XXVIII SNPTEE 2025
Seminário Nacional de Produção

## GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

# Avaliação Técnica de Rotas Tecnológicas para Produção de Combustíveis Sintéticos com Integração de $CO_2$ Biogênico Proveniente de Usina Termoelétrica

**Felipe Godoy Righetto (1), Vinícius Caleffi (1), Danielly Norberto Araújo (1), Ricardo Cerqueira Medrado (1), Vinícius Bastos Resende (2), Lucas Neves Peiter (2), Priscila Telles (2), Maria Fernanda Ramos Zeni (2)**
**SENAI CIMATEC (1), ENGIE BRASIL ENERGIA (2)**

## RESUMO

A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis destaca os combustíveis sintéticos neutros em carbono como opções promissoras para descarbonizar setores diversos. Esses combustíveis podem ser produzidos a partir de hidrogênio verde e carbono capturado de fontes biogênicas, promovendo um ciclo fechado de carbono. A produção em larga escala desses combustíveis enfrenta diversos desafios, incluindo eficiência e integração tecnológica. Este estudo avaliou, por meio de simulações no software EES (*Engineering Equation Solver*), o desempenho energético de duas rotas tecnológicas para produção de metanol utilizando dióxido de carbono ($CO_2$) biogênico de uma Usina Termoelétrica (UTE) movida a biomassa. Na rota A, o $CO_2$ é capturado por absorção química em pós-combustão e o metanol é produzido por hidrotratamento. Na rota B, utiliza-se o método da oxicombustão para aumentar a concentração de $CO_2$ nos gases de exaustão, seguido de captura criogênica e a síntese de metanol por Fischer-Tropsch. Ambas as rotas empregam eletrolisadores alcalinos para produção de hidrogênio, tendo o oxigênio como subproduto. A rota A consome 137 kg de $H_2$ e 9,8 MWh de energia para produzir 530 kg de metanol por tonelada de $CO_2$, com eficiência energética de 29,8% para o produto final e eficiência total de 56,9% considerando os subprodutos. A rota B requer 146 kg de $H_2$ e 10,6 MWh de energia para produzir 444 kg de metanol, com eficiência energética do produto final de 23,1% e total de 48,5%. Assim, os resultados indicam que, apesar do elevado consumo energético, há oportunidades de otimização e integração de tecnologias de captura de carbono e produção de hidrogênio para produção de combustíveis sintéticos.

## PALAVRAS-CHAVE

Combustíveis Sintéticos, Metanol, Usina Termoelétrica, Captura de Carbono, Hidrogênio Verde

## 1.0 INTRODUÇÃO

Historicamente, as metas ambientais têm focado na limitação das emissões absolutas e na redução das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. No entanto, com o crescente reconhecimento da gravidade das mudanças climáticas, os objetivos para mitigar os efeitos dos GEE estão se tornando cada vez mais específicos, evoluindo para metas de emissões líquidas zero (net-zero), ou seja, para o equilíbrio entre a quantidade de GEE emitidos e a quantidade removida da atmosfera [1].

Assim, nos últimos anos, foram estabelecidas regulamentações voluntárias e obrigatórias e, com base no acordo de Paris estabelecido na 21ª Conferência das Partes (COP21), alguns países têm como objetivo, por exemplo, alcançar um sistema de emissões líquidas nulas até 2050 – 2070 [2]. Baseado nisso, tem sido crescente a procura por soluções para viabilizar e potencializar a descarbonização, incluindo a substituição do carbono emitido por fontes fósseis por aquele produzido de forma sintética e sustentável com o uso de energias renováveis. Nesse contexto, combustíveis sintéticos sustentáveis surgem como uma alternativa viável e estratégica, pois possibilitam a substituição de combustíveis fósseis enquanto mantêm a infraestrutura existente para distribuição e uso [3].

Os combustíveis sintéticos, ou *e-fuels*, podem ser produzidos de maneira sustentável a partir de hidrogênio e carbono capturado da atmosfera ou de fontes biogênicas. Assim, há diferentes rotas de produção desses combustíveis, no entanto, de forma geral, o processo de produção desses combustíveis envolve etapas como a produção de hidrogênio, captura de carbono e conversão em combustíveis. Quando o hidrogênio é produzido através da eletrólise da água com o uso de fontes renováveis e o carbono é obtido de uma fonte neutra, o combustível sintético é considerado sustentável [4].

