativa de inerte na entrada (IEA, 2019).

Tabela 1. Balanço de Massa e Composição das Correntes Principais.

Corrente	Biogás Bruto	Entrada Reformador	Saída Reformador	Hidrogênio Produzido	CO ₂ Capturado
Vazão Mássica (kg/h)	2074,33	5061,86	5061,86	345,87	3021,16
Vazão Molar (kmol/h)	86,81	280,99	382,33	171,21	89,96
Fração Molar (%)					
CH ₄	64,85%	20,04%	1,47%	0,00%	0,00%
CO ₂	27,53%	0,75%	0,55%	0,01%	>97%
H ₂ O	7,61%	79,22%	44,97%	0,00%	0,00%
H ₂ S	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CO	0,00%	0,00%	13,25%	0,00%	0,00%
H ₂	0,00%	0,00%	39,76%	99,90%	0,00%

A análise do desempenho térmico da planta evidenciou o impacto drástico da integração energética ao comparar o cenário base com a configuração otimizada. A Figura 2 apresenta o Diagrama de Grade da rede de trocadores de calor antes da integração, onde se observa uma dependência elevada de utilidades externas para resfriamento e aquecimento. Após a aplicação da Análise Pinch no *Aspen Energy Analyzer*, a estrutura foi reconfigurada para maximizar a recuperação de calor interna, conforme ilustrado na Figura 3. Esta nova conectividade permitiu uma redução de 60,5% na demanda térmica total, possibilitando que o processo opere de forma autossuficiente em termos de aquecimento, utilizando o calor residual do gás de síntese e dos gases de combustão (Smith, 2005).

Figura 2. Diagrama de Grade da Rede de Trocadores de Calor Original.

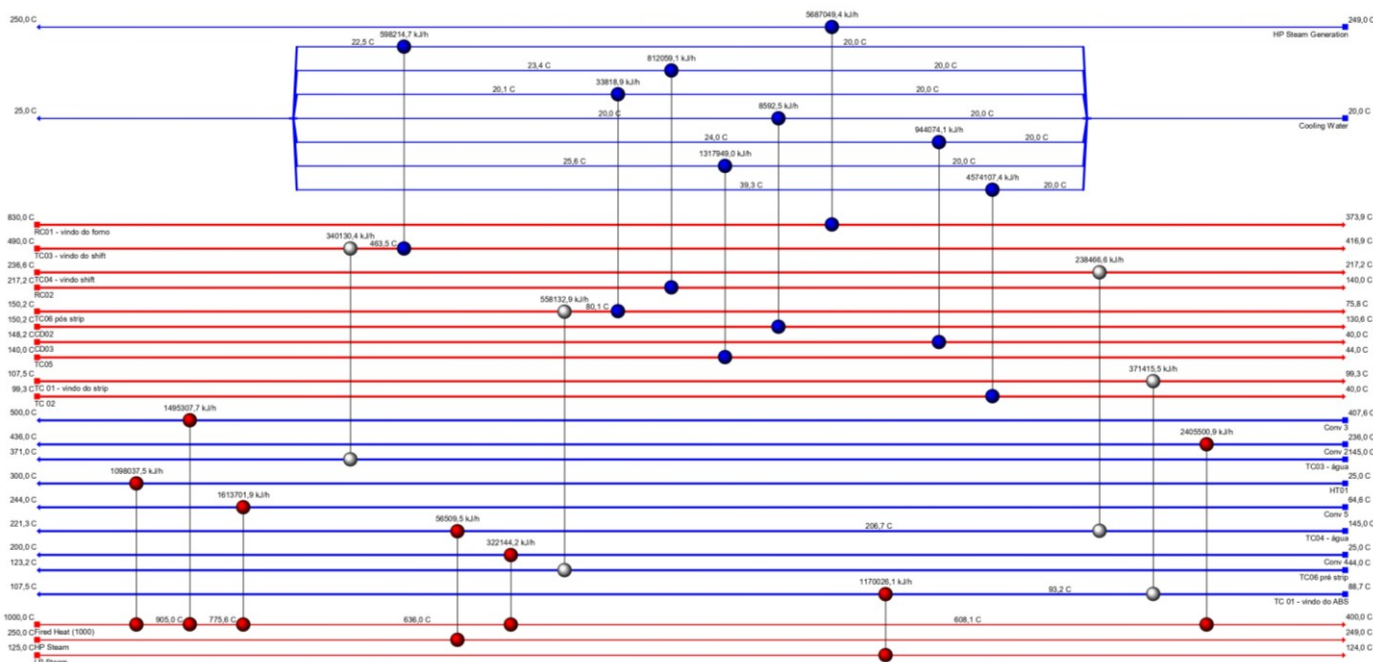
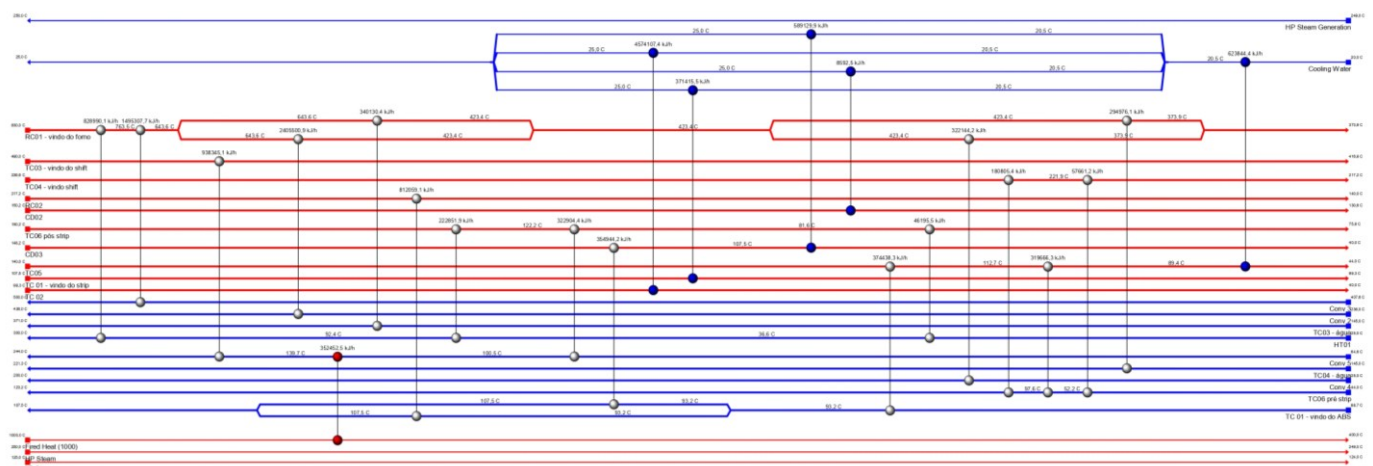


