

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO ETANOL E SEUS
DERIVADOS PARA DESCARBONIZAÇÃO DOS
SETORES *HARD-TO-ABATE***

Beatriz Alves Costa

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Prof. **Vádila Giovana Guerra Béttega**

São Carlos – SP

2024

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 09 de setembro de 2024 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador(a): Dr^a. Vádila Giovana Guerra Béttega, DEQ/UFSCar

Convidado: Eng. Marcus Vinicius Sgobi, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Dr. Ruy de Sousa Júnior, DEQ/UFSCar

Dedico esse trabalho aos meus pais, Luciara e Joselito,
meus queridos amigos e a todos os docentes que
fizeram parte da minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, que tem sido minha luz e força em todos os momentos da minha jornada. Sou imensamente grata pela oportunidade de vivenciar cada experiência que moldou quem sou hoje e pelo apoio inabalável que sempre recebo em cada desafio enfrentado.

Aos meus pais, um agradecimento especial por todo amor e dedicação. Mudando-me para o interior de São Paulo, deixei meu lar, mas o apoio constante de vocês sempre me trouxe conforto. A cada final de semana, ao voltar para casa, sinto que a conexão que temos se fortalecia ainda mais.

Não posso deixar de mencionar meu companheiro, que tem sido uma verdadeira rocha ao meu lado. Durante meses, você dirigiu horas sozinho apenas para me buscar em São Carlos nas tardes de sexta-feira, poupando-me horas de viagem de ônibus. Esses gestos de amor e apoio tornaram minha jornada acadêmica mais leve e cheia de significado.

Aos meus amigos, que tornaram esses anos de graduação mais leves e memoráveis, agradeço por cada risada compartilhada, cada momento de descontração e pelo apoio nas horas mais desafiadoras. Vocês tornaram essa jornada não apenas possível, mas incrivelmente prazerosa.

Por fim, agradeço pela oportunidade de estágio que me colocou em contato com a temática que tanto amo: a transição energética. Essa experiência foi fundamental para meu crescimento pessoal e profissional, e sou grata por ter tido a oportunidade de explorar um campo que me apaixonou.

À minha adorável cadelinha de estimação, que sempre se mostrou uma companheira leal, obrigada por me lembrar de que, mesmo em meio a tanto trabalho, é importante parar e apreciar os momentos simples da vida. Você sempre queria dividir minha atenção com o *notebook* enquanto eu escrevia este trabalho, e isso trouxe muitas risadas e alegrias aos meus dias.

Cada um de vocês tem um lugar especial em meu coração, e sou eternamente grata por tudo o que fizeram por mim ao longo dessa jornada. Muito obrigada!

RESUMO

O contexto global contemporâneo reflete uma imperativa mudança no paradigma energético, uma vez que questões ambientais, sociais e econômicas convergem para a necessidade de uma abordagem cada vez mais sustentável e resiliente. A transição para fontes de energia de menor impacto ambiental e redução das emissões de gases de efeito estufa emergem como imperativos inadiáveis, impulsionando a busca por soluções renováveis e de baixo carbono. Nesse contexto dinâmico, o etanol e seus derivados desempenham um papel multifacetado e estratégico na transição energética global. Para além de sua contribuição direta na mitigação das emissões de carbono, o etanol figura como uma peça-chave na produção de diversos produtos renováveis, promovendo uma mudança significativa na indústria química e em outros setores que dependem de insumos de origem fóssil. O escopo do trabalho visou abordar uma análise profunda e abrangente do papel do etanol nesse panorama em transformação. Partindo da sua inserção na matriz energética mundial, passando pelos impactos ambientais positivos decorrentes de sua adoção, até as oportunidades estratégicas nos segmentos de mobilidade e indústria, o trabalho buscou elucidar os desafios e potenciais associados ao uso do etanol como vetor de uma economia mais sustentável. Foram examinados e discutidos em detalhes diversos produtos e processos derivados do etanol, abarcando desde biocombustíveis avançados para aviação e transporte marítimo, até a produção de uma vasta gama de químicos renováveis. A análise crítica e embasada desses produtos e processos foi conduzida não somente sob a ótica da viabilidade técnica e econômica, mas também considerando seu potencial de redução de emissões ao longo de toda a cadeia produtiva, bem como sua capacidade de promover a sustentabilidade ambiental. As discussões incluíram a viabilidade das rotas de produção de biometanol, e-metanol e ATJ (Álcool-para-Querosene) no contexto da descarbonização dos setores químico, de aviação e marítimo. A análise revelou que a produção de biometanol e e-metanol se mostra promissora, apresentando flexibilidade e viabilidade econômica devido à crescente demanda por soluções de redução de emissões. A produção de biometanol via reforma a vapor do biogás foi destacada como uma abordagem favorável, principalmente no Brasil, onde a cana-de-açúcar pode ser utilizada para maximizar a circularidade e a eficiência energética, embora desafios operacionais e de purificação precisem ser enfrentados. Adicionalmente, a hidrogenação de CO₂ para metanol foi considerada tecnicamente madura, mas enfrenta barreiras econômicas significativas. A rota ATJ destacou-se pela flexibilidade na utilização de diferentes álcoois, mas enfrenta limitações na seletividade e na eficiência, revelando a necessidade de mais pesquisa e desenvolvimento. A análise do setor marítimo sugeriu que, embora o metanol tenha potencial, desafios relacionados à densidade energética e custos de produção ainda precisam ser superados. Em conclusão, o trabalho evidenciou a relevância do etanol e de seus derivados como vetores essenciais na transição para uma matriz energética mais sustentável. O estudo destacou a necessidade de um esforço colaborativo entre governos, indústria e sociedade para enfrentar os desafios da descarbonização, garantindo a maximização das oportunidades associadas ao uso de biocombustíveis. A engenharia química desempenha um papel vital na otimização dos processos de produção e na maximização dos benefícios ambientais e econômicos desse ecossistema sucoenergético. Assim, a integração de conhecimento técnico-científico com políticas públicas robustas é essencial para que o etanol possa efetivamente contribuir para um futuro energético mais renovável e sustentável.

ABSTRACT

The contemporary global context reflects an imperative shift in the energy paradigm, as environmental, social, and economic issues converge toward the need for an increasingly sustainable and resilient approach. The transition to energy sources with lower environmental impact and the reduction of greenhouse gas emissions emerge as urgent imperatives, driving the search for renewable and low-carbon solutions. In this dynamic context, ethanol and its derivatives play a multifaceted and strategic role in the global energy transition. Beyond its direct contribution to carbon emission mitigation, ethanol is a key player in the production of various renewable products, promoting a significant shift in the chemical industry and other sectors dependent on fossil-based inputs. The scope of this study aimed to provide an in-depth and comprehensive analysis of the role of ethanol in this transforming landscape. From its integration into the global energy matrix, through the positive environmental impacts resulting from its adoption, to the strategic opportunities in the mobility and industrial sectors, the study sought to elucidate the challenges and potentials associated with the use of ethanol as a driver of a more sustainable economy. Several ethanol-derived products and processes were examined and discussed in detail, ranging from advanced biofuels for aviation and maritime transportation to the production of a wide range of renewable chemicals. The critical and evidence-based analysis of these products and processes was conducted not only from the perspective of technical and economic feasibility but also considering their potential for emission reductions across the entire production chain, as well as their ability to promote environmental sustainability. Discussions included the feasibility of biometanol, e-methanol, and ATJ (Alcohol-to-Jet) production pathways in the context of decarbonizing the chemical, aviation, and maritime sectors. The analysis revealed that the production of biometanol and e-methanol appears promising, showing flexibility and economic viability due to the growing demand for emission reduction solutions. The production of biometanol via biogas steam reforming was highlighted as a favorable approach, especially in Brazil, where sugarcane can be used to maximize circularity and energy efficiency, although operational and purification challenges need to be addressed. Additionally, the hydrogenation of CO₂ to methanol was considered technically mature but faces significant economic barriers. The ATJ route stood out for its flexibility in using different alcohols, but it faces limitations in selectivity and efficiency, revealing the need for further research and development. The maritime sector analysis suggested that, although methanol holds potential, challenges related to energy density and production costs still need to be overcome. In conclusion, the study highlighted the relevance of ethanol and its derivatives as essential drivers in the transition to a more sustainable energy matrix. The study emphasized the need for collaborative efforts between governments, industry, and society to tackle decarbonization challenges, ensuring the maximization of opportunities associated with the use of biofuels. Chemical engineering plays a vital role in optimizing production processes and maximizing the environmental and economic benefits of this sugarcane energy ecosystem. Thus, the integration of technical-scientific knowledge with robust public policies is essential for ethanol to effectively contribute to a more renewable and sustainable energy future.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.	Consumo de energia e emissões de CO ₂ para setores hard-to-abate	14
Figura 3.2.	Comparação de emissões de GEE entre etanol de cana-de-açúcar e demais combustíveis	17
Figura 3.3.	Principais exportadores de etanol no mercado global	20
Figura 5.1.	Comparação de custo de produção de combustíveis de aviação sustentáveis	36
Figura 5.2.	Comparação de custo de combustíveis marítimos renováveis	40
Figura 5.3.	Principais rotas para a produção de metanol	43
Figura 5.4.	Fluxograma simplificado dos processos da rota <i>Alcohol to Jet</i> (ATJ)	49
Figura 5.5.	Fluxograma do processo de produção de metanol via biogás (reforma à vapor)	51

LISTA DE TABELAS E QUADROS

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Produção mundial anual de etanol combustível (milhões de galões)	19
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1. Principais benefícios e desafios das rotas de geração do gás de síntese para a produção de metanol	43
---	----

SIGLAS E ABREVIACOES

ATJ	Álcool para Querosene (<i>Alcohol-to-Jet</i>)
BioCCS	Captura e Armazenamento de Carbono Biogênico
DAC	Captura Direta do Ar
HFO	Óleo Combustível Pesado
HVCs	Químicos de Alto Valor
ICAO	Organização da Aviação Civil Internacional
IMO	Organização Marítima Internacional
MOGD	Olefina para Gasolina/Destilado
MSW	Resíduos Sólidos Urbanos
MTO	Metanol para Olefinas
PbL	<i>Power and Biomass-to-Liquid</i>
QAV	Querosene de Aviação
RFS	<i>Renewable Fuel Standard</i>
SAF	Combustível Sustentável de Aviação (<i>Sustainable Aviation Fuel</i>)
VLSFO	Óleo Combustível de Baixo Teor de Enxofre

SUMÁRIO

Banca Examinadora.....	i
Dedicatória.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas e Quadros.....	vii
Nomenclatura.....	viii
1- INTRODUÇÃO.....	10
2- OBJETIVO.....	13
3- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1- Sustentabilidade do etanol.....	16
3.1.1- Redução das emissões de gases de efeito estufa através do uso de etanol.....	16
3.1.2- Benefícios ambientais e sociais do uso de etanol como combustível renovável.....	17
3.2- Comércio internacional do etanol.....	18
3.3- Cenário de emissões e consumo energético por setor.....	21
3.3.1- Químicos e petroquímicos.....	21
3.3.2- Setor de aviação.....	24
3.3.3- Setor marítimo.....	27
4- METODOLOGIA.....	29
5- ROTAS PARA DESCARBONIZAÇÃO.....	31
5.1- Panorama Geral.....	31
5.1.1- Químicos e petroquímicos.....	31
5.1.2- Setor de aviação.....	34
5.1.3- Setor marítimo.....	37
5.2- Rotas tecnológicas.....	41
5.2.1- Químicos e petroquímicos.....	41
5.2.1.1- Rotas de Produção de Metanol: Panorama Geral.....	41
5.2.1.2- Gás de síntese a partir da gaseificação da biomassa.....	44
5.2.1.3- Hidrogenação de carbono a partir de fontes puras de CO2.....	45
5.2.2- Aviação.....	48
5.2.3- Setor marítimo.....	50
6- DISCUSSÃO.....	54
7- CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1- INTRODUÇÃO

A transição energética em direção a fontes de energia mais sustentáveis e de baixo carbono é um dos desafios mais prementes da contemporaneidade. Com a crescente conscientização sobre os impactos das mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, o etanol tem emergido como um componente vital na matriz energética global. Este trabalho explora o papel multifacetado do etanol e seus derivados na transição energética, destacando seu estado atual de implementação, seu impacto na sustentabilidade ambiental e as oportunidades que ele oferece, especialmente nos setores de mobilidade e indústria química e petroquímica.

O etanol tem ganhado destaque na matriz energética mundial devido à sua capacidade de substituir combustíveis fósseis em diversas aplicações. Atualmente, países como o Brasil e os Estados Unidos lideram a produção e o consumo de etanol, utilizando-o principalmente como aditivo à gasolina ou como combustível renovável em sua forma pura. A introdução do etanol na matriz energética desses países não apenas tem contribuído para a diversificação das fontes de energia, mas também tem promovido a independência energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2007; KIM et al., 2015).

No Brasil, o programa Pró-Álcool, iniciado na década de 1970, foi um dos pioneiros na implementação de uma política energética voltada para o uso do etanol. Este programa não apenas garantiu uma oferta contínua de etanol para o mercado interno, como também posicionou o Brasil como um dos maiores exportadores de etanol do mundo (BACOVSKY et al., 2013). Nos Estados Unidos, a produção de etanol à base de milho também tem desempenhado um papel significativo, impulsionada por políticas como o Renewable Fuel Standard (RFS), que exige a adição de uma certa porcentagem de biocombustíveis na gasolina (SORIA et al., 2018).

