XXVIII SNPTEE 2025

XXVIII Seminário Nacional de
Produção e Transmissão de Energia Elétrica

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

Informe Técnico GE - GTE

Ricardo Cerqueira Medrado

SENAI CIMATEC

ENGIE

ANEEL
Agência Nacional de Energia Elétrica
Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação



Sol Pulquério

CLASSIFICAÇÃO: PÚBLICA

Introdução

O desafio global de mitigar os impactos das mudanças climáticas tem intensificado a busca por alternativas sustentáveis, em consonância com as **metas de emissões líquidas zero (net zero)**.

Processos e Tecnologias para Descarbonização e *Net-Zero*



Fontes Renováveis

A utilização de energia renovável pode substituir combustíveis fósseis na geração de energia elétrica



Hidrogênio Verde

O hidrogênio produzido com fontes renováveis, pode substituir combustíveis fósseis em processos industriais



Captura de Carbono

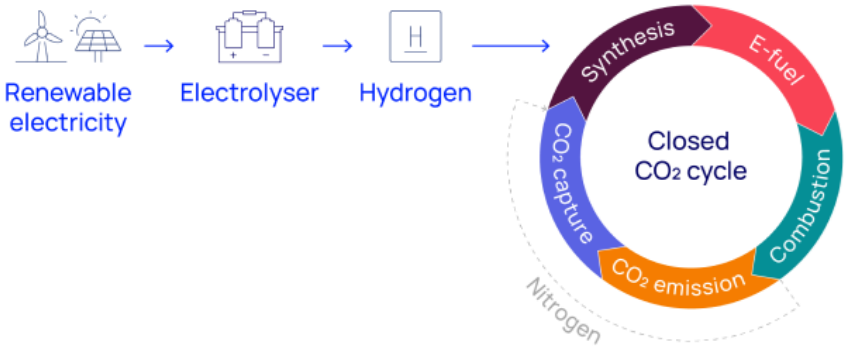
Tecnologias de captura de CO_2 que atuam em diferentes etapas da combustão ou diretamente na atmosfera



Combustíveis Sintéticos

Combustíveis líquidos ou gasosos produzidos com CO_2 e hidrogênio verde, voltados a setores de difícil eletrificação

