

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE METANOL VERDE A PARTIR DE CO₂ RECUPERADO DE USINAS DE ETANOL DE MILHO E H₂ VERDE EM MATO GROSSO: ANÁLISE TÉCNICO-AMBIENTAL

A. B. R. de Amorim¹, W. C e Silva²

¹Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Engenharia Química, Cuiabá–MT, Brasil (annamorimbeatriz@gmail.com)

²Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Engenharia Química, Cuiabá–MT, Brasil

Simulou-se, no DWSIM, a produção de metanol verde a partir de CO₂ biogênico de usinas de etanol de milho e H₂ solar (10,23 MW fotovoltaico, Cuiabá–MT). O processo produziu 670,4 kg h⁻¹ de metanol (99,41% molar), com eficiência de incorporação de carbono de 77,4%. A avaliação ambiental pelo algoritmo WAR indicou PEI total de ≈ 3,75 PEI h⁻¹, dominado por PCOP, HTPI e TTP. Mato Grosso apresenta potencial de 37.740 t CO₂ d⁻¹.

Palavras-chave: metanol verde; CO₂ biogênico; hidrogênio verde; etanol de milho; algoritmo WAR

INTRODUÇÃO

O metanol é uma plataforma química de elevada relevância industrial, empregada como intermediário na produção de formaldeído, ácido acético, dimetil éter (DME), metil-terc-butil éter (MTBE), olefinas e combustíveis sintéticos (IRENA, 2021). Apesar dessa relevância, sua produção ainda é majoritariamente associada a rotas fósseis baseadas em gás natural, carvão ou gás de síntese, o que motiva o desenvolvimento de rotas Power-to-Methanol (PtM) baseadas na hidrogenação de CO₂ com H₂ renovável (Roode-Gutzmer et al., 2019; IRENA, 2021). Nesse contexto, o uso de CO₂ biogênico como matéria-prima permite converter carbono previamente circulante na biosfera em produto químico de valor agregado, desde que a etapa de produção de hidrogênio seja suprida por eletricidade de baixa emissão (EPE, 2025; Bezerra, 2021).

A reação global de hidrogenação do CO₂ a metanol é $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$, sendo exotérmica e favorecida por pressões elevadas e temperaturas moderadas. Estudos de simulação e revisão indicam operação típica em condições próximas de 50–100 bar e 200–280 °C, com catalisadores à base de Cu/ZnO/Al₂O₃ (Van-Dal; Bouallou, 2013; Roode-Gutzmer et al., 2019; Borisut; Nuchitprasittichai, 2019). A originalidade desta proposta reside na integração entre: (i) CO₂ biogênico de fermentação de usinas de etanol de milho em Mato Grosso, corrente atrativa por sua elevada concentração e origem renovável (EPE, 2025); (ii) elevado potencial de

irradiação solar de Cuiabá–MT, compatível com dados nacionais do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017); e (iii) produção de H₂ por eletrólise alimentada por eletricidade fotovoltaica, rota reconhecida em estudos brasileiros sobre hidrogênio de baixo carbono e hidrogênio verde (EPE, 2021; Bezerra, 2021; EPE; ITAIPU PARQUETEC, 2025). A fermentação alcoólica ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2\text{CO}_2$) gera CO₂ biogênico que, sem captura e uso, seria emitido à atmosfera (EPE, 2025; Dees et al., 2023).

O presente estudo tem como objetivos: (a) simular em regime estacionário, no DWSIM, uma rota de produção de metanol verde integrando CO₂ biogênico e H₂ solar; (b) quantificar os principais indicadores técnicos do processo; (c) realizar avaliação ambiental preliminar pelo algoritmo WAR; e (d) mapear a disponibilidade regional de CO₂ biogênico em Mato Grosso como subsídio à análise de escalabilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Simulação de processo no DWSIM