Apesar dos avanços, a implementação do etanol enfrenta desafios significativos, incluindo questões relacionadas à sustentabilidade da produção de matérias-primas, os custos de produção e a competição com outras fontes de energia renovável, como a energia solar e eólica (CHUM et al., 2011). A escalabilidade do etanol de segunda geração, produzido a partir de biomassa não alimentar, representa uma das principais apostas para a

ampliação de sua participação na matriz energética, dado seu potencial para reduzir ainda mais as emissões de carbono.

A substituição de combustíveis fósseis pelo etanol contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Estudos indicam que o uso de etanol pode reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) em até 90% quando comparado com a gasolina, dependendo do processo de produção e das matérias-primas utilizadas (FARGIONE et al., 2008; MACEDO et al., 2008). Além disso, o etanol de segunda geração oferece uma vantagem adicional ao utilizar resíduos agrícolas e florestais, minimizando a emissão de gases provenientes do processo produtivo.

O ciclo de vida do etanol, desde a produção das matérias-primas até a combustão final, apresenta um balanço energético positivo, ou seja, a quantidade de energia renovável gerada é superior à energia fóssil consumida durante todo o processo. Esse balanço é particularmente favorável no caso do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, amplamente utilizado no Brasil (MORAIS & ZUIN, 2014).

Além da redução de emissões, o etanol também promove a sustentabilidade ambiental através da diminuição da poluição atmosférica. O uso de etanol como combustível resulta em menores emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs), monóxido de carbono (CO), e partículas em suspensão, que são poluentes prejudiciais à saúde humana (CARDOSO et al., 2018). No entanto, é necessário um manejo sustentável das plantações de cana-de-açúcar e de outras matérias-primas para evitar impactos negativos, como a degradação do solo e a contaminação dos recursos hídricos.

O etanol oferece diversas oportunidades tanto no setor de transporte quanto na indústria. No setor de transporte, o etanol tem sido utilizado principalmente como biocombustível em veículos leves, mas sua aplicação está se expandindo para o transporte pesado, aviação e transporte marítimo, segmentos que tradicionalmente dependem de combustíveis fósseis mais poluentes (SIMAS et al., 2020). A introdução de motores *flex-fuel*, que podem funcionar com diferentes proporções de etanol e gasolina, representa uma inovação significativa, facilitando a adoção do etanol em mercados globais (STEFANINI et al., 2021).

Na indústria, o etanol não é apenas um combustível, mas também um insumo químico versátil, utilizado na produção de plásticos, solventes e outros produtos químicos

renováveis. A substituição de derivados do petróleo por etanol em processos industriais contribui para a descarbonização da indústria e para o desenvolvimento de uma economia circular, onde os resíduos são minimizados e os recursos são utilizados de forma mais eficiente (FERREIRA-LEITÃO et al., 2010). A indústria química tem, portanto, a oportunidade de se reinventar através do uso do etanol como uma matéria-prima renovável, alinhando-se às demandas por produtos mais sustentáveis.

Em conclusão, o etanol desempenha um papel crucial na transição energética, não apenas por suas vantagens ambientais e econômicas, mas também pelas oportunidades que oferece em diversos setores da economia. Com políticas adequadas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento, o etanol pode se consolidar como uma das principais fontes de energia renovável do século XXI.

2- OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é conduzir uma análise detalhada e crítica sobre o papel do etanol na transição energética global, enfatizando sua relevância como uma fonte de energia renovável capaz de mitigar as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade ambiental. A partir de uma avaliação abrangente, busca-se entender como o etanol se insere na matriz energética atual, explorando os diferentes contextos em que tem sido implementado e analisando as políticas e estratégias que têm impulsionado sua adoção em diversos países.

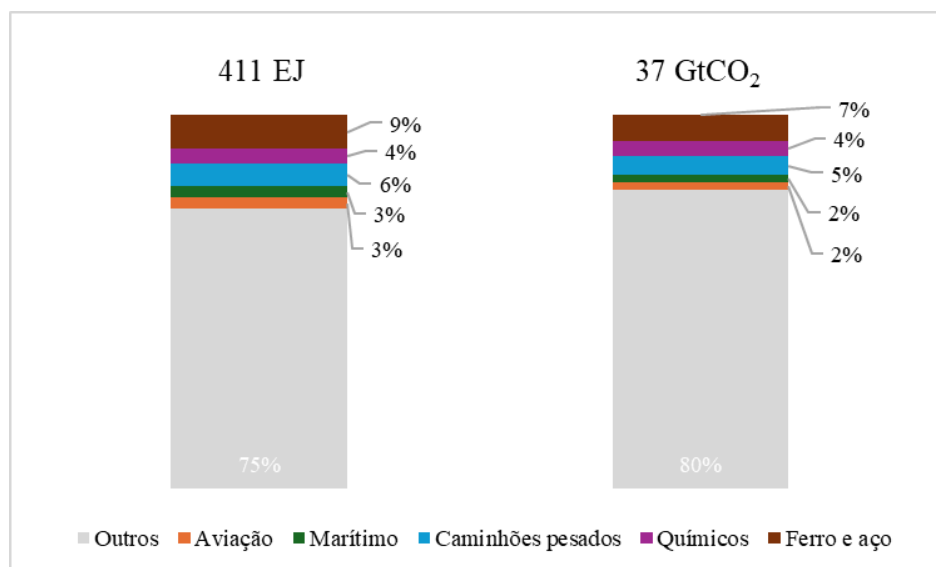
Além disso, o trabalho visa aprofundar a compreensão dos impactos ambientais associados ao uso do etanol, considerando o ciclo de vida completo deste biocombustível, desde a produção das matérias-primas até sua utilização final. Com base nessa análise, pretende-se identificar as oportunidades e os desafios presentes nos setores de transporte, mobilidade e industrial, onde o etanol pode desempenhar um papel fundamental na substituição de combustíveis fósseis e de insumos derivados do petróleo, como uma solução mais sustentável e de baixo carbono.

Ao final, espera-se que o trabalho contribua para uma visão clara e fundamentada sobre quais rotas tecnológicas baseadas em etanol e seus derivados são mais promissoras e quais desafios precisam ser superados para que essas rotas alcancem a maturidade necessária do ponto de vista da engenharia química.

3- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A descarbonização dos setores "hard-to-abate" representa um dos maiores desafios na transição energética global, devido às suas particularidades físicas, tecnológicas e de mercado. Esses setores, que incluem a aviação, o transporte marítimo e as indústrias químicas e petroquímicas, são responsáveis por uma parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa, contribuindo de forma desproporcional para o aquecimento global. A Figura 3.1 ilustra o consumo de energia e as emissões de CO₂ para setores considerados hard-to-abate em 2022. Esta representação gráfica destaca a complexidade dos desafios enfrentados por esses setores na transição para uma economia de baixo carbono, evidenciando a necessidade urgente de estratégias eficazes de mitigação.

Figura 3.1. Consumo de energia e emissões de CO₂ para setores hard-to-abate, 2022.



Fonte: Adaptado de IRENA (2024).

Para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, conforme estabelecido no Acordo de Paris, é imperativo que todos os setores da economia, especialmente os mais difíceis de descarbonizar, alcancem a neutralidade de carbono até 2050.

No entanto, ao contrário de setores como o transporte rodoviário de passageiros, em

que o caminho para a neutralidade de carbono já está bem delineado com o aumento exponencial nas vendas de veículos elétricos e consumo de renováveis, a transformação nos setores "hard-to-abate" tem sido mais lenta e desafiadora. Isso ocorre devido à necessidade de mudanças profundas nos sistemas energéticos e operacionais desses setores, demandando não apenas novos investimentos massivos, mas também inovações tecnológicas capazes de substituir os combustíveis fósseis por alternativas mais limpas e sustentáveis (IRENA, 2024).

Dentre as soluções tecnológicas viáveis para a descarbonização desses setores, o etanol surge como uma alternativa promissora, especialmente nos contextos da aviação, do transporte marítimo e da indústria química e petroquímica. Esses setores, por sua natureza, possuem barreiras consideráveis à eletrificação direta, o que torna a adoção de biocombustíveis e combustíveis sintéticos, como o etanol, uma estratégia essencial para a redução das emissões. O etanol, além de ser uma fonte de energia renovável e de baixo carbono, possui a vantagem de poder ser produzido a partir de biomassa, o que contribui para a sustentabilidade ambiental e a diversificação da matriz energética (GOLDENBERG, 2007).

No setor de aviação, o etanol pode ser utilizado na produção de combustíveis de aviação sustentáveis (SAFs), que são vistos como uma das principais soluções para a redução das emissões de carbono nas viagens aéreas. Similarmente, no transporte marítimo, o etanol pode ser convertido em biocombustíveis avançados, oferecendo uma alternativa viável aos combustíveis fósseis atualmente utilizados nos navios, que são grandes emissores de CO₂ (SIMAS et al., 2020). Por fim, na indústria química e petroquímica, o etanol pode desempenhar um papel crítico como insumo para a produção de uma vasta gama de produtos químicos renováveis, contribuindo para a substituição de insumos fósseis e a redução da pegada de carbono desses processos industriais.

A plena descarbonização desses setores exigirá uma combinação de abordagens que incluam, além do uso de etanol, melhorias contínuas na eficiência energética, a aplicação dos princípios da economia circular e a implementação de mudanças comportamentais e de processos que reduzam a demanda por energia. Além disso, o desenvolvimento e a adoção de tecnologias de captura, utilização e remoção de CO₂ serão fundamentais para complementar essas estratégias, garantindo que as emissões remanescentes sejam adequadamente mitigadas (IRENA, 2024).

A transição para um modelo energético sustentável nos setores "hard-to-abate" requer uma ação decisiva tanto por parte dos governos quanto do setor privado, com implicações profundas em termos de políticas nacionais e internacionais, regulamentações, planejamento tecnológico e de infraestrutura, mercados globais de commodities, cadeias de suprimento internacionais e modelos de negócios (SOUZA et al., 2017). Ao explorar o potencial do etanol nesses setores específicos, este trabalho pretende contribuir para o debate sobre as rotas tecnológicas mais promissoras para a descarbonização e os desafios que ainda precisam ser superados para que essas tecnologias alcancem a maturidade necessária para uma implementação em larga escala.

3.1 Sustentabilidade do etanol

O etanol, um biocombustível derivado de fontes renováveis como a cana-de-açúcar, o milho e outras biomassas, tem sido amplamente promovido como uma solução sustentável para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e para a promoção de um sistema energético mais ecológico. Sua produção e uso como combustível têm o potencial de mitigar impactos ambientais negativos associados ao uso de combustíveis fósseis, além de oferecer benefícios sociais significativos, especialmente em regiões agrícolas.

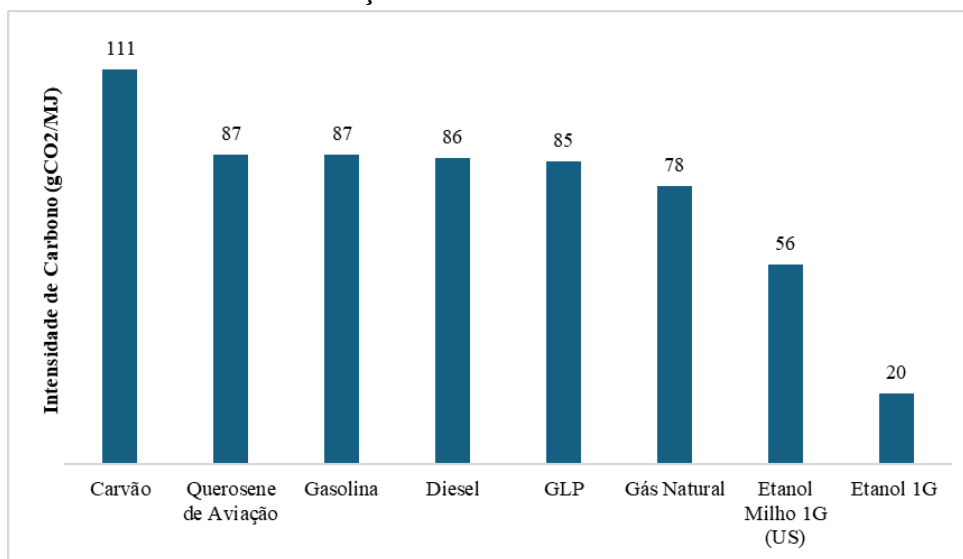
3.1.1 Redução das emissões de gases de efeito estufa através do uso de etanol

Como dito anteriormente, o principal argumento em favor do etanol como combustível renovável reside em sua capacidade de reduzir as emissões de GEE em comparação aos combustíveis fósseis tradicionais. Durante o ciclo de vida do etanol, a quantidade de CO₂ emitida na sua combustão é compensada pela absorção de CO₂ pelas plantas durante o processo de fotossíntese, o que resulta em uma "pegada de carbono" significativamente menor (MACEDO et al., 2008). Segundo estudos do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a substituição de gasolina por etanol pode reduzir as emissões de GEE em até 90% (U.S. Renewable Fuel Standard - RFS), dependendo do

processo de produção e da matéria-prima utilizada.