Com isso, o uso do carbono biogênico garante que o uso do combustível sintético não contribua com emissões adicionais de GEE, estabelecendo, portanto, o ciclo fechado de carbono. Carbono biogênico se refere ao carbono que foi absorvido e armazenado por uma matéria de origem biológica, ou seja, a biomassa, que quando liberado na atmosfera não contribui com o aumento líquido de gases na atmosfera. Assim, a partir da captura de carbono da queima da biomassa e do hidrogênio obtido de fontes renováveis, a produção de combustível sintético contribui para o conceito de net-zero, tendo em vista que o carbono emitido pela combustão desse produto é o mesmo removido da atmosfera durante o crescimento da biomassa [5].

Apesar dos benefícios, a produção em larga escala de combustíveis sintéticos enfrenta uma série de desafios. Os altos custos de produção, a necessidade de regulamentações específicas, a integração de tecnologias avançadas e a garantia de eficiência em processos complexos são apenas algumas das barreiras que dificultam sua ampla implementação. Além disso, o mapeamento e a avaliação das diferentes rotas tecnológicas ainda são escassos, sendo a maioria dos projetos atualmente em estágio de demonstração, conforme apontado pela Agência Internacional de Energia (IEA) [6].

Nesse sentido, o presente estudo concentra-se na investigação e avaliação de rotas tecnológicas para produção de combustíveis sintéticos, com foco em metanol, aderentes à infraestrutura de uma Usina Termoelétrica (UTE) movida à biomassa. Essas rotas serão analisadas e comparadas em termos de consumo de carbono biogênico, demanda energética, metanol e subprodutos produzidos e eficiência energética. Para subsidiar os desenvolvimentos do estudo, foram utilizados dados de operação da UTE Ferrari da ENGIE Brasil Energia, que possui capacidade instalada de 80,5 MW e gera energia elétrica e vapor d'água a partir da fonte de biomassa da cana-de-açúcar.

## 2.0 PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS

Há diferentes rotas tecnológicas para produção de combustíveis sintéticos considerando a combinação do hidrogênio e o CO2/CO, bem como o combustível desejado como produto final do processo. Considerando um combustível sintético sustentável, no caso, o metanol, o hidrogênio e toda a energia necessária para o processo de produção dos combustíveis são provenientes de fontes renováveis de energia. Além disso, o CO2 utilizado é aquele emitido e capturado de processos de conversão da

biomassa. Em seguida, o combustível é sintetizado por meio de processos como Fischer-Tropsch e hidrotratamento [4]. Assim sendo, essa seção tem como objetivo apresentar os conceitos, as tecnologias e os métodos necessários de serem entendidos no contexto dos combustíveis sintéticos, com foco em metanol.

## 2.1 Biomassa como Fonte de Carbono Biogênico e Captura de Carbono

Sabendo que os combustíveis sintéticos requisitam CO/CO2 como matéria prima, considerando os processos de conversão da biomassa, as tecnologias Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS, *Carbon Capture, Utilization, and Storage*) são essenciais para garantir a sustentabilidade do combustível. Ao utilizar essas tecnologias, o CO2 biogênico emitido pela conversão da biomassa é capturado e utilizado no processo de produção de combustíveis, fechando o ciclo de carbono [7].

Em usinas de geração de energia elétrica, as tecnologias de CCUS podem capturar entre 85% e 95% do CO2 produzido [4]. No entanto, levando em consideração usinas termoelétricas movidas a biomassa, além do CO2 emitido durante a combustão da biomassa, os gases de exaustão da usina também podem conter nitrogênio, vapor de água, sulfeto de hidrogênio, CO, matéria particular, hidrocarbonetos não queimados, óxidos de enxofre (SOx) e óxidos de nitrogênio (NOx), em que métodos são utilizados para facilitar a captura e a separação do gás de interesse para a produção do combustível sintético [8].

A depender do momento do processo de combustão da biomassa em que o CO2 será capturado, há diversos métodos possíveis de serem aplicados, tais como: pré-combustão, pós-combustão, oxi-combustão. Na pré-combustão, o CO2 é capturado antes da combustão, no processo de conversão do combustível em gás de síntese. Na pós-combustão, o CO2 é capturado após a combustão. Já a oxi-combustão ocorre utilizando oxigênio puro ou enriquecido para aumentar a concentração de CO2 nos gases de exaustão e facilitar a sua captura. Em relação ao nível de maturidade tecnológica, a pré-combustão e a pós-combustão são métodos já comerciais, enquanto a oxi-combustão está em desenvolvimento. A depender do método utilizado, algumas tecnologias podem ser mais adequadas do que outras [8].