A simulação foi realizada no DWSIM, simulador de processos químico de código aberto, em regime estacionário (Andreasen, 2022; DWSIM, 2026). O fluxograma incluiu: geração de H₂ por eletrólise, compressão de H₂ e CO₂, mistura dos reagentes, aquecimento, conversão a metanol em reator estequiométrico, resfriamento, separação gás-líquido, reciclo com purga e destilação metanol-água. A

escolha do DWSIM é coerente com estudos acadêmicos sobre hidrogenação de CO₂ a metanol e modelagem da integração entre eletrólise, H₂ renovável e conversão a metanol (Leandro Junior, 2021; Oliveira, 2024; Chinchkar et al., 2025). A seção reacional foi simulada com Peng–Robinson, modelo adequado para misturas gasosas sob pressão, enquanto a destilação metanol–água foi representada por NRTL, apropriado para fase líquida não ideal. A rota e as condições operacionais foram fundamentadas em estudos de simulação e otimização da hidrogenação de CO₂ a metanol (Van-Dal; Bouallou, 2013; Borisut; Nuchitprasittichai, 2019). O reator foi modelado como Conversion Reactor com 30% de conversão de CO₂ por passe, operando a 250 °C e 75 bar. Os principais parâmetros estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais parâmetros adotados no fluxograma simulado no DWSIM.

Parâmetro	Valor adotado
Pacote termodinâmico (reação)	Peng–Robinson
Pacote termodinâmico (destilação)	NRTL
Tipo de reator	Conversion Reactor
Conversão de CO ₂ por passe	30%
Temperatura do reator	250 °C
Pressão do reator	75 bar
Irradiância solar (Cuiabá–MT)	0,6 kW m ⁻²
Painéis fotovoltaicos	30.990 (2,5 m ² cada; ef. 22%)
Potência para eletrólise	10.226,7 kW
Eletrolisador	4.210 células, 7.500 V, 1.363,56 A
Eficiência do eletrolisador	75%
Estágios da coluna / refluxo	30 estágios; alim. estágio 15; R = 4

Fonte regional de CO₂ biogênico

A disponibilidade de CO₂ foi estimada com base na capacidade instalada de produção de etanol em Mato Grosso, usando fator de geração de 0,75 t CO₂ por m³ de etanol produzido, valor compatível com a estequiometria da fermentação e com dados setoriais brasileiros para CO₂ biogênico na bioenergia (EPE, 2025). O uso de CO₂ de fermentação é tecnicamente vantajoso por envolver correntes mais concentradas que emissões industriais diluídas, reduzindo a complexidade de separação antes da etapa de conversão química (EPE, 2025; Dees et al., 2023). Foram identificadas 25 unidades no estado, com capacidade potencial total de 37.740 t CO₂ d⁻¹. Os principais polos estão listados na Tabela 4 (Seção de Resultados).

Avaliação ambiental pelo algoritmo WAR

A avaliação ambiental foi conduzida com o algoritmo WAR (Waste Reduction Algorithm) 1.0, desenvolvido pela EPA, que calcula o Potencial de Impacto Ambiental (PEI) das correntes do processo em oito categorias: toxicidade humana por ingestão (HTPI), toxicidade humana por exposição (HTPE), toxicidade terrestre (TTP), toxicidade aquática (ATP), aquecimento global (GWP), depleção de ozônio (ODP), formação de oxidantes fotoquímicos (PCOP) e acidificação (AP), conforme Tabela 2 (Young; Cabezas, 1999, 2000; EPA, 2026). Os dados de vazão e composição do DWSIM foram exportados para o WAR GUI 1.0, calculando-se índices de PEI de saída (Iout) e de geração (Igen) em base de tempo (PEI h⁻¹) e de massa de produto (PEI kg⁻¹). A aplicação do WAR a processos de síntese de metanol é consistente com estudos recentes que quantificam impactos potenciais de rotas metanol-síntese por meio de PEI (Pak; Hong, 2025).

Tabela 2 – Categorias de Potencial de Impacto Ambiental (PEI) do algoritmo WAR.

Categoria	Sigla	Natureza do impacto
Toxicidade humana por ingestão	HTPI	Efeitos via ingestão de substâncias
Toxicidade humana por exposição	HTPE	Efeitos via inalação/contato dérmico
Toxicidade terrestre	TTP	Efeitos sobre organismos terrestres
Toxicidade aquática	ATP	Efeitos sobre organismos aquáticos
Aquecimento global	GWP	Contribuição relativa ao CO ₂
Depleção de ozônio	ODP	Destruição do ozônio estratosférico
Formação de oxidantes fotoquímicos	PCOP	Formação de ozônio troposférico (smog)
Acidificação	AP	Acidificação atmosférica (chuva ácida)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho do reator e balanço material