Além disso, o uso de etanol contribui para a diversificação da matriz energética e reduz a dependência de combustíveis fósseis, o que é crucial para a mitigação das mudanças climáticas. A produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, por exemplo, é particularmente eficiente em termos de balanço energético, com uma relação de energia renovável produzida por unidade de energia fóssil consumida que pode superar 9:1. Essa eficiência não apenas contribui para a redução das emissões de GEE, mas também melhora a viabilidade econômica do etanol como alternativa aos combustíveis convencionais (MACEDO et al., 2008). A Figura 3.2 apresenta uma comparação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) entre o etanol de cana-de-açúcar e outros combustíveis. Essa análise permite entender as vantagens ambientais do etanol em relação a fontes de energia convencionais.

Figura 3.2. Comparação de emissões de GEE entre etanol de cana-de-açúcar e demais combustíveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Benefícios ambientais e sociais do uso de etanol como combustível renovável

Além da redução das emissões de GEE, o uso do etanol oferece diversos outros benefícios ambientais e sociais. Ambientalmente, o etanol contribui para a melhoria da qualidade do ar urbano, já que sua combustão resulta em emissões menores de poluentes como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados e material particulado, em comparação a outros combustíveis fósseis. Este efeito é particularmente relevante em grandes centros urbanos, onde a poluição do ar é uma preocupação crescente (CARDOSO et al., 2018).

Do ponto de vista social, a produção de etanol, especialmente em países em desenvolvimento, pode gerar importantes benefícios econômicos e sociais, incluindo a criação de empregos e o desenvolvimento rural. No Brasil, por exemplo, a indústria do etanol emprega diretamente mais de 1 milhão de pessoas, contribuindo para o desenvolvimento econômico de regiões agrícolas e a redução da pobreza (UNICA, 2020). Além disso, a produção de etanol a partir de biomassa pode ser integrada a sistemas agrícolas sustentáveis, promovendo a rotação de culturas e a recuperação de solos degradados.

3.2 Comércio internacional de etanol

O comércio internacional de etanol desempenha um papel imprescindível na integração dos mercados globais de energia renovável e na promoção da descarbonização em escala mundial (FAO, 2020). À medida que a demanda por combustíveis de baixo carbono cresce, o comércio de etanol oferece oportunidades para países produtores expandirem seus mercados e para países consumidores diversificarem suas fontes de energia.

O mercado global de etanol é dominado por dois grandes produtores: Brasil e Estados Unidos, que juntos respondem por cerca de 80% da produção mundial (USDA, 2023). O etanol produzido nos Estados Unidos é predominantemente derivado do milho, enquanto o Brasil utiliza principalmente a cana-de-açúcar como matéria-prima. O comércio internacional de etanol é influenciado por uma série de fatores, incluindo políticas de incentivo aos biocombustíveis, flutuações nos preços do petróleo, e acordos comerciais (SOUZA et al., 2017).

A Tabela 3.1 mostra a produção mundial anual de etanol combustível em milhões de galões. Os dados apresentados fornecem uma visão abrangente do crescimento e da importância do etanol no mercado global de combustíveis, além de destacar as principais regiões produtoras e suas contribuições para a oferta global.

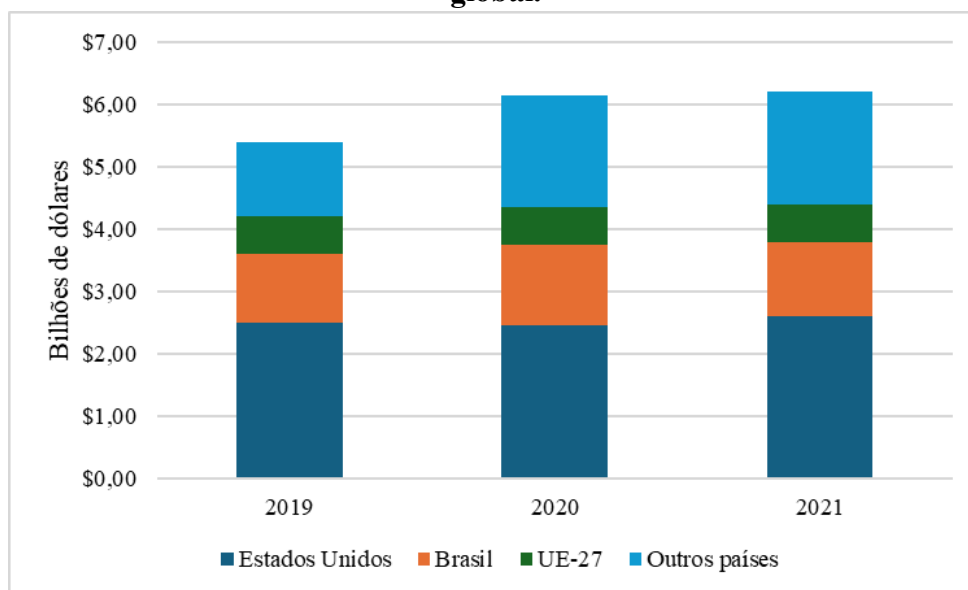
Tabela 3.1. Produção mundial anual de etanol combustível (milhões de galões).

Região	2021	2022	2023	% da Produção Mundial
Estados Unidos	15016	15361	15620	53%
Brasil	7320	7400	8260	28%
União Europeia	1410	1460	1440	5%
Índia	870	1230	1430	5%
China	900	920	950	3%
Canadá	434	447	460	2%
Tailândia	350	370	370	1%
Argentina	270	310	300	1%
Outros países	680	722	760	3%

Fonte: Adaptado de Renewable Fuels Association (2024).

O Brasil está entre os maiores exportadores de etanol, com mercados importantes na Ásia, Europa e América do Norte (UNICA, 2020). Já os Estados Unidos são tanto um grande exportador quanto importador, dependendo das variações sazonais e dos preços domésticos (USDA, 2023). O mercado europeu, por sua vez, tem se mostrado cada vez mais receptivo ao etanol, impulsionado por políticas de descarbonização e metas de energia renovável estabelecidas pela União Europeia (European Commission, 2021), como mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3. Principais exportadores de etanol no mercado global.



Fonte: Adaptado de U.S. Department of Agriculture (2024).

O comércio internacional de etanol oferece diversas oportunidades, particularmente em termos de descarbonização global e diversificação de fontes de energia. Para países produtores, a exportação de etanol representa uma fonte significativa de receita e um meio de impulsionar o desenvolvimento rural e industrial. Além disso, o etanol pode servir como uma ferramenta de diplomacia energética, promovendo parcerias internacionais para o combate às mudanças climáticas (UNICA, 2020).

Porém, o comércio de etanol enfrenta vários desafios. Um dos principais é a harmonização das normas e padrões de sustentabilidade entre diferentes países e regiões, o que pode dificultar o acesso a mercados e aumentar os custos de produção. A volatilidade dos preços do petróleo também pode impactar a competitividade do etanol no mercado global, assim como as tarifas e subsídios que favorecem a produção doméstica em detrimento das importações. Além disso, a logística de transporte e armazenamento de etanol, que é higroscópico e corrosivo, apresenta desafios adicionais, especialmente para longas distâncias (IRENA, 2021).

Superar esses desafios requer a cooperação internacional e a implementação de políticas que promovam o comércio justo e sustentável de etanol. A criação de um mercado global para créditos de carbono e a adoção de normas internacionais harmonizadas para a certificação de biocombustíveis são passos importantes nesse sentido.

(FAO, 2023). Dessa forma, o etanol pode desempenhar um papel central na transição para uma economia de baixo carbono, não apenas como combustível renovável, mas também como uma mercadoria global que contribui para a segurança energética e a mitigação das mudanças climáticas.

3.3 Cenário de emissões e consumo energético por setor

3.3.1 Químicos e petroquímicos

Os produtos químicos são fundamentais para a nossa vida cotidiana, sendo amplamente utilizados em diversas indústrias, tecnologias e produtos domésticos. No entanto, a maior parte das emissões do setor químico é originada de um número relativamente pequeno de produtos, principalmente amônia, metanol e produtos de craqueamento a vapor, como etileno, propileno, butadieno e aromáticos. A amônia, por exemplo, é um insumo essencial, com aproximadamente 85% de sua produção destinada à fabricação de fertilizantes nitrogenados sintéticos, os quais são cruciais para a segurança alimentar global (IRENA, 2020). O metanol, por sua vez, é uma substância básica na produção de uma vasta gama de compostos, incluindo solventes, resinas e produtos farmacêuticos. Os "químicos de alto valor" (HVCs), como olefinas (principalmente etileno, propileno e butadieno) e aromáticos (como benzeno, tolueno e xileno), são blocos de construção essenciais para uma variedade de produtos em várias indústrias, como plásticos, fibras sintéticas como o náilon, e outros polímeros (IEA, 2020).

Esses produtos químicos, apesar da importância industrial e econômica, são grandes contribuintes para as emissões de gases de efeito estufa, o que coloca o setor de químicos e petroquímicos no centro dos desafios de descarbonização (IEA, 2020). A transição para alternativas mais sustentáveis pode reduzir significativamente essas emissões, destacando o papel crítico que o etanol pode desempenhar na transformação do setor.

Para entender o papel do etanol na descarbonização da indústria química, é essencial reconhecer que, embora o etanol em si não seja a matéria-prima direta mais

convencional para a substituição de fósseis empregados na produção de produtos químicos, ele desempenha um papel fundamental em um ecossistema mais amplo de bioenergia. Esse ecossistema é caracterizado pela integração de processos que maximizam o aproveitamento de subprodutos, criando uma cadeia de valor que contribui para a descarbonização de diversos setores industriais.

A produção de etanol gera subprodutos como a vinhaça e a torta de filtro, que tradicionalmente eram vistos como resíduos. No entanto, esses subprodutos podem ser convertidos em biometano, uma fonte importante de energia renovável. O biometano, por sua vez, pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de produtos químicos de alto valor, como etileno e propileno, que são fundamentais para a fabricação de plásticos e outros polímeros. Estudos indicam que essa abordagem integrada não só melhora a eficiência energética da planta de produção, mas também contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa na cadeia de produção química (IRENA, 2020).

Além do biometano, outra vertente promissora na descarbonização da indústria química é a utilização de hidrogênio renovável, que pode ser produzido a partir de energia limpa, para a síntese de produtos químicos como o metanol. O hidrogênio pode ser combinado com o CO₂ capturado durante a produção de etanol para gerar metanol e outros compostos, utilizando a infraestrutura já existente na indústria química. Esse processo é conhecido como síntese de metanol a partir de hidrogênio e CO₂, e é visto como uma solução eficiente para reduzir as emissões de carbono, ao mesmo tempo em que aproveita as sinergias entre diferentes processos industriais (IEA, 2021; Pérez-Fortes et al., 2016).

O conceito de biorrefinaria, em que o etanol e o biometano são produzidos conjuntamente, exemplifica como o etanol se encaixa em uma estratégia mais ampla de descarbonização. Em uma biorrefinaria, a integração de processos permite a produção simultânea de vários produtos, otimizando o uso de matérias-primas e reduzindo o desperdício. Essa abordagem não só diminui a dependência de fontes fósseis, mas também promove uma economia circular, onde os resíduos de um processo são utilizados como insumos para outro, aumentando a sustentabilidade geral da operação (Cherubini, 2010).

Portanto, o etanol, embora não seja diretamente a matéria-prima mais convencional para produção de certos produtos químicos, é crucial para a criação de um ambiente

industrial sustentável. Sua produção e o uso eficiente de seus subprodutos, como o biometano e o CO₂ capturado, podem transformar a indústria química, possibilitando a transição para um modelo de produção mais limpo e alinhado com os objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas.

A produção de amônia, metanol e produtos químicos de alto valor (HVCs), conhecidos como produtos químicos primários, tem aumentado continuamente nas últimas décadas, com essa produção dependendo quase exclusivamente de combustíveis fósseis e matérias-primas derivadas de hidrocarbonetos. Ao longo da última década, a produção de amônia cresceu modestamente, com uma taxa de crescimento anual média de 1% (IEA, 2024). Em 2022, aproximadamente 187 milhões de toneladas (Mt) de amônia foram produzidas globalmente, com a maior parte derivada de gás natural (72%) e carvão (26%) (BNEF, 2024b). A produção de metanol, por sua vez, praticamente dobrou na última década, crescendo a uma taxa média anual de 6,5% (IEA, 2024). Em 2022, cerca de 106 Mt de metanol foram produzidas globalmente, com mais da metade dessa produção concentrada na China (Methanol Institute, 2024a). Quanto à matriz energética, cerca de 65% do metanol global é derivado do gás natural, 35% do carvão e apenas 0,2% de fontes renováveis (IRENA et al., 2021).

A demanda por HVCs tem aumentado consistentemente na última década, com uma taxa de crescimento anual média de 3% (IEA, 2024). Especificamente, a produção de plásticos quase dobrou desde o início deste século, atingindo cerca de 400 Mt no final de 2022 (OECD, 2022b; Plastics Europe, 2023). Atualmente, 90% dos produtos plásticos ainda são fabricados a partir de matérias-primas fósseis. Em 2022, os plásticos de base biológica representavam apenas 0,5% da produção total de plásticos, o que equivale a 2,3 Mt, em termos absolutos. Globalmente, cerca de 9% da produção de plásticos é proveniente da reciclagem de resíduos plásticos (Plastics Europe, 2023).