Figura 3. Diagrama de Grade da Rede de Trocadores de Calor com Máxima Integração.



A integração energética refletiu na redução significativa do consumo de utilidades, conforme detalhado no comparativo da Tabela 2. A aplicação da Análise Pinch permitiu a eliminação total do consumo de vapor de alta e baixa pressão, que anteriormente somavam uma carga térmica superior a $1,2 \cdot 10^6$ kJ/h. Além disso, a carga térmica necessária para a combustão do forno foi reduzida de $6,93 \cdot 10^6$ kJ/h para apenas $3,52 \cdot 10^5$ kJ/h, representando uma economia de combustível externo superior a 90% para esta unidade. O balanço total de utilidades revela que a planta integrada demanda $6,52 \cdot 10^6$ kJ/h, contra os $1,65 \cdot 10^7$ kJ/h do cenário base, consolidando a viabilidade operacional e a autossuficiência térmica do processo.

Tabela 2. Comparativo de Consumo de Utilidades: Cenário Base vs. Cenário Integrado.

Utilidade	Carga Térmica (kJ/h)	
	Antes da Integração	Depois da Integração
Água de Resfriamento	$8,29 \cdot 10^6$	$6,17 \cdot 10^6$
Vapor de Alta Pressão	$5,64 \cdot 10^4$	0
Vapor de Baixa Pressão	$1,17 \cdot 10^6$	0
Combustão do Forno	$6,93 \cdot 10^6$	$3,52 \cdot 10^5$
Total	$1,65 \cdot 10^7$	$6,52 \cdot 10^6$

Por fim, a combinação do uso de uma fonte renovável com a captura ativa de emissões nos gases de exaustão resultou em uma pegada de carbono negativa. Enquanto o processo convencional de reforma de gás natural fóssil emite entre 9 a 11 kg de CO₂ por kg de H₂ produzido (IEA, 2019; Spath e Dayton, 2003), o sistema proposto retira CO₂ biogênico do ciclo atmosférico através da captura na seção de MEA e membranas. Este resultado reforça o potencial do hidrogênio musgo como uma solução tecnicamente viável e ambientalmente superior para a descarbonização industrial de larga escala no Brasil.