A corrente alimentada ao reator apresentou vazão total de 4.319,53 kg h⁻¹, com razão molar H₂/CO₂ de ≈ 6,85, superior à estequiométrica de 3, em função da recirculação e do excesso de H₂ produzido pela eletrólise. Após o reator, obteve-se 23,53 kmol h⁻¹ de metanol (753,87 kg h⁻¹ de CH₃OH na corrente bruta), com remoção de ≈ 369 kW, coerente com o caráter exotérmico da síntese de metanol por hidrogenação de CO₂ (Van-Dal; Bouallou, 2013; Roode-Gutzmer et al., 2019). A purga apresentou 86,94 kg h⁻¹ de H₂, 219,01 kg h⁻¹ de CO₂ e 5,82 kg h⁻¹ de metanol, indicando

oportunidade de otimização futura da razão reciclo/purga, variável reconhecidamente relevante em estudos de simulação e otimização da rota CO₂–metanol (Borisut; Nuchitprasittichai, 2019; Leandro

Junior, 2021). As informações podem ser observadas no fluxograma, apresentado nas figuras 1 e 2 (antes e após o misturador).

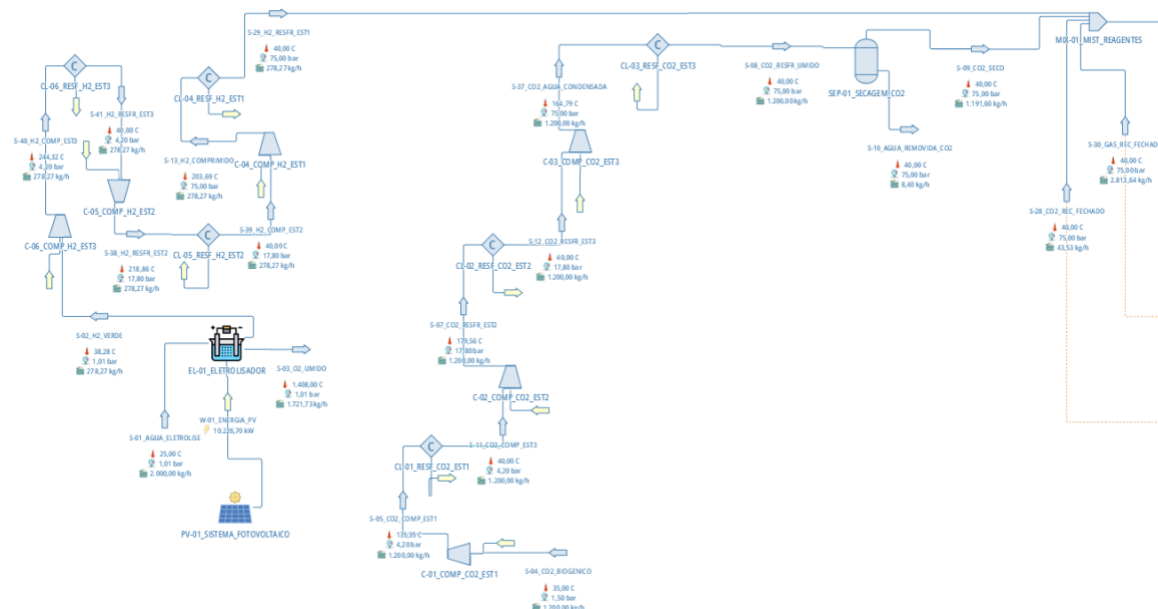


Figura 1 – Fluxograma da eletrólise de H₂ a partir de energia solar; secagem de CO₂ de fermentação.