Em 2022, a produção desses produtos químicos primários foi responsável por aproximadamente 936 Mt de emissões diretas de CO₂, representando cerca de 72% do total de emissões de CO₂ do setor de químicos e petroquímicos (IEA, 2023a). A produção de amônia é a maior responsável por essas emissões diretas, com 45% do total, seguida pelo metanol com 28%, sendo o restante derivado da produção de HVCs (IEA, 2024).

Embora o setor de produtos químicos primários seja o maior consumidor de energia

industrial, ele é apenas o terceiro maior emissor de CO₂. O setor apresenta uma distribuição quase igual das emissões provenientes do uso de energia nos processos de produção e do uso de matérias-primas. Isso indica que parte dos estoques de hidrocarbonetos é incorporada tanto nos produtos em uso quanto naqueles que acabam em sistemas de disposição de resíduos, controlados ou não, ao redor do mundo (IRENA, 2020).

Segundo o Cenário de Energia Planejada da IRENA, com intervenções e ações limitadas, as emissões de CO₂ do setor podem mais que triplicar, passando de 1,3 Gt em 2022 para 4,7 Gt em 2050 (IEA, 2023a; IRENA, 2023a). Atualmente, a maior parte do plástico pós-consumo é destinada a aterros, incinerada ou mal gerida, com apenas 9% sendo reciclada globalmente (OECD, 2022b). As baixas taxas de reciclagem e recuperação de energia aumentam o uso de energia e as emissões de CO₂. Além disso, práticas inadequadas de gestão de resíduos contribuem para a poluição do ar e da água, impactando as ecologias locais. Isso ressalta a necessidade urgente de transformar o setor, tanto do ponto de vista climático quanto da sustentabilidade.

3.3.2 Setor de aviação

A aviação desempenha um papel crucial na conectividade global, viabilizando negócios internacionais, facilitando o comércio e o turismo global e proporcionando um meio de transporte rápido. O setor é um motor de crescimento econômico, reduzindo o tempo de viagem e aumentando a interconexão global (Graver, 2022). No entanto, um dos principais desafios enfrentados pela aviação é equilibrar seus benefícios sociais e econômicos com a responsabilidade ambiental crescente. Como um dos modos de transporte mais intensivos em carbono, a aviação contribui significativamente para as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) e para as mudanças climáticas (IEA, 2023a).

Além das emissões de CO₂, a aviação também é responsável por outras emissões não relacionadas ao CO₂, incluindo gases e partículas de aerossóis que afetam a composição atmosférica e a formação de nuvens, exacerbando ainda mais o impacto

ambiental do setor (Lee, 2018). Essas emissões não-CO₂, como o vapor d'água e os óxidos de nitrogênio (NO_x), desempenham um papel importante na formação de trilhas de condensação (contrails) e cirros induzidos, que têm efeitos adicionais sobre o aquecimento global (Graver, 2022; Lee et al., 2021).

Nas últimas décadas, a demanda por serviços de aviação cresceu continuamente e estima-se que possa dobrar até 2050, em comparação com os níveis de 2022 (IATA, 2023). Esse crescimento acentuado aumenta a urgência de implementar soluções rápidas de descarbonização. Em 2022, o consumo de energia do setor de aviação global alcançou 11 exajoules (EJ), o que corresponde a 10% do consumo de energia relacionado ao transporte no mundo e 3% do consumo total de energia global (IEA, 2023a). Esta demanda energética foi atendida quase exclusivamente por combustíveis fósseis, com apenas 450 milhões de litros de combustíveis sustentáveis para aviação (SAF) sendo consumidos, representando 0,1% do consumo global de combustíveis para aviação (IATA, 2022).

A dependência de combustíveis fósseis faz com que a aviação contribua significativamente para as emissões globais de CO₂ e para as mudanças climáticas. Em 2022, as emissões de CO₂ da aviação atingiram 0,8 gigatoneladas (Gt), equivalendo a entre 2% e 3% das emissões globais e 10% de todas as emissões relacionadas ao transporte (IEA, 2023a). Embora o crescimento das emissões da aviação tenha sido contínuo, ele foi parcialmente compensado por melhorias substanciais na eficiência. Essas melhorias resultaram em até 11 Gt de redução de emissões de CO₂ desde 1990 (ATAG, 2021).

Contudo, devido às limitações de massa e volume das aeronaves, a aviação depende de combustíveis altamente densos em energia. Existem alternativas de combustíveis sustentáveis, como os SAFs, mas elas apresentam um custo elevado (Graver, 2022). Além disso, a escolha limitada de combustíveis utilizáveis e a imaturidade das tecnologias alternativas de aeronaves, como as movidas a eletricidade ou hidrogênio, restringem as vias de descarbonização disponíveis para o setor (IEA, 2023a).

Embora a aviação seja tradicionalmente dependente de combustíveis fósseis, há um crescente reconhecimento do etanol como um caminho viável para a descarbonização do setor. O etanol, quando utilizado como matéria-prima para a produção de combustíveis sustentáveis para aviação (SAF), pode contribuir significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao transporte aéreo.

O etanol tem a capacidade de ser convertido em bioquerosene por meio de processos como o *Alcohol-to-Jet* (AtJ), o qual será mais detalhado a seguir. Este processo transforma o etanol em um combustível compatível com as exigências da aviação moderna, ao mesmo tempo que reduz a pegada de carbono do setor. A vantagem do etanol como precursor de SAFs está na sua disponibilidade e na tecnologia já estabelecida para sua produção em larga escala, além de seu papel na mitigação das emissões de carbono ao substituir combustíveis fósseis (Liu et al., 2022; IATA, 2023).

Em linhas gerais, os combustíveis sustentáveis para aviação (SAFs) são combustíveis não fósseis que são produzidos de maneira sustentável, oferecendo uma alternativa mais ecológica aos combustíveis de aviação convencionais. Ao contrário dos biocombustíveis tradicionais, que são derivados exclusivamente de fontes biológicas, os SAFs englobam uma variedade mais ampla de matérias-primas, incluindo resíduos plásticos, pneus usados, e resíduos industriais. No entanto, as matérias-primas mais comuns para a produção de SAFs são de origem animal ou vegetal, o que muitas vezes leva à confusão entre SAFs e biocombustíveis de aviação, também conhecidos como bioquerosene de aviação (BioQAV) (IATA, 2022).

Os SAFs possuem características físico-químicas que permitem sua mistura com combustíveis fósseis de aviação sem comprometer a qualidade ou exigir modificações nos motores das aeronaves. Além disso, os SAFs são projetados para ser compatíveis com a infraestrutura existente de armazenamento e transporte de combustíveis de aviação, permitindo a utilização das mesmas instalações sem a necessidade de adaptações significativas (ICAO, 2017). Essa compatibilidade é descrita pelo termo "*drop-in*," que se refere à capacidade dos SAFs de serem integrados diretamente aos combustíveis tradicionais.

Apesar do estágio inicial de implementação, os SAFs representaram apenas 0,1% do consumo total de combustíveis de aviação em 2020. No entanto, há uma expectativa crescente de que, com incentivos políticos e econômicos adequados, essa participação possa aumentar para cerca de 2,5% em poucos anos. O desenvolvimento da cadeia de produção e comercialização de SAFs está se acelerando, evidenciado pelos acordos firmados em 2020 para a compra de aproximadamente 6 bilhões de litros de SAFs (IEA, 2023a).

3.3.3 Setor marítimo

O transporte marítimo desempenha um papel essencial na economia global, facilitando o comércio internacional e possibilitando o movimento de mercadorias e recursos ao redor do mundo. Em 2022, o comércio marítimo internacional atingiu 11 bilhões de toneladas, representando mais de 80% do comércio global em termos de volume, com destaque para o transporte de grãos sólidos, petróleo e mercadorias containerizadas (UNCTAD, 2023). Um terço desse comércio marítimo está relacionado ao transporte de produtos energéticos fósseis, evidenciando que o setor não é apenas consumidor de energia, mas também um meio crucial para seu transporte (IRENA, 2024). A descarbonização dos sistemas energéticos, do transporte rodoviário e da produção de calor, impulsionada pela eletricidade renovável, resultará em uma significativa redução na demanda por produtos energéticos fósseis e, conseqüentemente, na necessidade de transporte marítimo desses *commodities*. Contudo, o setor continuará desempenhando um papel importante na aceleração da descarbonização de outros setores de transporte e industrial, ajudando a suprir a crescente demanda por combustíveis e produtos químicos verdes (IRENA, 2024).

Os navios são ativos de longa duração, o que significa que as embarcações lançadas nos próximos anos determinarão, em grande parte, a composição da frota e a mistura de combustíveis por duas ou três décadas (IRENA, 2024). Isso ressalta a necessidade urgente de uma transição para embarcações movidas a energia renovável, sob o risco de não se atingir as metas globais de zero emissões líquidas até 2050.

Embora o transporte marítimo seja uma das modalidades de transporte menos intensivas em carbono, quando consideramos as emissões por passageiro por quilômetro (pkm) ou por tonelada por quilômetro (tkm), o setor ainda é um grande poluidor devido à magnitude de sua atividade (European Environment Agency, 2023). Em 2022, o consumo de energia no setor de transporte marítimo atingiu 11,2 EJ, representando 3% do consumo total de energia global e 10% do consumo de energia relacionado ao transporte (IRENA, 2024). O volume de atividade do comércio marítimo praticamente dobrou nos últimos 20 anos, passando de 55 trilhões de tkm em 2002 para 110 trilhões de tkm em 2022 (UNCTAD, 2023). As projeções da Organização Marítima Internacional (IMO) sugerem que essa atividade pode aumentar entre 40% e 100% até 2050, dependendo da evolução da

demanda por petróleo, carvão e gás natural devido à transição energética.

Em 2022, as emissões de CO₂ do setor marítimo ultrapassaram 0,8 Gt, equivalentes a 2% a 3% das emissões globais de CO₂, ou cerca de 10% das emissões relacionadas ao transporte. Cerca de 80% dessas emissões provêm do transporte marítimo internacional (IPCC, 2021).

O setor de transporte marítimo é fortemente dependente de combustíveis fósseis de baixo custo e baixa qualidade, como o óleo combustível pesado (HFO) e o óleo diesel marinho. Em 2020, a IMO introduziu uma regulamentação global destinada a reduzir significativamente as emissões de óxidos de enxofre, o que impulsionou uma mudança rápida e generalizada no setor para a adoção de óleo combustível com teor muito baixo de enxofre (VLSFO) ou a instalação de sistemas de lavagem de gases (*scrubbers*) a bordo (IRENA, 2024).

Existem várias alternativas compatíveis com o objetivo de zerar as emissões de carbono para os combustíveis marinhos convencionais, como biocombustíveis de baixo carbono produzidos de forma sustentável, e-combustíveis verdes, ou combustíveis híbridos, como o PBtL (*power and biomass-to-liquid*). No entanto, essas alternativas ainda têm um custo significativamente maior (IRENA, 2024). A maior parte da atividade comercial marítima é realizada por navios porta-contêineres, graneleiros e petroleiros, que representam apenas cerca de 20% da frota global, mas são responsáveis por 80%-85% das emissões de GEE associadas ao setor (IMO, 2021). Isso indica que intervenções direcionadas nesses tipos de embarcações podem ter um impacto desproporcional na redução das emissões.

Para fortalecer a transição para combustíveis marítimos mais sustentáveis, o etanol surge como uma peça-chave dentro de um ecossistema mais amplo voltado para a produção de bio *bunkers* (Peters et al., 2022). Esse combustível renovável pode ser utilizado como matéria-prima para a síntese de combustíveis marítimos avançados, que oferecem uma alternativa de baixo carbono ao óleo combustível pesado (HFO) tradicionalmente utilizado no transporte marítimo. Essa alternativa sustentável não apenas reduz as emissões de CO₂, mas também diminui a liberação de outros poluentes, como óxidos de enxofre, que são prejudiciais tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana.

Nesse cenário, o etanol se integra a outras tecnologias de produção de biocombustíveis, como a gaseificação e a liquefação de biomassa, criando combustíveis híbridos que atendem às rigorosas demandas energéticas do setor marítimo. Essa abordagem não só apoia a descarbonização do transporte marítimo, como também facilita a transição energética necessária para alcançar as metas de neutralidade de carbono até 2050, conforme estabelecido em acordos internacionais e políticas globais de sustentabilidade.

4- METODOLOGIA

Este trabalho adota um modelo de revisão bibliográfica, cujo objetivo principal é proporcionar uma análise crítica e aprofundada do papel do etanol na transição energética global. Diferente de estudos empíricos que envolvem experimentação ou coleta de dados primários, a revisão bibliográfica se baseia na sistematização e na interpretação de informações já existentes na literatura acadêmica e científica. Essa abordagem permite uma compreensão abrangente e detalhada do estado da arte sobre o tema, oferecendo uma base sólida para a formulação de novas hipóteses, teorias e práticas no campo da engenharia química.

A escolha por uma revisão bibliográfica justifica-se pela vasta quantidade de pesquisas e estudos já realizados sobre o etanol, sua produção, impacto ambiental e aplicações. Ao compilar e analisar criticamente essas informações, este trabalho busca identificar padrões, tendências e lacunas na literatura que possam contribuir para um entendimento mais claro e fundamentado do tema. Segundo Fink (2014), a revisão bibliográfica é uma ferramenta essencial para "integrar e sintetizar o conhecimento disponível, fornecendo uma visão geral do que se sabe e do que ainda precisa ser investigado". Dessa forma, este estudo pretende não apenas resumir as descobertas existentes, mas também propor novas perspectivas e questionamentos sobre o papel do etanol na matriz energética global.