As principais técnicas de captura de carbono incluem absorção química, separação por membrana, looping químico, adsorção física e destilação criogênica, sendo a absorção química e a destilação criogênica as soluções mais interessantes para essa pesquisa. A absorção química é a tecnologia de captura de carbono mais madura, em que o processo ocorre em duas etapas principais: absorção do $CO_2$ em solventes químicos e posterior dessorção por aumento de temperatura para regeneração do solvente e liberação do $CO_2$. Embora eficiente, apresenta desafios como a necessidade de purificação dos gases de combustão para evitar a degradação dos solventes e o alto consumo de energia, visto que o consumo energético independe da qualidade dos gases de exaustão a terem o carbono capturado, o que pode ser interessante para gases de baixa concentração de CO2 [9].

Por sua vez, a destilação criogênica captura $CO_2$ ao comprimir e resfriar os gases de exaustão, utilizando altas pressões e baixas temperaturas para liquefazer o $CO_2$ e separá-lo de outros compostos. As principais vantagens da separação criogênica de $CO_2$ incluem a ausência de reagentes químicos e a facilidade de transporte do $CO_2$, que é obtido diretamente na fase líquida. Além disso, o consumo energético da captura criogênica depende da concentração de CO2 nos gases de origem do carbono a ser capturado, quanto maior a concentração de CO2 nos gases, menor é o consumo energético específico. Já a principal desvantagem dessa tecnologia é que ela se encontra em estágios iniciais de desenvolvimento (TRL baixo) [10].

## 2.2 Produção de Hidrogênio Verde

A produção de hidrogênio verde pode ser realizada por diversas rotas tecnológicas, cada uma com suas particularidades em termos de eficiência, sustentabilidade e requisitos de infraestrutura. Nos últimos anos, tem-se destacado a rota da eletrólise, que é um processo eletroquímico e ocorre em reatores chamados eletrolisadores. O método da eletrólise da água a partir de fontes renováveis de energia é um dos mais limpos, onde o único subproduto gerado é o oxigênio ($O_2$), eliminando a emissão de dióxido de carbono ($CO_2$). Há diferentes tecnologias de eletrolisadores que podem ser aplicadas para produção

de hidrogênio em larga escala, essas tecnologias diferenciam-se pelo eletrólito utilizado no processo. A tecnologia mais madura é a eletrólise alcalina, amplamente utilizada em aplicações industriais.

2.3 Produção de Metanol

O metanol pode ser produzido a partir de várias fontes, sendo atualmente produzido principalmente por gás natural e carvão. Atualmente a produção global de metanol é de 98 milhões de toneladas por ano, emitindo 0,3 gigatoneladas de $CO_2$ anualmente, e deve aumentar para 500 milhões de toneladas até 2050, potencialmente liberando 1,5 gigatoneladas de CO2 por ano [11]. Embora majoritariamente derivado de combustíveis fósseis, o metanol pode ser produzido a partir de biomassa, biogás, resíduos industriais e $CO_2$ capturado [3].

O metanol produzido por qualquer uma dessas rotas apresenta as mesmas características químicas do metanol convencional, sendo classificado conforme sua origem. O metanol verde ou e-metanol refere-se ao produzido da síntese de hidrogênio obtido de fontes renováveis e do dióxido de oxigênio biogênico capturado. Há duas principais formas de produzir metanol por meio da síntese de hidrogênio e dióxido de carbono, sendo essas: Hidrotratamento e Fischer-Tropsch [3]. Abaixo são apresentadas reações químicas que ocorrem nos processos citados:

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \quad (1)$$

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \quad (2)$$

O hidrotratamento, equação (1), converte CO2 e $H_2$, na proporção 1:3, em metanol em temperaturas ideais entre 470 K e 490 K, com alta seletividade e conversão, em que o processo ocorre sob pressão de 30 bar. Nesse processo, além do metanol, são formados subprodutos como metano e formato de etila. Por isso, o controle rigoroso da temperatura é essencial para minimizar a formação desses subprodutos [13]. Já o processo de Fischer-Tropsch, equação (2), converte monóxido de carbono (CO) e hidrogênio ($H_2$) em metanol, utilizando catalisadores à base de ferro ou cobalto. O processo é complexo e requer controle rigoroso das condições de reação para minimizar a formação de subprodutos indesejados [14].