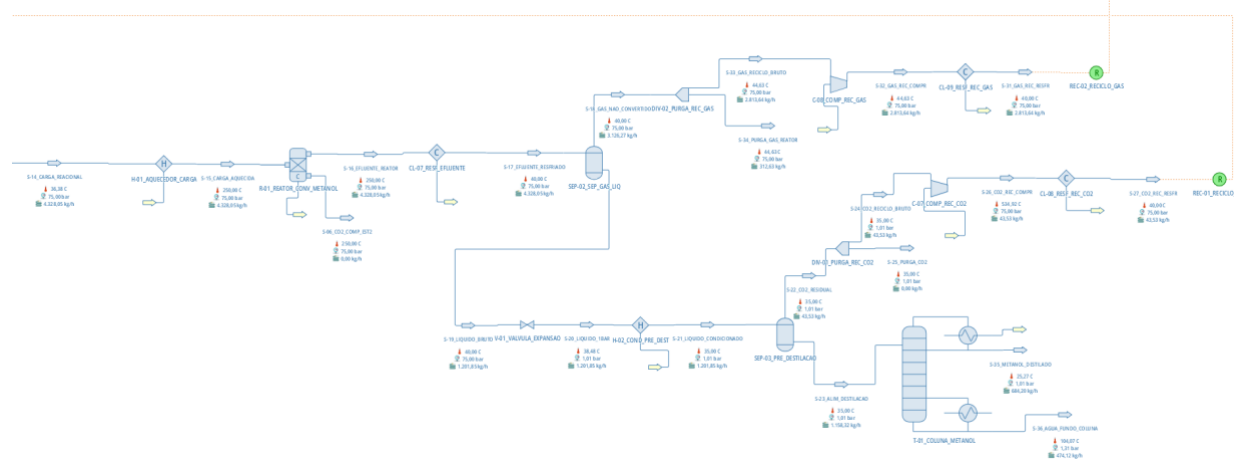


Figura 2 – Fluxograma de síntese de metanol verde e secagem.

Destilação e produção final

A coluna de destilação (30 estágios, refluxo = 4, NRTL) recebeu 1.151,74 kg h⁻¹ de líquido com ≈ 690,90 kg h⁻¹ de metanol e 455,43 kg h⁻¹ de água. Cargas térmicas do condensador e retervedor foram ≈ 1.238 kW e ≈ 1.262 kW, respectivamente. A necessidade de purificação metanol–água é inerente à reação CO₂ + H₂, uma vez que a água é coproduto estequiométrico da síntese de metanol (Van-Dal; Bouallou, 2013; Roode-Gutzmer et al., 2019). O topo produziu 670,38 kg h⁻¹ de metanol com pureza molar

de 99,41% (fração molar xMeOH = 0,9941). A eficiência de incorporação de carbono foi calculada por:

$$\eta_c = \frac{n_{\text{MeOH, topo}}}{n_{\text{CO}_2, \text{ fresco}}} \times 100 \quad (1)$$

Portanto:

$$\eta_c = \frac{20,92}{27,03} \times 100 \approx 77,4$$

(2)

Os indicadores técnico-ambientais consolidados estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Indicadores técnico-ambientais do caso base simulado.

Indicador	Resultado	Interpretação
CO ₂ fresco alimentado	1.189,5 kg h ⁻¹	Fonte biogênica de fermentação
H ₂ gerado na eletrólise	215,89 kg h ⁻¹	Produzido por eletrólise solar
Razão molar H ₂ /CO ₂ (entrada reator)	≈ 6,85	Excesso estequiométrico
Calor removido no reator	≈ 369 kW	Coerente com o caráter exotérmico da síntese de metanol
Metanol produzido (topo da coluna)	670,4 kg h ⁻¹ (xMeOH = 0,9941)	Alta pureza no topo da coluna
Carga térmica do condensador	≈ 1.238 kW	Demanda de resfriamento do topo da coluna
Carga térmica do refeedor	≈ 1.262 kW	Demanda térmica da etapa de destilação
Eficiência de incorporação de carbono (ηC)	≈ 77,4%	Carbono fresco convertido a metanol (nMeOH, topo / nCO ₂ , fresco)
Demanda energética específica (solar/eletrólise)	15,25 kWh kgMeOH ⁻¹	Principal demanda energética do processo (etapa eletrolítica)
PEI total de saída (WAR, base E-methanol)	≈ 3,75 PEI h ⁻¹	Impacto potencial das correntes de saída; dominado por PCOP, HTPI e TTP
PEI específico de saída (Iout, por massa)	≈ 0,0055 PEI kg ⁻¹	Índice por massa de produto; linha de base para comparações futuras
PEI específico de geração (Igen, por massa)	≈ 0,0050 PEI kg ⁻¹	Impacto gerado internamente ao processo (razão Igen/Iout ≈ 0,92)

Disponibilidade regional de CO₂ biogênico

O mapeamento de Mato Grosso identificou 25 unidades produtoras de etanol com capacidade potencial total de 37.740 t CO₂ d⁻¹ (base dezembro/2025). A escala simulada utilizou ≈ 28,55 t CO₂ d⁻¹, de modo que a capacidade mapeada seria

suficiente para alimentar mais de 1.300 módulos equivalentes. A estimativa regional deve ser interpretada como extrapolação própria a partir das capacidades de produção de etanol e do fator de geração de CO₂ de fermentação; a EPE sustenta o fator técnico e o enquadramento do CO₂ biogênico na bioenergia, mas não substitui a planilha de cálculo regional do presente estudo (EPE, 2025). Os principais polos produtores são listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais polos de capacidade potencial de geração de CO₂ em Mato Grosso.