A metodologia deste trabalho envolve uma busca rigorosa e criteriosa por fontes acadêmicas e científicas em bases de dados reconhecidas, como Google Scholar, Science Direct, Portal de Periódicos CAPES, Scopus, e Web of Science. A pesquisa utilizou palavras-chave como "etanol", "produção de SAF", "*hard-to-abate sectors*", "etanol na

transição energética", "etanol no setor de transporte", e "etanol na indústria", tanto em inglês quanto em português, para garantir a abrangência e a pertinência dos resultados.

Foram incluídos artigos, livros, teses, dissertações e relatórios técnicos que abordam temas relevantes ao etanol, desde sua produção e impacto ambiental até suas aplicações nos setores de transporte, mobilidade e industrial. A seleção das fontes foi orientada por critérios de relevância, atualidade (priorizando publicações dos últimos 10 anos, quando disponíveis), e credibilidade (considerando o fator de impacto das revistas e a reputação dos autores e instituições). Esses critérios garantem que as informações utilizadas sejam as mais pertinentes e precisas disponíveis, assegurando a qualidade e a confiabilidade das conclusões apresentadas neste trabalho.

Após a coleta de dados, as informações serão organizadas e categorizadas de acordo com os temas centrais do trabalho: a participação do etanol na matriz energética, seu impacto na redução de emissões e na sustentabilidade ambiental, e as oportunidades no setor de transporte e industrial. A análise crítica será conduzida a partir da comparação entre diferentes estudos e teorias, buscando destacar os pontos de convergência e divergência na literatura, bem como identificar as principais contribuições e limitações dos trabalhos revisados.

A relevância deste modelo para a comunidade científica reside na sua capacidade de oferecer uma síntese crítica e atualizada sobre um tema de grande importância para o desenvolvimento sustentável. Como destaca Hart (1998), uma revisão bem conduzida "pode esclarecer questões complexas, apontar direções para futuras pesquisas e ajudar a informar políticas públicas e práticas industriais". Ao adotar essa abordagem, este trabalho pretende não apenas contribuir para o avanço do conhecimento científico, mas também oferecer subsídios técnicos e teóricos que possam ser utilizados por engenheiros químicos, formuladores de políticas e outros profissionais envolvidos na transição para uma economia de baixo carbono.

Ao final, a pesquisa culminará em uma análise aprofundada dos processos químicos nos quais o etanol e seus derivados podem ser empregados como substitutos aos insumos fósseis, destacando os pontos mais relevantes e detalhando as rotas tecnológicas estudadas. A partir dessa investigação, as informações obtidas serão discutidas com o objetivo de identificar os processos tecnológicos que apresentam maior viabilidade de aplicação

imediate, bem como aqueles que ainda demandam maiores esforços de desenvolvimento para atingir um nível de maturidade adequado. Com essa abordagem, espera-se contribuir de forma significativa para o avanço do conhecimento sobre o etanol como vetor estratégico na transição para uma economia de baixo carbono, oferecendo uma perspectiva técnica fundamentada no campo da engenharia química.

5- ROTAS PARA DESCARBONIZAÇÃO

5.1- Panorama geral

5.1.1 Químicos e petroquímicos

As emissões do setor químico e petroquímico derivam tanto do uso de energia nos processos produtivos quanto dos portadores de energia usados como matéria-prima para produtos químicos. Para alcançar a meta de emissões zero, é essencial eliminar ambas as fontes de emissão. Isso requer uma combinação de caminhos de descarbonização, como a redução da demanda por meio do aumento da reutilização e reciclagem de produtos, a diminuição do consumo energético através da melhoria da eficiência energética dos processos, e a adoção de alternativas baseadas em renováveis para substituição das matérias-primas fósseis. Além disso, a transição para eletricidade de origem renovável e o uso de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS), incluindo bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS), são fundamentais para atingir esses objetivos (IRENA, 2020). Globalmente, desde 2010, a intensidade energética do setor químico e petroquímico tem melhorado a uma taxa anual média entre 0,5% e 1%. Apesar desses ganhos em eficiência, a demanda energética do setor continua crescendo cerca de 3% ao ano (IRENA, 2020).

O papel do etanol é particularmente importante nesse contexto, pois pode ser utilizado na produção de intermediários químicos, como o etileno *bio-based*, que é uma alternativa menos intensiva em carbono ao etileno derivado de combustíveis fósseis. A

produção de etileno *bio-based* a partir do etanol já é realizada em escala comercial, embora os volumes ainda sejam relativamente pequenos, representando menos de 1% da produção global de etileno. Portanto, é necessário aumentar os esforços para ampliar a produção e reduzir os custos, que atualmente são superiores aos do etileno fóssil (IRENA, 2020).

A aplicação dos princípios da economia circular na indústria traz benefícios econômicos, sociais e ambientais substanciais. As medidas de economia circular geralmente incluem o aumento da reutilização, a reciclagem mecânica e química, a substituição de materiais e o uso de matérias-primas sustentáveis para reduzir a demanda. Contudo, a produção de plásticos, por exemplo, deve mais do que dobrar globalmente até 2050, alcançando 986 milhões de toneladas por ano (IRENA, 2023a). No entanto, a reutilização e reciclagem de produtos petroquímicos ainda é limitada e insuficiente. Atualmente, a reciclagem mecânica domina, com menos de 0,1% sendo reciclado quimicamente, devido à inviabilidade econômica deste processo, que pode ser dificultado por impurezas ou requisitos caros de triagem (IRENA, 2020).

Substituir a amônia convencional por amônia renovável também pode contribuir significativamente para a descarbonização do setor químico. Atualmente, a amônia é produzida majoritariamente pelo processo Haber-Bosch, com gás natural como principal combustível e matéria-prima. A amônia renovável pode ser produzida a partir de hidrogênio verde, que é convertido em amônia por meio de um processo de síntese utilizando nitrogênio separado do ar. Embora a tecnologia esteja comercialmente disponível, os custos de produção da amônia renovável são significativamente mais altos do que os da amônia baseada em combustíveis fósseis, com estimativas variando entre USD 720/t e USD 1.400/t para novas plantas, com potencial de queda para entre USD 310/t e USD 610/t até 2050 (IRENA et al., 2022).

Outra alternativa, a qual será mais detalhada no presente trabalho, é o metanol renovável, que pode ser derivado de matérias-primas biogênicas (biometanol) ou sintetizado a partir de hidrogênio verde e dióxido de carbono (e-metanol). O biometanol pode ser produzido via gaseificação ou digestão anaeróbica de uma ampla gama de biomassa, incluindo resíduos agrícolas e florestais, biogás de aterros, esgoto, resíduos sólidos urbanos (MSW) e licor negro da indústria de papel e celulose. Entretanto, os custos de produção do biometanol permanecem mais altos do que os do metanol de origem fóssil, com uma faixa estimada entre USD 327/t e USD 1.013/t, dependendo dos custos da

matéria-prima (IRENA et al., 2021).

O uso de hidrocarbonetos sintéticos como matéria-prima e de energias renováveis para o fornecimento de energia também representa uma opção viável para a descarbonização dos produtos químicos de alto valor. O hidrogênio pode ser produzido por eletrólise alimentada por energias renováveis e sintetizado com uma fonte sustentável de carbono na presença de um catalisador para produzir matérias-primas hidrocarbonadas, que poderiam substituir os produtos petroquímicos primários. No entanto, uma grande barreira para o uso generalizado de hidrocarbonetos sintéticos é a obtenção econômica de carbono sustentável (isto é, carbono que não seja capturado de combustíveis fósseis). Atualmente, a obtenção de CO₂ limpo a partir de biomassa ou captura direta do ar (DAC) é cara e eleva significativamente os custos totais de produção, sendo necessário que esses custos diminuam substancialmente para que essa abordagem se torne uma alternativa competitiva ao uso de matérias-primas baseadas em biomassa (IRENA, 2020).

Além disso, a eletrificação direta pode desempenhar um papel importante na descarbonização dos processos térmicos em todo o setor. E-crackers, que são alternativas elétricas ao tradicional processo de craqueamento a vapor usado para produzir produtos químicos de alto valor, estão atualmente sendo testados em várias plantas-piloto. A Shell e a Dow, por exemplo, instalaram uma unidade experimental de forno de craqueamento a vapor alimentado por eletricidade no *Energy Transition Campus* em Amsterdã, testando-a como substituta dos fornos de craqueamento a vapor a gás. A unidade tem potencial para ser ampliada até 2025 (Shell, 2022). De forma similar, na Alemanha, a BASF, SABIC e Linde iniciaram a construção da primeira planta de demonstração mundial de fornos de craqueamento a vapor aquecidos eletricamente em larga escala, visando uma redução de 90% nas emissões de CO₂ em comparação com a tecnologia convencional (BASF, 2022).

Portanto, a descarbonização do setor químico e petroquímico envolve uma abordagem multifacetada que combina inovações tecnológicas, eficiência energética, economia circular e o uso de matérias-primas renováveis e alternativas sustentáveis para substituir as fontes tradicionais de carbono, ao mesmo tempo em que se superam desafios econômicos e tecnológicos substanciais (IRENA, 2020; IRENA et al., 2021; IRENA et al., 2022; IRENA, 2023a).

5.1.2 Setor de aviação

Uma das abordagens mais promissoras para a descarbonização do setor de aviação é a implementação contínua de melhorias tecnológicas e operacionais na eficiência energética. Apesar dos avanços significativos já realizados, como o desenvolvimento de fuselagens e motores mais eficientes, ainda há espaço para melhorias adicionais. A Organização Internacional da Aviação Civil (ICAO) estabeleceu uma meta aspiracional de longo prazo para aumentar a eficiência do combustível em 2% ao ano até 2050, o que supera a média histórica observada e outras projeções de apenas 1,5% ao ano (ICAO, 2022).

De acordo com o cenário de 1,5°C da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a redução da demanda e a melhoria da eficiência energética são componentes fundamentais nos esforços de descarbonização do setor. Essas medidas podem contribuir para aproximadamente metade da redução de emissões necessárias até 2050 (IRENA, 2023a). Além disso, a substituição de voos de curta distância por trens, que são menos intensivos em carbono, representa outra oportunidade significativa para redução de emissões (European Environment Agency, 2023).

Entre as abordagens tecnológicas mais diretas para descarbonizar o setor está o uso de biocombustíveis avançados, especialmente o bioquerosene, dada a maturidade dessa tecnologia. O bioquerosene pode ser utilizado como combustível *drop-in* em aeronaves existentes e futuras, tornando-o uma opção prática e imediatamente implementável. A IRENA estima que o potencial técnico global para biocombustíveis avançados sustentáveis seja de pelo menos 114 EJ, o que é cerca de oito vezes a demanda energética do setor de aviação (IRENA, 2016). No entanto, a produção global atual de biocombustíveis é de apenas cerca de 4,5 EJ, sendo 90% dessa produção baseada em culturas alimentares e destinada principalmente ao transporte rodoviário (OECD/FAO, 2023).

Um dos principais desafios relacionados aos biocombustíveis é o custo mais elevado em comparação com o combustível de aviação convencional, além da necessidade de aumentar a oferta de forma sustentável. O rápido aumento da produção de biomassa sustentável é complexo e requer uma consideração cuidadosa dos impactos potenciais negativos, especialmente em termos de mudança no uso da terra e das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida. Isso exige controles rigorosos ao longo de toda a

cadeia de suprimentos, mecanismos robustos de certificação e intervenções políticas substanciais no setor agrícola (IRENA, 2020). Além disso, a eletrificação crescente do transporte rodoviário pode permitir o redirecionamento da capacidade de produção de biocombustíveis para outros setores, como aviação e marítimo.