## 3.0 METODOLOGIA

3.1 Rotas Tecnológicas para Produção de Combustíveis Sintéticos Avaliadas

Foram propostas duas rotas que aproveitem o carbono biogênico dos gases de exaustão de uma UTE para a síntese de metanol, de modo que as tecnologias das principais operações unitárias do processo de produção são indicadas e avaliadas. A primeira rota, denominada Rota A, realiza um pré-tratamento dos gases de exaustão por meio de filtro manga e do resfriador de contato direto, a fim de retirar o material particulado e o NOx presente nos gases de exaustão. Após o pré-tratamento, os gases são direcionados para a captura de carbono, que será realizada por absorção química, utilizando MEA como fluido. O carbono capturado é então reagido com o hidrogênio verde no processo de hidrotratamento, produzindo metanol e subprodutos, que são separados em uma coluna de destilação. A Rota A pode ser observada na Figura 1.

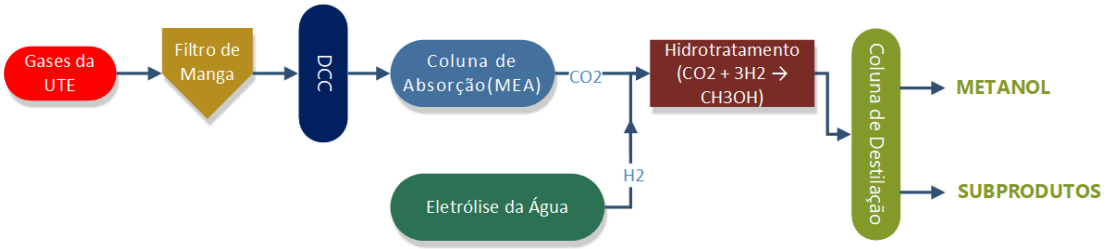



Figura 1: Fluxograma simplificado da rota A – produção de metanol por hidrotratamento

Já a segunda rota, denominada Rota B, inicia o processo de produção com o aproveitamento do oxigênio gerado no eletrolisador para aumentar a concentração de CO2 nos gases de exaustão (redução do nitrogênio obtida pela troca de ar por O2 puro). Após essa etapa, os gases de exaustão passam pelo mesmo pré-tratamento que a Rota A, e seguem para a destilação criogênica, que se beneficia dos altos níveis de CO2 nos gases exausto. O CO2 é então enviado para um reator RWGS (*Reverse Water-Gas Shift*), que tem como finalidade converter o CO2 em CO, utilizando hidrogênio verde no processo. Esse processo é importante, pois a reação que produz metanol é o processo de Fischer-Tropsh, que demanda CO e H2. A Figura 2 exemplifica a Rota B.

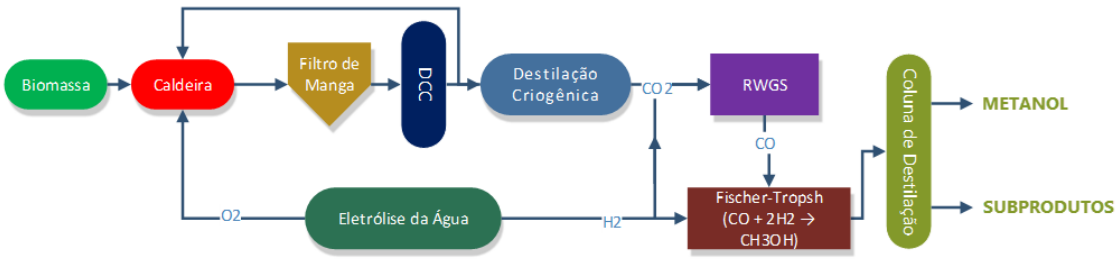



Figura 2: Fluxograma simplificado da rota B – produção de metanol por Fischer-Tropsch

3.3 Modelagem e Simulação das Rotas Tecnológicas

As simulações das rotas tecnológicas para produção de metanol foram realizadas por meio da utilização do *software* EES, que é um programa computacional voltado para resolver numericamente equações algébricas e diferenciais não lineares acopladas, e realizar análises de propriedades termodinâmicas. Para estruturar a modelagem no EES de cada um dos processos e etapas, foram elaborados fluxogramas de simulação que representam graficamente as rotas. Esses fluxogramas foram criados com o objetivo de organizar o fluxo de massa e energia, facilitar o desenvolvimento do código implementado e permitir uma melhor visualização dos processos. As simulações foram realizadas separadamente para cada uma das rotas e buscou identificar:

- Consumo energético total e sua distribuição entre os subsistemas;
- Produtividade e eficiências associadas aos produtos gerados.