Introdução

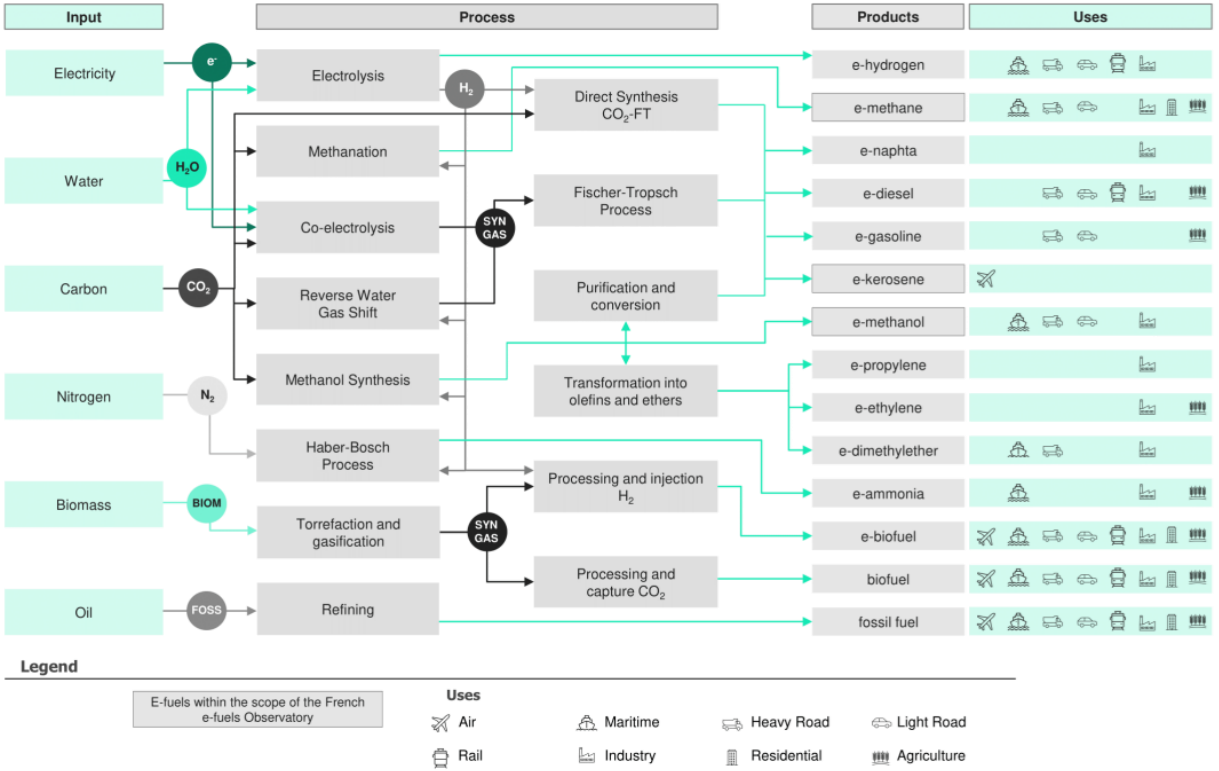


Combustíveis Sintéticos

Provenientes da combinação do hidrogênio com o nitrogênio ou insumos de carbono (CO_2 ou CO), em que a **sustentabilidade** desse combustível é intrinsicamente relacionada com o método de obtenção do hidrogênio e da fonte de carbono utilizada.

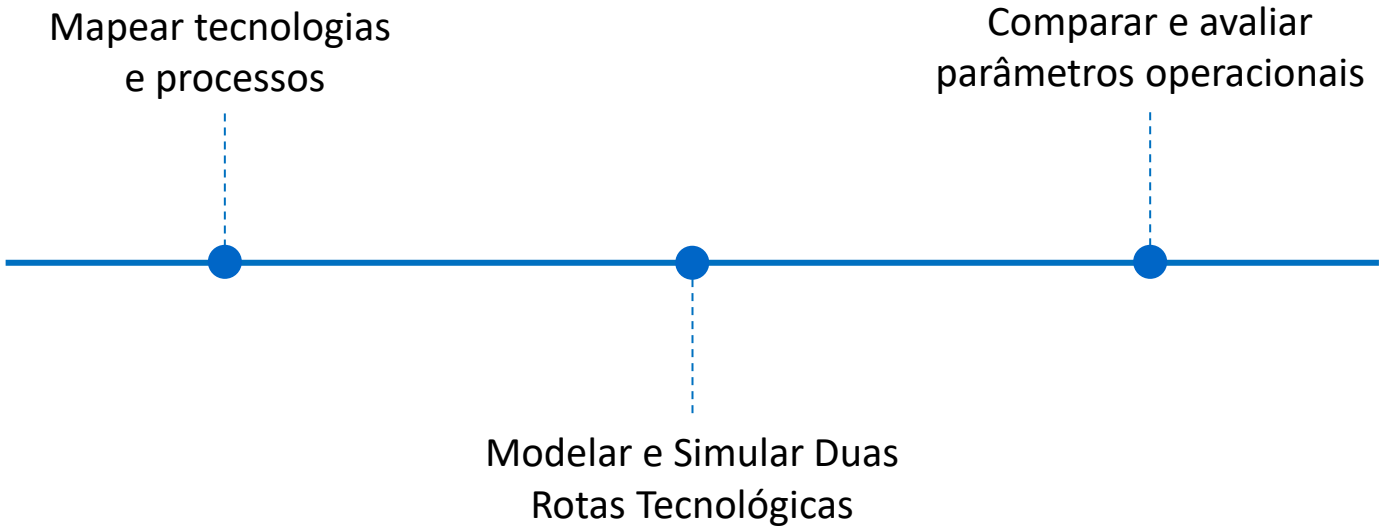
Introdução

Há diferentes rotas tecnológicas para produção de combustíveis, sendo **essencial mapear e avaliar as opções mais viáveis**, garantindo o melhor uso do hidrogênio verde e das fontes de carbono para alcançar **emissões líquidas zero**.