Polo produtor (município)	Capacidade estimada de CO ₂ (t d ⁻¹)
Sinop	9.000
Sorriso	5.313,75
Nova Mutum	3.375
Primavera do Leste	3.375
Lucas do Rio Verde	2.724,75
Alto Taquari	2.400
Nova Olímpia	2.268,75
Campos de Júlio	1.852,5
Barra do Bugres	1.815
Campo Novo do Parecis	1.702,5

Avaliação ambiental pelo algoritmo WAR

A Figura 3 apresenta a distribuição das taxas de PEI de saída por categoria de impacto para a corrente E-methanol. O impacto total de saída foi de ≈ 3,75 PEI h⁻¹, dominado por PCOP (≈ 2,29 PEI h⁻¹), HTPI (≈ 0,72 PEI h⁻¹) e TTP (≈ 0,72 PEI h⁻¹). As demais categorias (HTPE, ATP, GWP, ODP, AP) apresentaram contribuições próximas de zero. A interpretação desses resultados foi realizada segundo a estrutura metodológica do WAR, que atribui fatores de impacto às substâncias presentes nas correntes materiais e permite comparar alternativas de processo em termos de PEI (Young; Cabezas, 1999, 2000; EPA, 2026). A predominância de PCOP é coerente com a presença de metanol em corrente de produto, uma vez que compostos orgânicos voláteis podem contribuir para a formação de oxidantes fotoquímicos quando emitidos à atmosfera; contudo, essa interpretação deve ser entendida como potencial de impacto da corrente, não como emissão real do processo fechado.

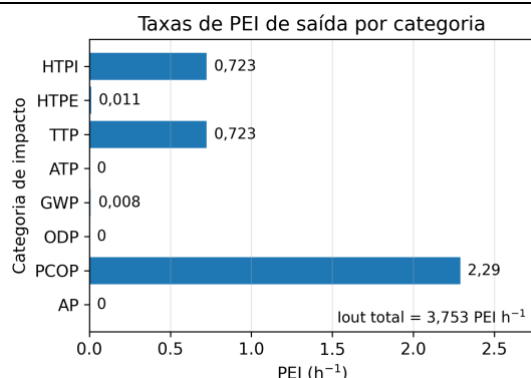


Figura 3 – Taxas de PEI de saída por categoria de impacto (PEI h⁻¹) para a corrente E-methanol, calculadas pelo algoritmo WAR 1.0.

A Figura 4 apresenta os índices globais Iout e Igen em base de tempo e de massa de produto. Em base de tempo, Iout $\approx 3,75$ PEI h⁻¹ e Igen $\approx 3,43$ PEI h⁻¹. Em base de massa, Iout $\approx 0,0055$ PEI kg⁻¹ e Igen $\approx 0,0050$ PEI kg⁻¹. A razão Igen/Iout $\approx 0,92$ sugere que o processo não atua como gerador líquido expressivo de impacto adicional, comportamento desejável segundo a lógica do algoritmo WAR (Young; Cabezas, 1999, 2000). Como comparação metodológica, Pak e Hong (2025) demonstram a utilidade do WAR para quantificar PEI em processos de síntese de metanol; entretanto, comparações numéricas diretas devem ser feitas com cautela, pois dependem de escala, composição das correntes, fronteiras do sistema e configuração de reciclo.