Nas simulações, os principais dados utilizados da UTE Ferrari da ENGIE Brasil Energia incluem o perfil analítico dos gases de exaustão da combustão da biomassa na usina, conforme resumo apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Perfil dos gases de exaustão da UTE Ferrari

| | | |
|---|---|---|
| Temperatura dos Gases | ºC | 87,4 |
| Vazão nas Condições da Chaminé | $m^3/h$ | 982.504 |
| Umidade do Gás | %v/v | 28,8 |
| Dióxido de Carbono | %v/v | 13,7 |
| Oxigênio | %v/v | 7,2 |
| Nitrogênio | %v/v | 79,1 |
| Material Particulado | kg/h | 96,5 |
| NOx | kg/h | 115,2 |
| Monóxido de Carbono | ppm | 368 |

A partir desses dados, foi calculada a vazão mássica dos gases, resultando em aproximadamente 1.186 toneladas por hora, sendo esse parâmetro essencial para a modelagem, servindo como referência para todas as etapas subsequentes do processo. Além disso, a modelagem considera o sistema em regime permanente, ou seja, sem variações de massa ou fluxo energético ao longo do tempo, considerando que o sistema, uma vez ativado, opera de forma estável nos meses seguintes. Pequenas variações no

rendimento da UTE, como a redução temporária de potência, foram simuladas como "steps" e ajustadas por meio de alterações nas condições de entrada, permitindo análises sob diferentes cenários operacionais.

Para simplificar, perdas térmicas foram desprezadas e todos os componentes – incluindo tubulações, bombas, compressores e dispositivos de transporte de fluxo – foram considerados adiabáticos. Bombas e compressores foram modelados com uma eficiência padrão de 75%, garantindo uma comparação justa entre as rotas e os processos principais sem vantagens atribuídas a componentes auxiliares. Na ausência de dados específicos de equipamentos ou processos, foram realizadas estimativas baseadas em fontes da literatura técnica, buscando aproximar a operação da realidade. A seguir, um detalhamento da modelagem das etapas de produção do hidrogênio verde, captura de carbono e produção de combustível será apresentado, bem como o item de condicionamento.

3.3.1 Produção de Hidrogênio Verde

Como base para esse trabalho, utilizou-se como apoio o eletrolisador alcalino DQ1000, fabricado pela John Cockerill [30]. Esse eletrolisador opera a uma pressão de 30 barg e produz $H_2$ com pureza superior a 99,8%. Além disso, de acordo com o datasheet do equipamento, o consumo energético nos eletrodos varia entre 4,0 e 4,3 kWh/Nm³ de $H_2$. No entanto, o consumo energético total do sistema é ligeiramente maior, alcançando 5,0 kWh/Nm³ de $H_2$. O consumo de água também é um parâmetro relevante. O modelo base indica um consumo ligeiramente superior, de 10,23 kg de água desmineralizada por quilograma de $H_2$, valor esse utilizado na modelagem, sugerindo alguma perda adicional de água. Os dados apresentados foram considerados nas duas rotas avaliadas.

3.3.2 Captura de Carbono

Na rota A, o método e a tecnologia utilizadas para captura de carbono são, respectivamente, pós-combustão e absorção química. Assim, o $CO_2$ é capturado por uma solução aquosa que reage e o separa do restante dos gases de exaustão. Em seguida, esse líquido é aquecido para liberar o $CO_2$ puro, que é resfriado e reutilizado no processo. O sistema consome 4,26 GJ de energia por tonelada de $CO_2$ capturado e remove 90% do gás presente nos exaustores, permitindo que apenas 10% escape. O $CO_2$ liberado tem temperatura entre 30 e 40°C e pressão de 1,2 bar. A eficiência energética do processo foi analisada considerando a recuperação de calor e a influência da temperatura.

Na rota B, a oxi-combustão é utilizada como método para captura de carbono, e a tecnologia considerada foi a destilação criogênica. Na destilação criogênica, o $CO_2$ dos gases de exaustão é capturado por meio de compressão e resfriamento, até que se torne líquido e possa ser separado dos demais componentes. O processo começa com os gases a 30°C e 1 bar e, ao final, o $CO_2$ puro é liberado a 110 bar, enquanto os gases sem $CO_2$ saem em condições ambientes. A eficiência de captura considerada foi de 95%. A estimativa do consumo energético é dependente da concentração de CO2 nos gases, portanto, pode-se estimá-lo conforme a equação (3), baseado em [20].

$$E\left[\frac{GJ}{ton}CO_{2\ capturado}\right] = \frac{9{,}72}{1000}\left(\frac{3{,}718}{x^2} + \frac{45{,}937}{x} + 46{,}74\right) \quad (3)$$

Onde x é a concentração de CO2 em %.