Objetivo

Investigar e avaliar rotas tecnológicas para produção de combustíveis sintéticos, com foco em **metanol**, aderentes à infraestrutura de uma Usina Termoelétrica (UTE) movida à biomassa.



Metodologia

1. **Definição das rotas tecnológicas**
   Seleção de duas alternativas (hidrotratamento e Fischer-Tropsch) integradas à UTE a biomassa.

2. **Levantamento de dados da UTE**
   Perfil dos gases de exaustão, vazões, composição, temperatura.

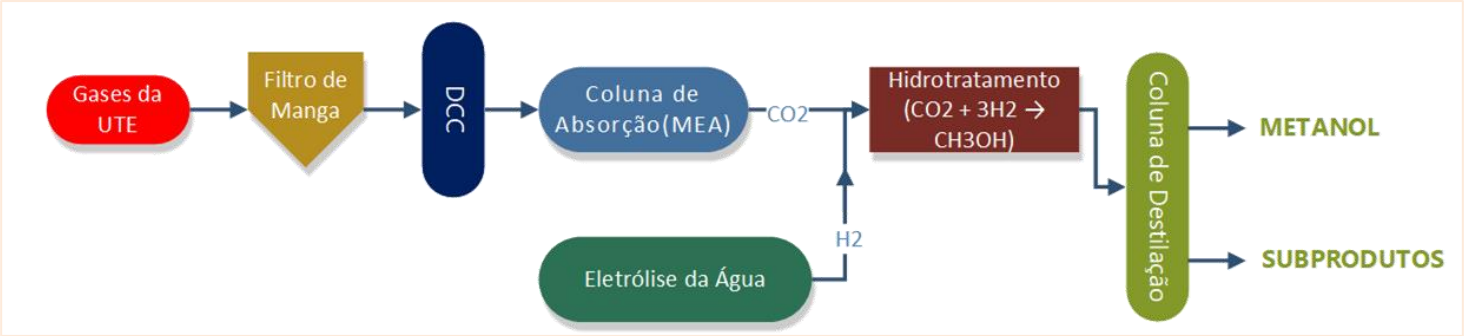
3. **Modelagem e simulação**
   Uso do software EES para simulação da síntese de metanol.

4. **Avaliação de indicadores**
   Consumo energético, eficiência, produtividade e subprodutos.

5. **Comparação e otimização**
   Identificação de oportunidades para maior eficiência e competitividade.

Metodologia: Rotas

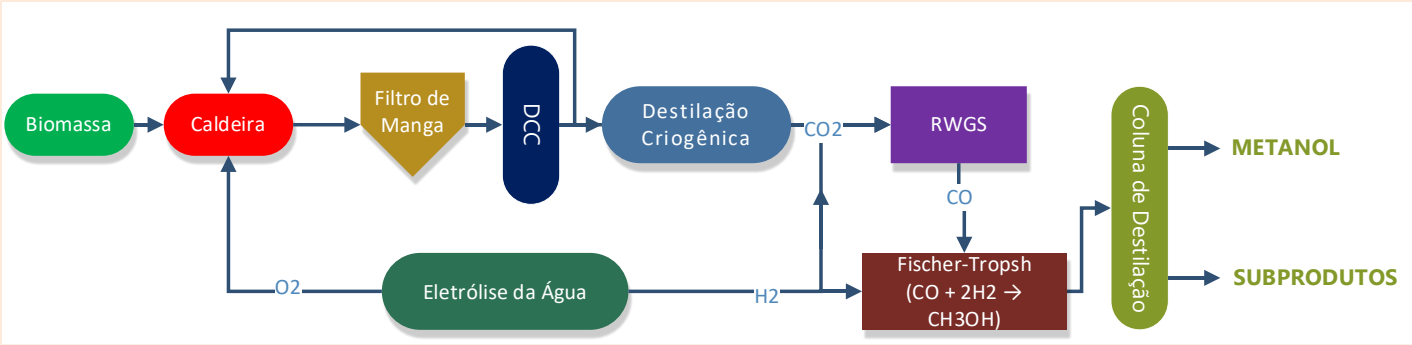
Rota A: Hidrotratamento



- **Pré-tratamento dos gases:** Filtro manga, Resfriador
- **Captura de CO_2:** Pós-Combustão e Absorção Química
- **Produção de H_2 verde:** Eletrolisador Alcalino
- **Síntese de metanol:** Hidrotratamento
- **Separação e purificação:** Coluna de Destilação