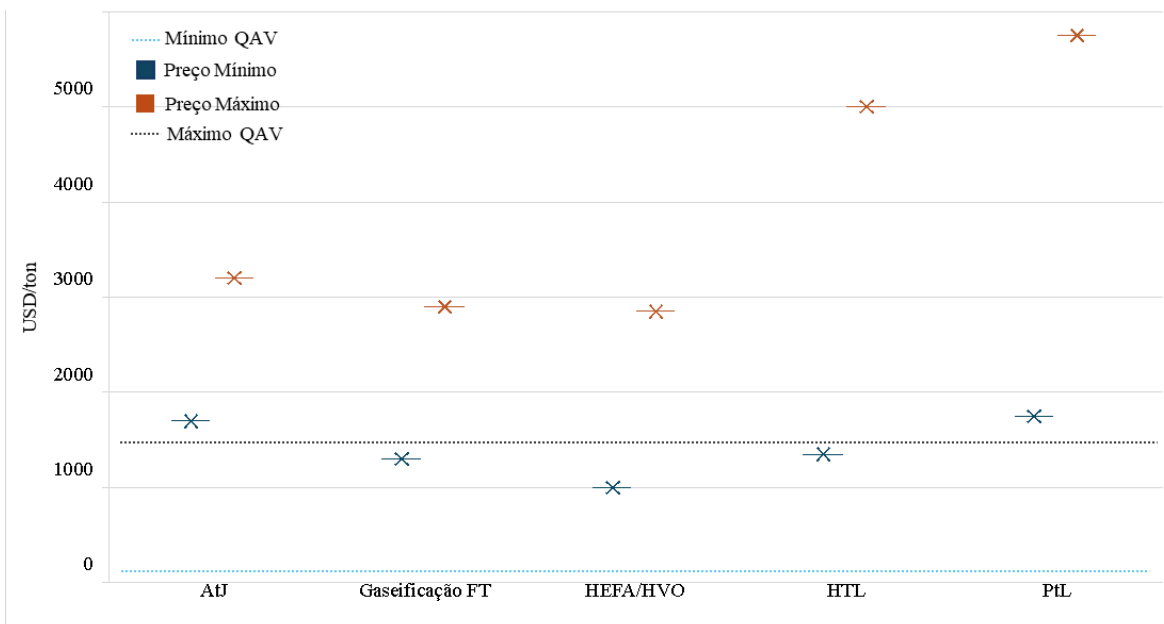
Outra opção promissora é a adoção de combustíveis sintéticos produzidos a partir de hidrogênio verde, que é obtido através da eletrólise da água utilizando eletricidade renovável. Este hidrogênio pode ser combinado com uma fonte de carbono renovável para produzir um combustível hidrocarboneto. As duas opções atualmente em consideração são o hidrogênio verde e o e-querosene. Embora o hidrogênio possa eliminar as emissões de escape da aviação, a tecnologia de aeronaves movidas a hidrogênio para transporte de passageiros ou carga em larga escala ainda não existe e não se espera que atinja maturidade comercial em um prazo compatível com o objetivo de neutralidade de carbono até meados do século. Uma questão fundamental é a baixa densidade de energia volumétrica do hidrogênio, que exigiria um redesenho fundamental das fuselagens, além de alterações nos procedimentos operacionais e padrões de segurança (IRENA, 2020).

Por outro lado, o e-querosene é quimicamente idêntico ao seu equivalente fóssil e poderia ser usado em aeronaves existentes. No entanto, para que o e-querosene seja uma solução eficaz de descarbonização, o carbono contido na molécula deve vir de uma fonte sustentável, como fontes biogênicas, bioenergia com captura de carbono ou capturado diretamente da atmosfera. A construção de uma cadeia de suprimentos sustentável para o carbono representa um desafio significativo, especialmente considerando que, para alcançar eficiência de custos, seria necessário dispor de eletricidade renovável barata para a produção de hidrogênio e uma fonte de carbono sustentável e escalável (IRENA, 2023a).

Biocombustíveis e e-combustíveis poderiam responder pela outra metade das reduções de CO₂ necessárias até 2050, conforme o cenário de 1,5°C da IRENA.

Abaixo, na Figura 5.1, é apresentada uma comparação de custos de produção dos principais tipos de combustíveis de aviação sustentáveis. O SAF produzido através da rota ATJ, que será melhor discutida nas seções posteriores, apresenta um custo que varia de 1700 a 3200 USD/tonelada, aproximadamente.

Figura 5.1. Comparação de custo de produção de combustíveis de aviação sustentáveis



Fonte: Adaptado de IRENA, 2024.

A propulsão elétrica também deve ser considerada como uma via tecnológica para a aviação. Embora, historicamente, o potencial dessa tecnologia como solução de descarbonização tenha sido limitado devido à baixa densidade energética das baterias disponíveis comercialmente, houve avanços notáveis nesta área nos últimos anos. Inovações que permitiram alcançar densidades energéticas de até 500 Wh/kg podem possibilitar a aplicação de propulsão elétrica em aeronaves pequenas ou híbridas e em voos de curta distância (CATL, 2024).

A propulsão elétrica também oferece vantagens potenciais em relação aos motores a jato, como maior eficiência, menor complexidade mecânica e custos de manutenção mais baixos. No entanto, este caminho tecnológico apresenta desafios, incluindo a necessidade de desenvolver e certificar novos conceitos de aeronaves, além da necessidade de mais pesquisas e desenvolvimento em tecnologias de baterias para torná-las viáveis tanto para operações de voo quanto de solo. Esses desafios também limitam o potencial de descarbonização desse caminho tecnológico, uma vez que o desenvolvimento e a

certificação de novos conceitos de aeronaves podem levar até uma década (FAA, 2023).

5.1.3 Setor marítimo

As emissões relacionadas ao transporte marítimo aumentaram de forma constante na última década e, se nenhuma ação for tomada, espera-se que atinjam 130% dos níveis de 2008 até 2050 (UNCTAD, 2023). Esse aumento sublinha a urgência de se afastar da dependência atual do setor por combustíveis fósseis, algo que poderia ser alcançado por meio da aplicação de várias vias de descarbonização.

O cenário de 1,5°C da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) estima que cerca de 17% das reduções necessárias de emissões até 2050 possam vir de mudanças nas dinâmicas do comércio global, desencadeadas pela transição energética. Essas mudanças resultariam principalmente de uma redução geral no uso global de combustíveis fósseis, causada pela descarbonização de outros setores à medida que estes buscam alcançar a neutralidade de carbono. A consequente diminuição da atividade dos petroleiros resultaria em uma redução na demanda energética do setor marítimo (IRENA, 2023a).

Um outro impulsionador significativo para a descarbonização seria a adoção de tecnologias energéticas eficientes e medidas operacionais. Essas incluem o uso de hélices de alta eficiência, propulsão assistida por vento, sistemas de recuperação de calor residual e otimização da velocidade das embarcações. Segundo o cenário de 1,5°C da IRENA, essas melhorias na eficiência energética podem ter um impacto imediato na redução de emissões e potencialmente contribuir com até 20% das reduções de CO₂ necessárias no setor até 2050 (IRENA, 2023a). Estima-se que as economias de energia decorrentes de tecnologias eficientes, além das já mandatadas pela Fase 3 do Índice de Eficiência Energética de Design da Organização Marítima Internacional (IMO), podem ser da ordem de 25% para navios porta-contêineres, 18% para navios graneleiros, 18% para petroleiros e 26% para transportadores de gás natural liquefeito (LNG) (MAN ES, 2023).

No entanto, as economias de energia, por si só, não serão suficientes para levar o setor marítimo a emissões líquidas zero. As emissões restantes precisarão ser eliminadas

por meio da adoção de alternativas baseadas em fontes renováveis. Estas incluem propulsão elétrica, biocombustíveis e combustíveis sintéticos (e-fuels) que substituem o uso de combustíveis marítimos convencionais à base de fósseis. De acordo com o cenário de 1,5°C da IRENA, essas alternativas poderiam contribuir com mais de 60% das reduções de emissões necessárias (IRENA, 2023a).

A eletrificação direta também pode desempenhar um papel importante na descarbonização de embarcações que operam em rotas curtas e interiores (como balsas e transportes costeiros e fluviais). As tecnologias de baterias disponíveis hoje já permitem a eletrificação de embarcações nessas rotas, bem como de pequenos navios de cruzeiro e navios ro-ro. Além disso, melhorias recentes na tecnologia de baterias permitiram a eletrificação de novos navios com rotas de até 1.000 km, como exemplificado pelos dois navios porta-contêineres construídos pela COSCO Shipping Lines em 2023 (COSCO, 2023; IDTechEx, 2023).

Melhorias adicionais nas tecnologias de baterias, combinadas com potenciais reduções de custos, poderiam tornar a eletrificação uma opção cada vez mais relevante para um conjunto mais amplo de casos de uso. Além disso, a importância do papel do "*cold ironing*" (conectar os navios à fonte de energia em terra e desligar os geradores para reduzir as emissões de gases de escape e o ruído) como parte dos esforços de eletrificação portuária não pode ser subestimada. Alguns tipos de embarcações, como petroleiros e graneleiros, passam considerável tempo atracados e, conseqüentemente, uma proporção considerável de suas emissões — mais de 20% — ocorre enquanto estão no porto (IMO, 2021a).

Os biocombustíveis sustentavelmente produzidos, como biodiesel, diesel renovável, bio-LNG e biometanol, podem ser opções eficazes de curto a médio prazo para o transporte marítimo. Os biocombustíveis têm alta prontidão tecnológica, permitindo que sejam utilizados imediatamente como blends ou combustíveis drop-in, exigindo poucas ou nenhuma alteração em termos de operação e infraestrutura. No entanto, é crucial reconhecer que a rápida expansão da biomassa sustentável requer uma consideração cuidadosa de seus potenciais impactos negativos, incluindo mudanças no uso da terra e emissões de GEE ao longo do ciclo de vida. Isso exige controles rigorosos ao longo de toda a cadeia de suprimentos, mecanismos de certificação robustos e intervenções políticas substanciais no setor agrícola (IRENA, 2022).

Três barreiras principais têm limitado o potencial dos biocombustíveis no transporte marítimo: questões econômicas, preocupações com a sustentabilidade e disponibilidade limitada. No entanto, apesar desses desafios, os biocombustíveis são uma opção chave para a descarbonização do setor, não apenas como combustível, mas potencialmente como uma fonte de carbono biogênico para a produção de combustíveis sintéticos (e-fuels). Os biocombustíveis são a alternativa não fóssil mais barata, enquanto as preocupações com a sustentabilidade podem ser abordadas por meio de boas práticas (IRENA, 2022).

Além disso, a disponibilidade de biomassa sustentável suficiente não é um limite rígido para que os biocombustíveis desempenhem um papel importante na descarbonização do setor marítimo. A IRENA sugere que o potencial técnico global para biocombustíveis avançados sustentáveis é de pelo menos 114 EJ, aproximadamente 11 vezes a demanda energética do setor marítimo. A produção global atual de biocombustíveis é de cerca de 4,5 EJ, sendo 90% baseada em culturas alimentares e utilizada principalmente para transporte rodoviário (OECD/FAO, 2023). Como dito anteriormente, como o transporte rodoviário está caminhando rapidamente para a eletrificação, há uma oportunidade de redirecionar a produção de biocombustíveis automotivos para outros setores, como o transporte marítimo e a aviação.

No médio a longo prazo, os combustíveis sintéticos (e-fuels) produzidos a partir de hidrogênio verde — na forma de e-metanol, e-amônia — também podem desempenhar um papel significativo na descarbonização do setor. Esses combustíveis trazem vantagens, incluindo o fato de poderem ser produzidos com energia renovável sem emissões de carbono e seu potencial para satisfazer a demanda ser virtualmente ilimitado, dadas as tecnologias de captura direta de carbono do ar. No entanto, esses combustíveis também apresentam limitações e não devem ser vistos como “soluções mágicas” para a descarbonização do setor.

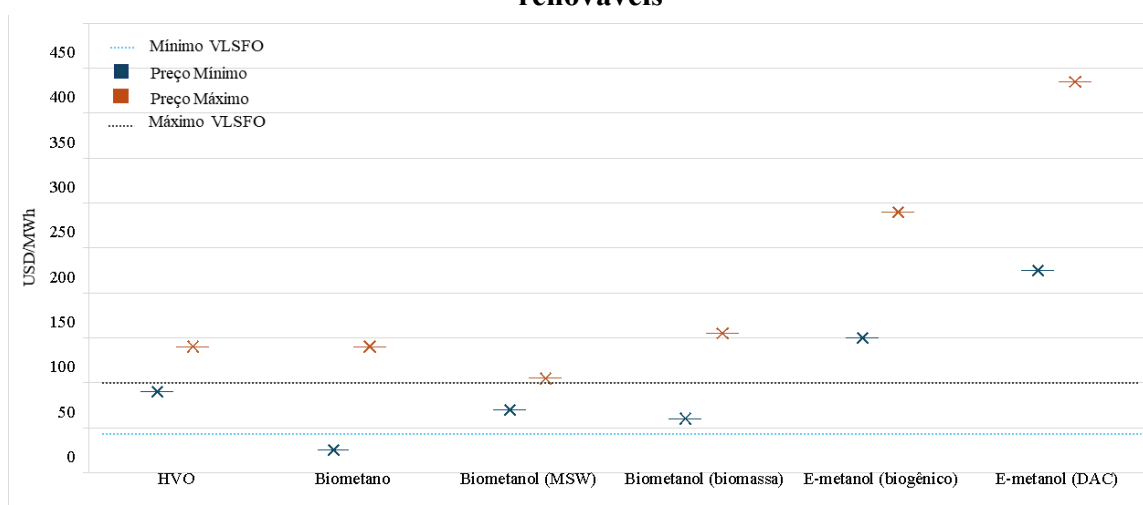
Um dos principais desafios para o uso de e-metano (CH_4) e e-metanol (CH_3OH) como combustíveis sintéticos é a necessidade de carbono para sua síntese. Para que esses e-combustíveis sejam realmente verdes, o carbono precisa vir de fontes sustentáveis, como fontes biogênicas ou capturado diretamente da atmosfera. O carbono de origem fóssil tornaria esses combustíveis insustentáveis e incompatíveis com os objetivos de emissões líquidas zero. Além disso, a obtenção de carbono de forma barata e sustentável deve ser

uma consideração chave, já que isso poderia se tornar um gargalo na implantação desses combustíveis e um componente importante de seus custos (MAN ES, 2023). Para alcançar a eficiência de custos, fontes baratas de carbono biogênico ou atmosférico e hidrogênio verde provavelmente precisariam estar próximas uma da outra para evitar os altos custos de transporte de qualquer um dos dois para a fabricação de e-fuels.