3.3.3 Produção de Metanol

Este estudo considera duas reações para a produção de combustíveis sintéticos. A primeira, chamada hidrotratamento, converte $CO_2$ e $H_2$ na proporção de 1:3 para produzir metanol sob condições ideais de 470–490 K e 30 bar. Apesar da alta seletividade, o processo gera subprodutos, como metano e formato de etila, tornando essencial o controle rigoroso da temperatura. A conversão da reação é baixa (6–7%), exigindo um sistema de reciclo eficiente para evitar desperdício de reagentes.

Além disso, assumiu-se que, para cada molécula de $CO_2$ consumida, uma molécula de $H_2O$ é gerada, garantindo um balanço de massa consistente. Como se trata de uma reação exotérmica, o reator precisa ser resfriado para manter a operação estável, e a energia retirada será calculada considerando a variação de temperatura dos reagentes e produtos.

A segunda rota envolve a síntese de metanol via Fischer-Tropsch, que utiliza CO e $H_2$ como reagentes, tornando necessário um estágio intermediário de *Reverse Water-Gas Shift* (RWGS) para converter $CO_2$ em CO. Estudos indicam que, à medida que a temperatura aumenta, a conversão de CO cresce, mas a seletividade do metanol diminui, favorecendo a formação de subprodutos como álcoois superiores, hidrocarbonetos e compostos oxigenados. A modelagem adotou representações simplificadas para esses subprodutos com base na disponibilidade de dados da ferramenta utilizada.

O reator RWGS opera a altas temperaturas para minimizar a formação indesejada de metano. Temperaturas abaixo de 800°C favorecem a formação desse composto, resultando em perda de carbono biogênico. O estudo sugere uma operação ideal a 1.000°C e 30 bar, onde o consumo energético é de aproximadamente 68,5 kJ/mol, garantindo alta conversão de $CO_2$ em CO e a eficiência do processo para a obtenção de CO puro.

3.3.3 Condicionamento
Existe a necessidade, em alguns casos, de aquecer ou pressurizar os fluxos entre algumas etapas do processo, neste caso entende-se essa variação energética como consumo energético, que é computado ao consumo total da rota. Por outro lado, caso seja necessário avaliar o potencial de recuperação energética associado à transformação dos fluxos para condições próximas à pressão e temperatura ambiente, uma análise baseada na segunda lei da termodinâmica poderia ser aplicada. No entanto, essa abordagem não será explorada neste trabalho, pois não reflete diretamente a economia de energia na rota, dado que essa economia depende da estratégia específica de recuperação energética adotada. Ainda assim, tal análise poderia fornecer um indicador valioso para a identificação de oportunidades de otimização do sistema.

## 4.0 RESULTADOS

As rotas de produção de combustíveis sintéticos apresentam diferenças em termos de complexidade, produtos gerados e desempenho energético.

4.1 Rota A – Produção de Metanol por Hidrotratamento
A Rota A tem um consumo energético de 9,8 MWh por tonelada de $CO_2$ aproveitado, impulsionado pela demanda de 137 kg de $H_2$ para cada tonelada de $CO_2$. O eletrolisador é o maior responsável pelo consumo energético (83,3%), seguido pela captura de $CO_2$ (12%). Outros processos como destilação e sistemas periféricos consomem frações menores. A demanda energética total para aproveitamento de todo o CO2 proveniente dos gases de exaustão da UTE Ferrari é 22 vezes a capacidade instalada da UTE, evidenciando o alto consumo energético do processo, especialmente para o sistema de eletrólise. Em termos de produtos gerados, para cada tonelada de $CO_2$ aproveitado a Rota A gera 530 kg de metanol, além de 289 kg de subprodutos, como o metanoato de etila e o metano. Assim, a eficiência energética de conversão é de 57,0%, incluindo os subprodutos, sendo 29,8% considerando apenas a produção de metanol.

4.2 Rota B – Produção de Metanol por Fischer-Tropsch
A Rota B tem um consumo energético de 10,6 MWh por tonelada de $CO_2$ aproveitado, além de um consumo de $H_2$ de 146 quilogramas para cada tonelada de $CO_2$. O eletrolisador novamente é o maior responsável pelo consumo de energia, representando 81,9% da demanda total, destacando a importância do eletrolisador como alvo para inovações tecnológicas e estratégias de eficiência energética. Em relação à produção do combustível sintético, para cada tonelada de $CO_2$ aproveitado, a Rota B gera 444 kg de metanol, além de 282 kg de subprodutos, como etanol, metano e dimetil éter. A eficiência energética da Rota B é de 48,5% no total, com 23,1% de eficiência para metanol, 7,2% para etanol, 11,2% para metano e 7,1% para dimetil éter.