4. Conclusão

O desenvolvimento deste trabalho permitiu validar a viabilidade técnica e o desempenho ambiental da produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor de biogás enriquecido derivado da vinhaça. A utilização do simulador *DWSIM* 9.0.5, integrada a *scripts* customizados em *Python*, mostrou-se uma ferramenta eficaz para modelar fenômenos complexos de adsorção química e cinética reacional, garantindo uma conversão de metano de 90,02%. A precisão dos modelos químicos e termodinâmicos foi fundamental para fundamentar a obtenção de um hidrogênio com pureza superior a 99,9%, apto para o mercado de células a combustível e em conformidade com os padrões internacionais de qualidade.

A aplicação da Análise Pinch revelou-se um diferencial determinante para a sustentabilidade operacional e econômica do processo. A redução de 60,5% na demanda térmica global e a autossuficiência em aquecimento evidenciam que a integração energética é um fator indispensável para a viabilidade técnica e econômica de plantas de hidrogênio de baixo carbono. O projeto demonstrou ser possível operar uma unidade com total autonomia térmica através do aproveitamento do calor do gás de síntese e do calor residual dos gases de exaustão do forno de reforma.

Por fim, o balanço de emissões negativo alcançado posiciona o hidrogênio musgo como uma rota promissora para a descarbonização da indústria brasileira, contribuindo para as metas nacionais de redução de gases de efeito estufa. Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a realização de uma análise de exergia para identificar irreversibilidades locais na rede de trocadores de calor e um estudo de viabilidade econômica detalhado, abrangendo CAPEX e OPEX, para diferentes cenários de preços de créditos de carbono e incentivos governamentais previstos no marco regulatório do setor.

Agradecimentos: UTFPR e Fundação Araucária

Referências

- Agência Senado. (2024). *Brasil tem potencial para produzir 1,8 bilhão de toneladas de hidrogênio por ano*.
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. (2022). *Hidrogênio de baixo carbono: Oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa*.
- Brasil. (2024). *Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono e dá outras providências*. Presidência da República, Casa Civil.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2024). *Hydrogen and biomass*.
- Fajardy, M., e Mac Dowell, N. (2017). Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions? *Energy & Environmental Science*, 10(6), 1389–1426.

Georgiadis, A. G., et al. (2020). Removal of hydrogen sulfide from various industrial gases: A review of the most promising adsorbing materials. *Catalysts*, 10(5), 521.

International Energy Agency. (2019). *The future of hydrogen: Seizing today's opportunities*.

International Energy Agency. (2024). *Global hydrogen review 2024*.

International Organization for Standardization. (2019). *Hydrogen fuel quality — Product specification* (ISO Standard 14687).

International Renewable Energy Agency. (2022). *Geopolitics of the energy transformation: The hydrogen factor*.

Kemp, I. C. (2006). *Pinch analysis and process integration: A user guide on process integration for the efficient use of energy* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Koretsky, M. D. (2007). *Engineering and chemical thermodynamics*. Wiley.

Medeiros, D. W. (2023). *DWSIM - Open source process simulator*. DWSIM.org.

Moraes, B. S., Zaiat, M., e Bonomi, A. (2015). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 888–903.

Novochinskii, I. I., Song, C., Ma, X., Liu, X., Shore, L., Lampert, J. K., e Farrauto, R. J. (2004). Low-temperature H₂S removal from steam-containing gas mixtures with ZnO for fuel cell application. 1. ZnO particles and extrudates. *Energy & Fuels*, 18(2), 576–583.

Plakia, A., Papaioannou, C., e Grammelis, P. (2025). Thermodynamic and process modeling of CO₂ chemical absorption process using aqueous monoethanolamine and enzymatic potassium carbonate solvents: Validation and comparative analysis. *Energies*, 18(11), 2981.

Rostrup-Nielsen, J. R. (1984). Catalytic steam reforming. In J. R. Anderson e M. Boudart (Eds.), *Catalysis: Science and technology*. Springer.

SAE International. (2020). *Hydrogen fuel quality for fuel cell vehicles* (SAE Standard J2719_202003).

Smith, R. (2005). *Chemical process: Design and integration*. Wiley.

Xu, J., e Froment, G. F. (1989). Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics. *AIChE Journal*, 35(1), 88–96.