Por outro lado, o e-amônia (NH_3) apresenta a vantagem de não requerer uma fonte de carbono, podendo ser produzido em qualquer localidade desde que haja um fornecimento barato de energia de baixo carbono. No entanto, os principais desafios para a amônia como combustível marítimo residem em sua toxicidade e nos desafios operacionais que apresenta. As tecnologias de motores a amônia ainda estão em desenvolvimento. O uso de amônia como combustível marítimo exigirá padrões operacionais e de segurança robustos e a criação de novas capacidades e habilidades para garantir seu manuseio seguro, mesmo que já existam normas para seu manuseio na indústria química (IRENA, 2024).

A Figura 5.2 compara os custos de diferentes combustíveis marítimos renováveis. Essa análise é fundamental para entender a viabilidade econômica dessas alternativas em relação aos combustíveis fósseis convencionais, além de destacar as potenciais oportunidades para a descarbonização do setor marítimo.

Figura 5.2. Comparação de custo de combustíveis marítimos renováveis



Fonte: Adaptado de IRENA, 2024.

Por fim, é importante considerar a eficiência dos combustíveis sintéticos ao discutir sua utilização. Os e-fuels exigem significativamente mais energia primária em comparação com outras alternativas, como a eletrificação direta e alguns biocombustíveis. Portanto, o uso de e-combustíveis deve ser preferencialmente limitado a casos onde alternativas mais eficientes não são viáveis. Como todas as opções de combustíveis alternativos têm seus próprios conjuntos de desafios, é provável que uma combinação de opções baseadas em fontes renováveis seja necessária para descarbonizar completamente o setor.

5.2 Rotas tecnológicas

5.2.1 Químicos e petroquímicos

De acordo com as informações apresentadas na seção anterior, o setor químico e petroquímico apresenta diversos caminhos para a descarbonização, variando de tecnologias inovadoras à aplicação de processos convencionais otimizados. Dentre as várias alternativas, a produção de metanol se destaca como um bloco químico fundamental. Este composto, imprescindível para vários processos da indústria química, pode ser produzido a partir de diversas fontes, incluindo o biogás gerado no ecossistema das usinas sucroalcooleiras, que produzem etanol. Este trabalho focou na viabilidade da produção de metanol a partir dessas fontes (etanol e os derivados de seu processo produtivo), destacando suas implicações para a descarbonização do setor.

5.2.1.1 Rotas de Produção de Metanol: Panorama Geral

Atualmente, não existe um único processo amplamente dominante para a produção de metanol, embora certas preferências regionais e tecnológicas se destaquem em determinadas localidades. A escolha do método de produção de metanol depende de uma série de fatores, incluindo a disponibilidade de matérias-primas, a infraestrutura existente e

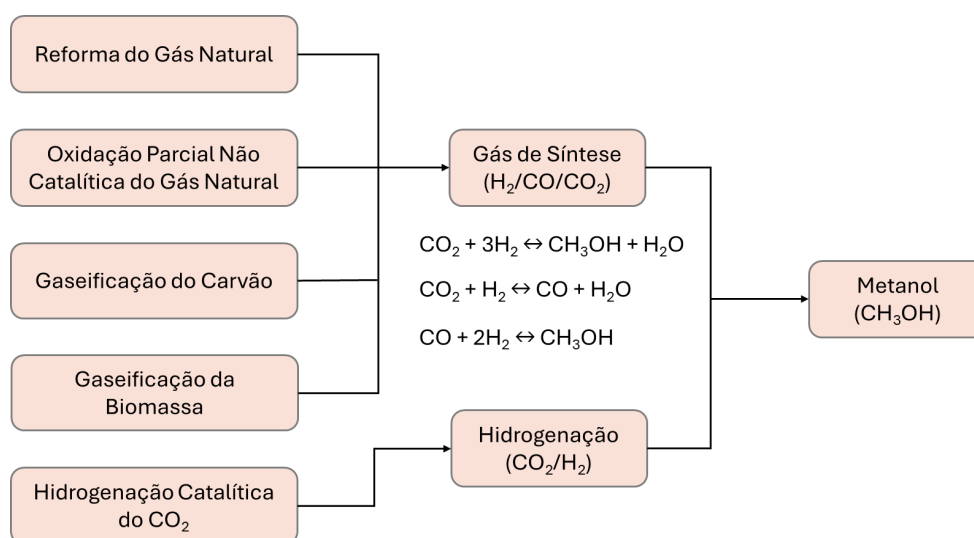
as condições econômicas regionais. Essas variáveis influenciam diretamente as decisões sobre qual tecnologia adotar para a síntese de metanol.

A literatura especializada discute diversas alternativas para a síntese de metanol, abrangendo diferentes tipos de reatores, catalisadores e condições operacionais. Essas alternativas oferecem uma gama de possibilidades, dependendo do contexto em que são aplicadas (Bertau et al., 2014).

Os métodos industriais tradicionais para a produção de metanol consistem em quatro etapas principais: produção do gás de síntese, condicionamento desse gás, síntese do metanol e sua subsequente purificação. As diferenças mais significativas entre as diversas rotas de produção, exceto no caso da hidrogenação do CO_2 , estão na etapa de geração do gás de síntese. Essa etapa varia conforme as matérias-primas e tecnologias empregadas, tornando-a um ponto central de diferenciação entre os métodos de produção.

As principais rotas de produção de metanol podem ser classificadas de acordo com a fonte do gás de síntese utilizado: (i) reforma do gás natural (RGN), que é amplamente adotada devido à abundância de gás natural em várias regiões; (ii) oxidação parcial não catalítica do gás natural (OXP), que oferece uma alternativa eficiente em certas condições; (iii) gaseificação do carvão mineral (GC), uma rota tradicional, mas com desafios ambientais significativos; (iv) gaseificação da biomassa (GB), que se destaca pela sustentabilidade e renovabilidade da matéria-prima; e (v) hidrogenação de carbono ou de fontes puras de CO_2 (HC), uma abordagem que ganha atenção devido ao seu potencial em termos de sustentabilidade (Bertau et al., 2014).

Cada uma dessas rotas possui suas vantagens e desvantagens, sendo escolhida com base nas necessidades específicas da região e nas tecnologias disponíveis. A reforma do gás natural, por exemplo, é favorecida em regiões com grandes reservas de gás, enquanto a gaseificação de biomassa é preferida em áreas com abundância de resíduos agrícolas. A Figura 5.3 ilustra as principais rotas e reações envolvidas na produção de metanol atualmente, destacando a complexidade e a variedade de métodos disponíveis. O Quadro 5.1 sintetiza os principais benefícios e desafios associados aos processos de produção de metanol renováveis e não renováveis mais convencionais.

Figura 5.3. Principais rotas para a produção de metanol

Fonte: Adaptado de Rocha, L. B. (2018).

Quadro 5.1. Principais benefícios e desafios das rotas de geração do gás de síntese para a produção de metanol.

Método	Benefícios	Desafios
Reforma do gás natural	Mais viável a curto prazo; Infra-estrutura existente e baixas temperaturas	Alto consumo energético; Gás altamente contaminado
Oxidação parcial do gás natural	Fácil de estruturar e armazenar o gás de síntese; Reação em 1 etapa	Altos impactos ambientais; Conversão de baixa eficiência
Gaseificação do carvão	Opera sem o ajuste da razão de carbono/hidrogênio; Alta pureza do produto metanol	Altos impactos ambientais; Baixa eficiência térmica
Gaseificação da biomassa	Limpa e sustentável; Uma variedade de matérias-primas	Impurezas na matéria-prima; Requer o desenvolvimento da tecnologia
Hidrogenação do CO ₂	Menores impactos entre as fontes renováveis; Não requer pré-tratamento do gás	Conversão de baixa eficiência; Alto custo de capital

Fonte: Adaptado de Rocha, L. B. (2018).

A produção de metanol a partir de energias renováveis apresenta duas rotas principais que se destacam pela sua capacidade de contribuir significativamente para a redução das emissões de CO₂: a gaseificação da biomassa e a hidrogenação do CO₂ capturado em gases de combustão de processos industriais ou de fontes puras de CO₂ (Cifre & Badr, 2007). A síntese de metanol a partir de materiais contendo carbono orgânico, como a biomassa, pode ser considerada relativamente simples. No entanto, assim como na produção baseada em fontes fósseis, essa rota requer etapas adicionais, como a digestão anaeróbia, seguida de processos de limpeza e condicionamento do gás de síntese, que acabam por aumentar os custos e os impactos ambientais associados (Renó et al., 2011).

Por outro lado, a produção de metanol por hidrogenação direta de CO₂ utilizando hidrogênio proveniente de fontes renováveis surge como a alternativa mais limpa. No entanto, essa rota ainda é a mais cara devido à alta demanda de hidrogênio, cuja produção é intensiva em energia. Portanto, a viabilidade econômica da produção de metanol renovável depende da otimização dos custos de capital, operação e manutenção, além do desenvolvimento de sistemas com alta eficiência energética e baixos níveis de emissões. Neste contexto, diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento dessas tecnologias, conforme será abordado nas descrições das rotas a seguir.

5.2.1.2 Gás de síntese a partir da gaseificação da biomassa

A produção de metanol a partir da biomassa tem avançado significativamente nas últimas duas décadas, alcançando melhorias notáveis em termos de eficiência de conversão e redução de custos. No entanto, a integração total dos processos de gaseificação, limpeza do gás e síntese de metanol ainda não foi amplamente comercializada. De modo geral, qualquer tipo de biomassa pode ser gaseificada para a produção subsequente de metanol, o que amplia as possibilidades de aplicação dessa tecnologia. Existem duas principais abordagens para a produção de metanol a partir da biomassa: a gaseificação da biomassa seca, como o bagaço de cana-de-açúcar, que gera uma mistura gasosa adequada para a síntese de metanol, e a conversão da biomassa úmida, como a vinhaça da cana-de-açúcar,

por meio de biodigestão (Renó et al., 2011; Silva et al., 2017).

Ainda que a gaseificação da biomassa tenha sido testada em escala industrial em diferentes tipos de reatores, seu uso em operações de longo prazo enfrenta desafios. Entre esses desafios estão a preparação e alimentação da matéria-prima e o monitoramento das cinzas resultantes do processo. Diversas configurações de engenharia têm sido exploradas, variando em termos de temperatura de gaseificação, tipo de biomassa utilizada e pré-tratamento necessário. Contudo, um consenso emergente sugere que o uso de leitos fluidizados pode ser uma opção eficiente para a produção de gás de síntese (Bertau et al., 2014).

Feng et al. (2011) investigaram um processo integrado que inclui um gaseificador de biomassa, um reformador a vapor e um reator de síntese de metanol, demonstrando que é possível direcionar aproximadamente um terço do CO_x e 78% do hidrogênio presentes no gás de síntese para a produção de metanol. A eficiência do processo depende do tipo de biomassa utilizada, da temperatura do vapor no reformador e do reciclo de hidrogênio, sendo esses fatores cruciais para a viabilidade do uso de CO₂ como matéria-prima.

Outro estudo relevante realizado por Pedersen e Schultz (2012) explorou a integração entre uma planta de biogás e uma planta de metanol. Nesse modelo, o CO₂ gerado na planta de biogás é utilizado na hidrogenação, enquanto o hidrogênio é obtido por eletrólise da água. O metano recuperado pode também ser reformado para a produção de metanol. Entretanto, um desafio significativo associado a essa rota é a potencial pressão sobre os recursos naturais e a demanda crescente por biomassa, uma vez que ela se torna uma fonte energética cada vez mais procurada (Acar e Dincer, 2014).

5.2.1.3 Hidrogenação de carbono a partir de fontes puras de CO₂

No início da década de 1990, uma colaboração entre os laboratórios de pesquisa NIRE (*National Institute for Resources and Environment*) e RITE (*Research Institute of Innovation Technology for the Earth*) levou a avanços significativos na produção de metanol a partir da hidrogenação do CO₂. Esses esforços culminaram no desenvolvimento de um processo industrial pela empresa Mitsui Chemicals, que se destacou pela deposição

de várias patentes relacionadas à composição dos catalisadores, métodos de preparação e condições de pré-tratamento necessárias para a ativação dos catalisadores (Toyir et al., 2009).

O processo desenvolvido por Mitsui faz parte de um conceito maior, conhecido como "Fixação Química de CO₂", no qual o dióxido de carbono capturado de unidades industriais é purificado para remover compostos como enxofre e nitrogênio, que poderiam envenenar os catalisadores metálicos utilizados na síntese do metanol. Embora essa abordagem tenha desvantagens em comparação com a produção de metanol a partir do gás de síntese, como a menor conversão de equilíbrio e a formação de grandes quantidades de água, o projeto NIRE/RITE demonstrou que a seletividade para o metanol é extremamente alta, ultrapassando 99,5%, com baixa formação de álcoois e cetonas superiores, o que simplifica o processo de destilação do metanol bruto. Além disso, a formação reduzida de metano elimina a necessidade de purga de gases dissolvidos.

Hoje, a produção de metanol via hidrogenação de CO₂ é considerada uma rota tecnicamente aprimorada, com aspectos técnicos e econômicos discutidos na literatura. Plantas piloto utilizando hidrogênio renovável já estão operacionais na Islândia, com capacidade de produção de 4.000 toneladas por ano, desde 2011, e em Osaka, no Japão, com capacidade de 100 toneladas por ano (Jadhav et al., 2014). A produção de metanol por essa rota apresenta a vantagem de gerar um produto limpo, sem contaminação por enxofre, que normalmente ocorre na etapa de gaseificação. No entanto, o custo dessa rota é altamente dependente do custo do hidrogênio necessário (DOE, 2004).