4.3 Análise Comparativa
A análise comparativa das rotas A e B abrange os principais processos envolvidos na produção de combustíveis sintéticos, incluindo a produção de hidrogênio verde, captura de carbono e síntese de

combustíveis. A produção de hidrogênio é a etapa mais intensiva em energia, representando 83,3% do consumo total na Rota A e 81,9% na Rota B. A potência instalada do eletrolisador é de 1,48 GW para a Rota A e 1,66 GW para a Rota B, refletindo a maior demanda energética da segunda. Consequentemente, a Rota B também exige maior consumo de água desmineralizada, atingindo 3,0 milhões de metros cúbicos anuais contra 2,7 milhões na Rota A.

Na captura de carbono, a Rota B adota captura criogênica com oxicombustão, resultando em maior eficiência de captura e menor consumo energético (3,3% contra 12,0% da Rota A). Contudo, a Rota B requer processos adicionais, como o RWGS e a captura de CO, que elevam seu consumo total de energia para 8.975 GWh anuais, enquanto a Rota A consome 7.874 GWh. Quanto à produção do combustível sintético, a Rota A se destaca pela maior eficiência total (57,0%) e maior produção de metanol, enquanto a Rota B tem eficiência menor (48,5%) e menor produção de metanol. A necessidade de processos mais complexos na Rota B impacta sua viabilidade, apesar da maior eficiência na captura de carbono.

Comparativamente, a Rota A, que utiliza hidrotratamento, apresenta um consumo energético de 9,8 MWh por tonelada de CO2 aproveitado, com eficiência total de 57,0%, enquanto a Rota B, baseada em Fischer-Tropsch, consome 10,6 MWh por tonelada de CO2 aproveitado e tem eficiência de 48,5%. Na Tabela 2 um resumo das informações é apresentado.

Tabela 2 - Parâmetros comparativos das rotas A e B

| Parâmetro | Rota A | Rota B |
|---|---|---|
| Consumo de hidrogênio verde (kg/ton $CO_2$) | 137 | 146 |
| Consumo energético total (MWh/ton $CO_2$) | 9,8 | 10,6 |
| Consumo energético do eletrolisador (%) | 83,3% | 81,9% |
| Consumo energético da captura de carbono (%) | 12,0% | 3,3% |
| Produção de metanol (kg/ton $CO_2$) | 530 | 444 |
| Produção de combustível (kg/ton $CO_2$) | 819 | 726 |
| Eficiência da produção de metanol (%) | 29,8% | 23,1% |
| Eficiência total (%) | 57,0% | 48,5% |

## 5.0 CONCLUSÕES

As simulações realizadas no EES permitiram avaliar o desempenho energético das rotas tecnológicas analisadas, destacando tanto seus desafios quanto suas oportunidades de otimização. A Rota A se mostrou a mais eficiente em termos energéticos, com uma conversão total de 57,0%, favorecida pela ausência de processos de alto custo energético, como o RWGS. Já a Rota B, apesar de apresentar a maior demanda energética, se diferencia pela diversidade de produtos gerados, o que pode ampliar suas aplicações industriais e comerciais. A análise comparativa indicou que a principal limitação das rotas é o elevado consumo do eletrolisador, tornando essencial o desenvolvimento de estratégias de otimização, como a melhoria da eficiência da eletrólise e o aproveitamento do calor residual dos processos. Portanto, os resultados obtidos reforçam a necessidade de aprimoramento contínuo das rotas tecnológicas para combustíveis sintéticos, visando aumentar sua competitividade e sua contribuição para um futuro energético mais sustentável.

## 6.0 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e à ENGIE Brasil Energia pelo financiamento do projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) intitulado “PD 00403-0058/2024 - Rotas Tecnológicas para Produção de Combustíveis Sintéticos”, que resultou nesse artigo.

## 7.0 BIBLIOGRAFIA

[1] Fankhauser, S., Smith, S. M., Allen, M., Axelsson, K., Hale, T., Hepburn, C., ... & Wetzer, T. (2022). The meaning of net zero and how to get it right. Nature climate change, 12(1), 15-21.