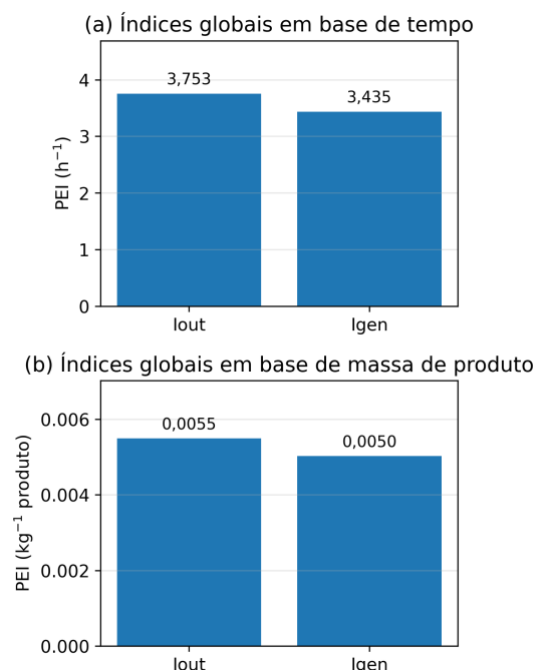


Figura 4 – Índices globais Iout e Igen: (a) em base de tempo (PEI h⁻¹) e (b) em base de massa de produto (PEI kg⁻¹), calculados pelo algoritmo WAR 1.0.

A contribuição praticamente nula do GWP nas correntes materiais não deve ser interpretada como ausência de impacto climático: o algoritmo WAR avalia o potencial das correntes materiais de saída, não contabilizando integralmente emissões associadas à geração de energia elétrica, construção de equipamentos, produção de painéis fotovoltaicos ou cadeia agrícola do milho (Young; Cabezas, 2000; EPA, 2026). Esse aspecto reforça a necessidade de ACV completa em trabalhos futuros.

Avaliação ambiental preliminar do ciclo de vida

O CO₂ utilizado é biogênico, proveniente da fermentação alcoólica, com vantagem técnica em relação a fontes fósseis diluídas pela menor complexidade de separação e pela possibilidade de integração com cadeias de bioenergia já existentes no Brasil (EPE, 2025; Dees et al., 2023). O H₂ foi considerado verde por ser produzido via eletrólise solar, condição essencial para a sustentabilidade do processo; caso produzido por reforma a vapor sem captura, os benefícios climáticos seriam fortemente reduzidos (IRENA, 2020; EPE, 2021; Bezerra, 2021). O consumo energético específico da etapa solar/eletrolítica foi de 15,25 kWh kg⁻¹ de metanol, evidenciando o peso dominante da produção de H₂ no balanço ambiental, em concordância com estudos de rotas Power-to-Methanol e modelagem de eletrólise associada à conversão para metanol (IRENA, 2021; Oliveira, 2024).

Como limitação, não foi realizada ACV completa, excluindo emissões associadas à construção de painéis, produção do eletrolisador, transporte, compressão complementar, destinação de purga e emissões agrícolas da cadeia do milho. A formulação mais adequada é caracterizar o processo como rota de potencial redução de emissões, cujo balanço material apresenta baixo potencial de impacto pelo algoritmo WAR, mas cuja intensidade de carbono efetiva depende da origem da eletricidade, da eficiência real da eletrólise e das fronteiras adotadas na avaliação ambiental (IRENA, 2020; IRENA, 2021; EPE; ITAIPU PARQUETEC, 2025).

Análise econômica: limitação e próximos passos

Não foi realizada análise econômica nesta etapa. Essa ausência é relevante porque rotas Power-to-Methanol são fortemente sensíveis ao custo da eletricidade renovável, ao CAPEX do eletrolisador, ao fator de capacidade, ao custo de compressão, à disponibilidade de CO₂ biogênico e à escala da planta. A literatura aponta que o e-metanol ainda tende a apresentar custo superior ao metanol fóssil, sendo o custo do H₂ verde e da eletricidade os principais fatores de competitividade (IRENA, 2021; IRENA,

2020). Assim, os resultados técnicos e de PEI não devem ser traduzidos diretamente em competitividade econômica. Como próximo passo, seria interessante estimar CAPEX e OPEX por módulos, custo nivelado de H₂, custo específico do metanol (US\$ tMeOH⁻¹), receita potencial por crédito de carbono ou produto renovável, sensibilidade ao preço da eletricidade e comparação com o custo de metanol fóssil ou importado.

CONCLUSÃO

A simulação demonstrou viabilidade técnica preliminar da produção de metanol verde a partir de CO₂ biogênico de usinas de etanol de milho e H₂ solar em Mato Grosso. O modelo em DWSIM gerou 670,4 kg h⁻¹ de metanol com pureza molar de 99,41%, a partir de 1.189,5 kg h⁻¹ de CO₂ fresco, com eficiência de incorporação de carbono de 77,4%. A demanda energética específica da eletrólise foi de 15,25 kWh kg⁻¹ de metanol.