Metodologia: Rotas

Rota B: Fischer-Tropsch



- **Enriquecimento dos gases:** Enriquecimento de O_2
- **Pré-tratamento dos gases:** Filtro Manga, Resfriador
- **Captura de CO_2:** Oxi-combustão e Dest. Criogênica
- **Convesão de CO_2 em CO:** RWGS
- **Produção de H_2 verde:** Eletrolisador Alcalino
- **Síntese de metanol:** Fischer-tropsch
- **Separação e purificação:** Coluna de Destilação

Metodologia: Dados da UTE

Utilização de dados operacionais da **UTE Ferrari (ENGIE)**, que possui capacidade instalada de 80,5 MW, está localizada na zona rural de Pirassununga (SP), e gera energia elétrica e vapor d'água a partir da fonte de biomassa da cana-de-açúcar.



Composição dos gases de exaustão

Parâmetros de temperatura e pressão dos gases

Consumo horário e anual da usina

Metodologia: Dados da UTE

1) **Consumo horário máximo da UTE:** baseado no perfil de operação da usina, que possui uma **vazão de gases de 1.186 ton/h**, correspondente à queima de 225,6 ton/h de bagaço de cana.
2) **Consumo anual:** Em média, são utilizados 1 milhão de toneladas anuais de bagaço de cana.

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

Metodologia: Modelagem e Simulação

Ferramenta utilizada:

- Software EES (resolução numérica de equações algébricas, diferenciais não lineares e análises termodinâmicas).
- As simulações foram realizadas separadamente para cada uma das rotas.

Premissas de modelagem:

- Regime permanente.
- Componentes adiabáticos.
- Perdas térmicas desprezadas.
- Estimativas complementares baseadas em literatura técnica.



Metodologia: Modelagem e Simulação



Hidrogênio Verde

Eletrolisador alcalino
Pressão: 30 barg
Pureza: >99,8%
Consumo: 5,0 kWh/Nm^3 H_2
Água: 10,23 kg/kg H_2.



Captura de Carbono

Pós-combustão – Absorção:
Eficiência: 90% de captura
Consumo: 4,26 GJ/ton CO_2
Oxi-combustão – Destilação criogênica:
Eficiência: 95% de captura
Consumo calculado conforme concentração de CO_2



Síntese de Metanol

Rota A – Hidrotratamento:
CO_2 + H_2 (1:3),
alta seletividade,
6–7% conversão → reciclo obrigatório
Rota B – Fischer-Tropsch
RWGS (CO_2 → CO) + FT,
maior variedade de subprodutos, requer altas temperaturas

Resultados

ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS

Rota A

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

ENTRADAS:

$\dot{m}_{ch}$	1186 [tonne/h]
tx_{co}	0,0368 [%]
tx_{co2}	13,73 [%]
T_{hidro}	196,9 [C]
$Reciclo_{real}$	2073 [%]
$Reciclo_{ideal}$	= 2073 [%]
tx_{h2o}	28,8 [%]
tx_{o2}	7,2 [%]
tx_{N2}	79,07 [%]

Consumo energético	
Captura do CO_2	0,001 [MW]
Destilação	0,001 [MW]
Eletrolisador	0,000001 [GW]
Outros	0,001 [MW]
Total	0,000001 [GW]