[2] ZHAO, Changying. Carbon Neutrality: aiming for a net-zero carbon future. Carbon Neutrality, v. 1, n. 1, p. 2, 2022.
[3] RAM, Vishal; SALKUTI, Surender Reddy. An overview of major synthetic fuels. Energies, v. 16, n. 6, p. 2834, 2023.
[4] DELL'AVERSANO, Sonia et al. E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological Alternatives towards an Energy Transition. Energies, v. 17, n. 16, p. 3995, 2024.
[5] ERICSSON, Karin. Biogenic carbon dioxide as feedstock for production of chemicals and fuels: A techno-economic assessment with a European perspective. Miljö-och energisystem, LTH, Lunds universitet, 2017.
[6] Wood Mackenzie. (2024). Are synthetic fuels the key to unlocking growth in hydrogen?. Disponível em: https://www.woodmac.com/horizons/e-fuels-unlocking-hydrogen/.
[7] KARGBO, Hannah; HARRIS, Jonathan Stuart; PHAN, Anh N. "Drop-in" fuel production from biomass: Critical review on techno-economic feasibility and sustainability. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 135, p. 110168, 2021.
[8] FU, Lipei et al. Research progress on CO2 capture and utilization technology. Journal of CO2 Utilization, v. 66, p. 102260, 2022.
[9] Biewald, A., et al. (2019). "Sustainability Assessments of Carbon Capture and Utilization Technologies." Environmental Science & Technology, 53(11), 6455-6465. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01310
[10] B. K. R. &. A. K. Dziejarski, "Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment.," Fuel, p. 127776, 2023.
[11] M. Berggren, "Global methanol – State of the industry," presentation at the 22nd IMPCA Asian Methanol Conference, Singapore, 2019. [Online].
[12] I. Landälv, "Methanol as a renewable fuel – a knowledge synthesis"," Report No 2015:08, f3 The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels, Sweden, 2017. [Online].
[13] E. Souza, J. Pinto, e V. Flores, "Seqüestro de CO2 para produção de metanol: avaliação de rotas alternativas de produção," UFRJ, 2010, doi: http://hdl.handle.net/11422/18804
[14] Jamaati, M., Torkashvand, M., Sarabadani Tafreshi, S., & de Leeuw, N. H. A Review of Theoretical Studies on Carbon Monoxide Hydrogenation via Fischer–Tropsch Synthesis over Transition Metals. Molecules, 2023, 28, 6525. Disponível em: https://doi.org/10.3390/molecules28186525

## DADOS BIOGRÁFICOS



**Felipe Godoy Righetto** é mestre (2022) em Planejamento de Sistemas Energéticos e graduado (2017) em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Desde 2017 atua com termodinâmica e, atualmente, atua como especialista em Térmica e Fluido no SENAI CIMATEC, desenvolvendo projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em descarbonização, eficiência e transição energética.

**Vinícius Caleffi** é graduado (2022) em Engenharia Mecânica pela universidade SENAI CIMATEC. Atualmente atua como consultor na área de Térmica e Fluidos desenvolvendo projetos de PD&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação) com ênfase em estudos de térmicos (térmica e termodinâmica) e fluidodinâmicos.

**Danielly Norberto Araujo** é graduada (2017) e mestre (2020) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e Universidade Federal do Ceará (UFC), respectivamente. Atualmente, atua como engenheira de inovação no CIMATEC, desenvolvendo atividades relacionadas à prospecção e desenvolvimento de projetos de

Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação referentes à descarbonização, descentralização e digitalização do setor elétrico.

**Ricardo Cerqueira Medrado** possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia (2014) e graduação em Direito pela Universidade Salvador (2009). Possui Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal da Bahia (2017). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em eletrônica embarcada, Circuitos Elétricos, Magnéticos e Eletrônicos, tendo atuado em projetos de P&D da área de Eficiência Energética, Sistemas ópticos, Linhas de Distribuição de Potência, Combate às Perdas Não técnicas, Mobilidade Elétrica e Usinas de Geração Híbridas Renováveis.

**Vinícius Bastos Resende** é graduado (2019) em Engenharia Aeroespacial pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atualmente, atua no desenvolvimento de novos negócios renováveis na ENGIE Brasil Energia, com experiência no desenvolvimento de projetos de hidrogênio verde.

**Lucas Neves Peiter** é graduado em Engenharia Elétrica (2008) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e em Administração Empresarial (2011) pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), e possui MBA em Gerenciamento de Projetos (2016) pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). Atualmente, atua na área de planejamento e logística de projetos na ENGIE Brasil Energia, com experiência no desenvolvimento e gerenciamento técnico de projetos de hidrogênio verde.

**Priscila Telles** é graduada (2015) em Engenharia de Energia pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) e mestre (2017) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente, atua no desenvolvimento de novos negócios renováveis na ENGIE Brasil Energia, com experiência nas áreas de hidrogênio de baixo carbono, biometano, comercialização de energia e inteligência de mercado.

**Maria Fernanda Ramos Zeni** é graduada (2025) em Engenharia de Produção Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente, atua no desenvolvimento de novos negócios renováveis na ENGIE Brasil Energia.