A avaliação pelo algoritmo WAR indicou PEI total de saída de $\approx 3,75$ PEI h⁻¹, dominado por PCOP, HTPI e TTP, com contribuições desprezíveis para GWP, AP e ODP nas correntes avaliadas. Os índices específicos (Iout $\approx 0,0055$ PEI kg⁻¹; Igen $\approx 0,0050$ PEI kg⁻¹) fornecem linha de base quantitativa para comparações futuras, desde que respeitadas as mesmas fronteiras de sistema e a mesma base de cálculo (Young; Cabezas, 1999, 2000; Pak; Hong, 2025). O mapeamento regional indicou capacidade potencial de 37.740 t CO₂ d⁻¹ em Mato Grosso, suficiente para mais de 1.300 módulos equivalentes. A rota é promissora como estratégia de aproveitamento de CO₂ biogênico, desde que associada a eletricidade efetivamente renovável e complementada por ACV completa em trabalhos futuros (EPE, 2025; IRENA, 2021).

REFERÊNCIAS

- ANDREASEN, Anders. Evaluation of an open-source chemical process simulator using a plant-wide oil and gas separation plant flowsheet model as basis. **Periodica Polytechnica Chemical Engineering**, v. 66, n. 3, p. 503-511, 2022.
- BEZERRA, F. D. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n. 212, dez. 2021. (Caderno Setorial ETENE).
- BORISUT, Pornsiriri; NUCHITPRASITTICHA, Aroonsri. Methanol Production via CO₂ Hydrogenation: Sensitivity Analysis and Simulation-Based Optimization. **Frontiers in Energy Research**, v. 7, art. 81, 2019.
- CHINCHKAR, R. et al. Environmental Impact of CO₂ to Methanol Conversion via Hydrogenation in DWSIM Software. In: AHAMMED, M.; KHARE, M. (ed.).
- Sustainable Waste Management Practices, Volume 2**. Lecture Notes in Civil Engineering, v. 732. Singapore: Springer, 2025. p. 249-259.
- DEES, J. et al. Cost and life cycle emissions of ethanol produced with an oxyfuel boiler and carbon capture and storage. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 13, p. 5391-5403, 2023.
- DWSIM. DWSIM: Open Source Chemical Process Simulator. Disponível em: <https://dwsim.org/>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. Brasília: EPE, 2021.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Caderno CO₂ Biogênico na Bioenergia**. Brasília: EPE, 2025.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); ITAIPU PARQUETEC. **Roadmap tecnológico de hidrogênio: rotas tecnológicas, oportunidades de inovação e custos de produção de hidrogênio de diferentes intensidades de carbono no Brasil**. Brasília: EPE, 2025.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal**. Abu Dhabi: IRENA, 2020.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Innovation Outlook: Renewable Methanol**. Abu Dhabi: IRENA, 2021.
- LEANDRO JUNIOR, A. O. **Síntese de metanol via hidrogenação do dióxido de carbono: modelagem e otimização no simulador DWSIM**. 2021.
- OLIVEIRA, V. N. S. **Estudo de modelagem e simulação sobre a produção de hidrogênio por eletrólise alcalina e sua conversão para metanol**. 2024. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- PAK, Kyung Soo; HONG, Won Hi. Potential Environmental Impact Evaluation of the Methanol Synthesis Process by Gas-to-Methanol Technology. **ACS Omega**, v. 10, n. 12, p. 12745-12754, 2025.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.
- ROODE-GUTZMER, Q. I.; KAISER, D.; BERTAU, M. Renewable methanol synthesis. **ChemBioEng Reviews**, v. 6, n. 6, p. 209-236, 2019.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Waste Reduction Algorithm: Chemical Process Simulation for Waste Reduction**. Washington, DC: EPA, 2026. Disponível em: <https://www.epa.gov/chemical-research/waste-reduction->

algorithm-chemical-process-simulation-waste-reduction.
Acesso em: 14 jun. 2026.

VAN-DAL, Érika S.; BOUALLOU, Chakib. Design and simulation of a methanol production plant from CO₂ hydrogenation. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 38-45, 2013.

YOUNG, David M.; CABEZAS, Heriberto. Designing sustainable processes with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm. **Computers & Chemical Engineering**, v. 23, n. 10, p. 1477-1491, 1999.

YOUNG, David M.; CABEZAS, Heriberto. The waste reduction (WAR) algorithm: environmental impacts, energy consumption, and engineering economics. **Waste Management**, v. 20, n. 8, p. 605-615, 2000.