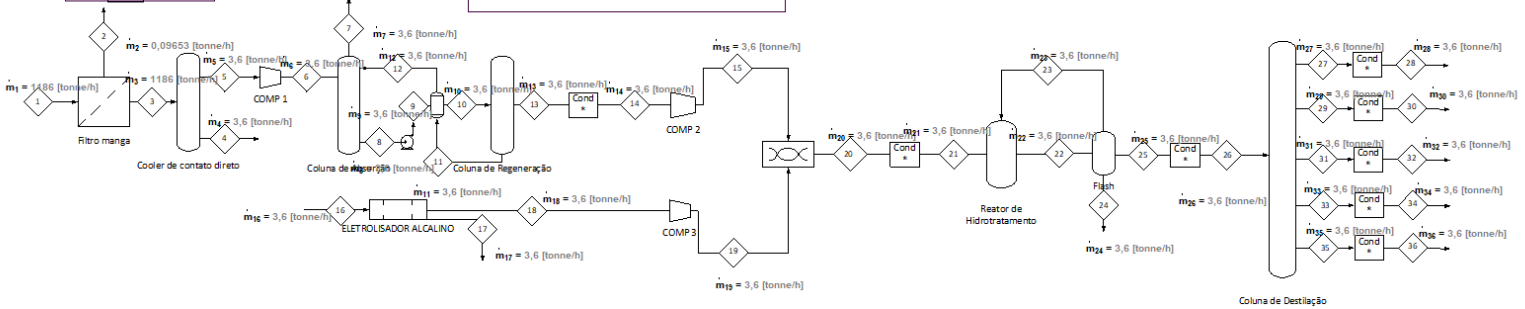
Consumo de bagaço estimado

$\dot{m}_{bg}$ = 226,5 [tonne/h]

Potencial de reaproveitamento

Pós Captura do CO_2	0,001 [MW]
Pré Hidrotratamento	0,001 [MW]
Hidrotratamento	0,001 [MW]
Pré Destilação	0,001 [MW]
Acetona	0,001 [MW]
Metano	0,001 [MW]
Metanol	0,001 [MW]
Monóxido de Carbono	0,001 [MW]
Água	0,001 [MW]
Total	0,001 [MW]

	Produtividade	Potencial enrgetico	Eficiência
Metanol	3,6 [tonne/h]	0,001 [MW]	100 [%]
Metanoato de etila (modelado como acetona)	3,6 [tonne/h]	0,001 [MW]	100 [%]
Metano	3,6 [tonne/h]	0,001 [MW]	100 [%]
Total	3,6 [tonne/h]	0,000001 [GW]	100 [%]



Calculate Print

Desenvolvido por SENAI CIMATEC

Balanço Energético e Insumos

	Rota A	Rota B
Consumo energético total	9,8 MWh/ton CO_2	10,6 MWh/ton CO_2
Demanda de H_2	137 kg/ton CO_2	146 kg/ton CO_2
Distribuição do consumo de energia	**Eletrolisador: 83,3% Captura de CO_2 (absorção química): 12,0%.** Demais processos (destilação, periféricos): 4,7%.	**Eletrolisador: 81,9%. Captura de CO_2 (criogênica): 3,3%. Demais processo:s** (RWGS, captura de CO, síntese/condicionam.): 14,8%.

Rota A → maior eficiência e produção de metanol.
Rota B → maior eficiência na captura, porém com processos adicionais (RWGS).
Eletrolisador domina consumo em ambas as rotas (>80%).

Resultados

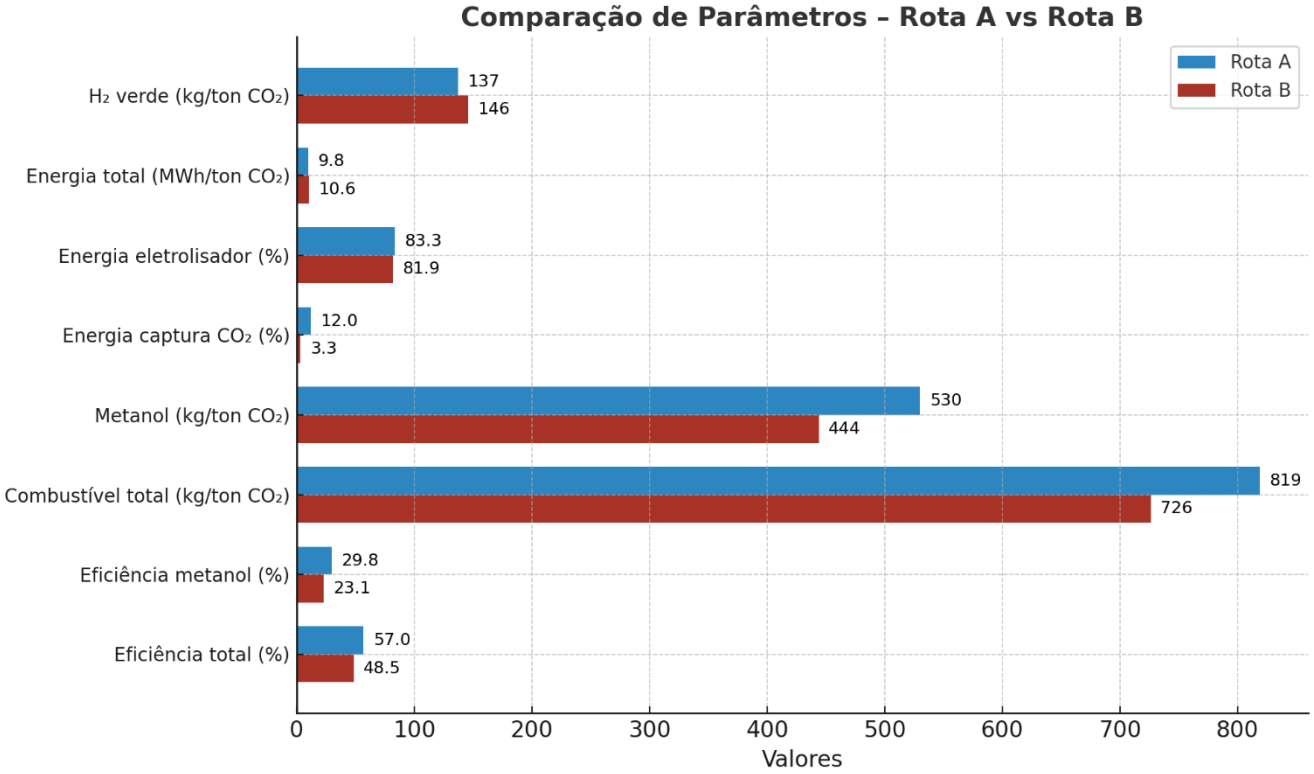
Desempenho de Produção

	Rota A	Rota B
Metanol	530 kg/ton CO_2	444 kg/ton CO_2
Subprodutos	289 kg/ton CO_2	**282 kg/ton CO_2**
Eficiência energética total	**57,0% (incluindo subprodutos[1])**	48,5% (incluindo subprodutos[2])
Eficiência de metanol	29,8%	23,1%

Rota A → **mais produtiva** e eficiente para **metanol**.
Rota B → produz menos metanol, mas **pode compensar com portfólio de subprodutos**.

[1] metano e formato de etila
[2] metano, etanol, dimetil éter

Resultados



Rota A → maior eficiência e produção de metanol.
Rota B → menor consumo na captura e maior eficiência de captura

Conclusões

- Simulações no EES permitiram avaliar consumo energético, eficiência e viabilidade das rotas.
  - **Rota A → maior eficiência total** (57,0%), beneficiada pela ausência de processos de alto custo energético (RWGS).
  - **Rota B → maior diversidade de produtos**, mas menor eficiência e maior demanda energética.
- O eletrolisador é o maior responsável pelo consumo de energia em ambas as rotas.
- Equilibrar eficiência e diversidade de produtos pode ampliar a competitividade.
- Investimentos em inovação e otimização das rotas são essenciais para viabilidade econômica e sustentabilidade.

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.

Obrigado!

Ricardo Cerqueira Medrado

Especialista de Sistemas Elétricos

(71) 9 88805272

ricardo.medrado@fieb.org.br

www.linkedin.com/in/ricardomedrado


Promoção
cigre
Brasil
Coordenação
Eletrobras