Para a síntese de metanol, dois tipos principais de reatores estão disponíveis: o reator catalítico de leito fixo, amplamente utilizado em aplicações comerciais, e o reator de membrana contendo zeólitas (Atsonios et al., 2016a). Estudos recentes mostram que a catálise da hidrogenação do CO₂ está se tornando competitiva em termos técnicos, comparável à produção de metanol a partir de gás de síntese, o que sugere um grande potencial para sua aplicação em larga escala (AN et al., 2009).

Em um estudo conduzido por Matzen et al. (2016), foi avaliado um cenário onde o dióxido de carbono obtido da fermentação do etanol é utilizado para produzir metanol, empregando energia eólica para a eletrólise da água e produção de hidrogênio. A eficiência energética desse processo mostrou-se comparável à produção baseada em gás de síntese,

mas a viabilidade econômica enfrenta desafios técnicos inerentes ao estágio de desenvolvimento dessa tecnologia limpa.

Outro avanço significativo foi apresentado por Atsonios et al. (2016a), que desenvolveram um novo reator de membrana com alta seletividade e permeância para metanol e água, aumentando o rendimento da produção de metanol e reduzindo os custos de investimento ao diminuir o tamanho do reator necessário. Finalmente, Al-Kalbani et al. (2016) compararam energeticamente e ambientalmente dois processos de produção de metanol a partir de CO_2 , concluindo que a eficiência energética da eletrólise, de 41%, é quase o dobro da hidrogenação convencional. O estudo também destacou a importância da integração energética para aproveitar o calor gerado na reação de produção de metanol para gerar eletricidade, melhorando o potencial de aquecimento global ao substituir a produção de metanol a partir de combustíveis fósseis por fontes renováveis.

5.2.2 Aviação

Embora existam diversas rotas tecnológicas para a produção de SAF, como as rotas de hidroprocessamento de óleos vegetais e o uso de resíduos urbanos, este estudo foca especificamente nas rotas em que o bioetanol pode ser utilizado como matéria-prima. O bioetanol, uma fonte renovável amplamente disponível, oferece oportunidades promissoras para a produção de combustíveis de aviação através de processos como a conversão de álcool em querosene (ATJ - *Alcohol-to-Jet*).

O processo ATJ (*Alcohol-to-Jet*) é uma tecnologia que transforma álcoois de cadeia curta, como metanol, etanol, butanol e isobutanol, em hidrocarbonetos de cadeia mais longa, tipicamente na faixa de alcano C8-C16. De acordo com (MENEZES et al., 2022) existem duas principais rotas para a conversão desses álcoois no processo ATJ:

1. **Rota Metanol-para-Olefinas (MTO) e Olefina-para-Gasolina/Destilado (MOGD):** Este método envolve primeiro a conversão de metanol em olefinas, como etileno e propileno, por meio de um processo chamado MTO. As olefinas são então convertidas em gasolina ou outros destilados por meio da rota MOGD.
2. **Processamento Direto de Álcoois (Desidratação, Oligomerização e Hidrogenação):** Neste caso, álcoois como etanol, isobutanol, butanol e outros são processados diretamente através de desidratação para formar olefinas, seguidas por oligomerização para formar hidrocarbonetos de cadeia mais longa e, finalmente, hidrogenação para obter os produtos desejados.

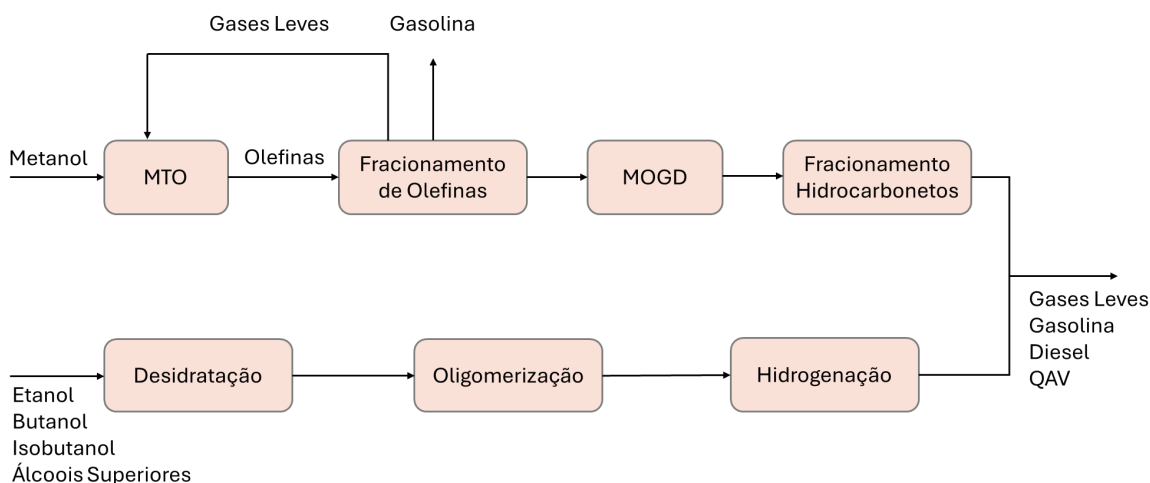
O metanol pode ser convertido em combustível para aviação através de uma sequência de processos que envolve a transformação inicial por meio do método MTO (Metanol-para-Olefinas) e subsequente processamento pelo método MOGD (Olefina-para-Gasolina/Destilado), conforme ilustrado na Figura 5.4.

Neste processo, o metanol é introduzido em um reator de leito fluidizado operando a uma temperatura de 482°C e pressão de 1 bar, utilizando o catalisador ZSM-5. Durante a reação, o metanol é convertido em uma gama de produtos que incluem metano (representando 1,4% do peso total), parafinas de cadeia curta (C2-C4), que constituem 6,5% do peso, olefinas de cadeia curta (C2-C4), que correspondem a 56,4% do peso, e gasolina de cadeia média (C5-C11), que representa 35,7% do peso (MENEZES et al.,

2022).

Após essa primeira etapa, a mistura de produtos resultante é direcionada para uma unidade de fracionamento, onde os diferentes componentes são separados e processados para obter o combustível de aviação desejado. Esta abordagem permite a transformação eficiente do metanol em combustíveis líquidos de alto valor, aproveitando as vantagens dos processos MTO e MOGD para gerar uma mistura otimizada de hidrocarbonetos (MENEZES et al., 2022).

Figura 5.4. Fluxograma simplificado dos processos da rota *Alcohol to Jet (ATJ)*.



Fonte: Adaptado de NG et al., 2021.

No processo de conversão de metanol para combustível de aviação, os gases leves produzidos são reciclados de volta para a unidade MTO (Metanol-para-Olefinas), o que melhora o rendimento geral do produto. Após essa etapa inicial, a gasolina é separada em uma coluna de fracionamento como um produto final único. As olefinas resultantes são então enviadas para a unidade MOGD (Olefina-para-Gasolina/Destilado), que opera em um reator de leito fixo a uma temperatura de 400°C e pressão de 1 bar, utilizando o catalisador ZSM-5 (MENEZES et al., 2022).

Na unidade MOGD, os produtos obtidos incluem gases leves, que representam 3%

do peso total, gasolina, que corresponde a 15% do peso, e destilado, que constitui 82% do peso. A unidade de fracionamento MOGD separa esses produtos em frações específicas: gases leves (C1-C4), gasolina (C5-C11), querosene (C11-C13) e diesel (C14+). Esta separação permite a obtenção de produtos finais a partir da integração dos processos MTO e MOGD (MENEZES et al., 2022).

Outra abordagem para a conversão de álcoois em combustível de aviação envolve desidratação, oligomerização e hidrogenação, conforme ilustrado na Figura 5.4. Neste método, os álcoois são inicialmente desidratados para formar alcenos sob condições de pressão ao redor de 14 bar e temperaturas variando entre 288°C e 343°C. Catalisadores ácidos, como aqueles à base de alumina, são utilizados nesta etapa. A etapa seguinte é a oligomerização, na qual as moléculas de alceno são combinadas para formar hidrocarbonetos de cadeia mais longa. Finalmente, a hidrogenação é realizada para saturar as olefinas e produzir querosene parafínico, utilizando hidrogênio externo e o catalisador PtO₂ (NG et al., 2021).

De acordo com Bauen et al. (2020), a rota ATJ (Álcool-para-Querosene) é particularmente atraente devido à sua capacidade de converter uma variedade de álcoois, oriundos de diversas fontes, em combustível de aviação e outros hidrocarbonetos. Além disso, a flexibilidade logística dessa rota é uma vantagem significativa, pois a planta de catálise não precisa estar localizada próxima à produção de álcool, facilitando o transporte e armazenamento dos álcoois. No entanto, uma desvantagem potencial é a seletividade na produção de combustível de aviação, que pode afetar a eficiência da rota.

Atualmente, existem projetos piloto para a rota ATJ em andamento. Segundo IRENA (2019), a maturidade técnica dessa rota é considerada intermediária, indicando que ainda são necessárias otimizações e testes em condições de produção real para atingir seu pleno potencial.

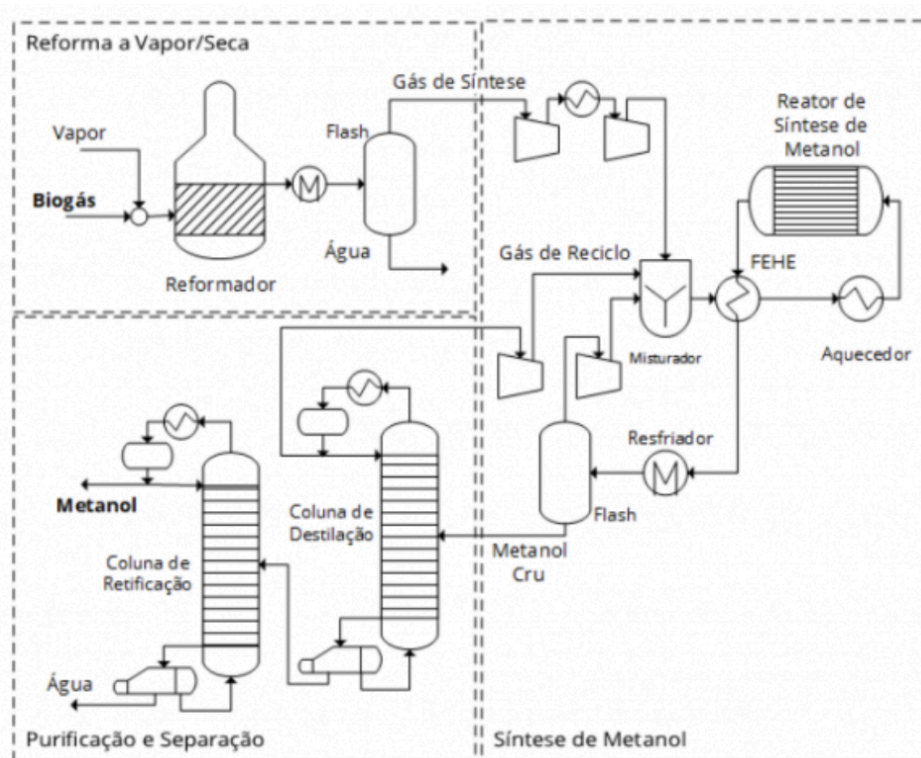
5.2.3 Setor marítimo

Além da aplicabilidade no setor de químicos e petroquímicos, o metanol e o e-metanol também emergem como opções promissoras para a utilização como combustível

marítimo, oferecendo uma alternativa sustentável e viável para a indústria de transporte marítimo. O metanol, produzido a partir de fontes renováveis, como a biomassa, possui uma maturidade técnica relativamente alta. No entanto, o e-metanol, uma forma de metanol produzido a partir de dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio verde, é uma tecnologia emergente que busca integrar práticas de captura de carbono e eletrólise para promover uma abordagem mais ecológica (Henderson et al., 2021).

No contexto do ecossistema sucroalcooleiro, o processo de produção de biometanol envolve a reforma à vapor do biometano ou gaseificação da biomassa, seguida pela síntese de metanol via o processo de catalisadores de alta pressão e temperatura. A Figura 5.5 ilustra o fluxograma do processo de produção de metanol a partir do biogás, utilizando a reforma a vapor. Este diagrama detalha as etapas envolvidas na conversão do biogás em metanol.

Figura 5.5. Fluxograma do processo de produção de metanol via biogás (reforma à vapor).



Fonte: Extraído de Universidade Federal Fluminense (UFF, 2023).

Já o e-metanol é gerado pela combinação de CO₂ capturado com hidrogênio produzido através da eletrólise da água utilizando energia renovável. Esse processo, apesar de ser ainda emergente, tem demonstrado potencial para reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se com as metas climáticas globais (IEA, 2020).

O BIO CCS (Captura e Armazenamento de Carbono Biogênico) é uma tecnologia que visa capturar e armazenar o dióxido de carbono (CO₂) gerado a partir de processos biológicos, como a produção de biocombustíveis e a biomassa. Essa abordagem pode desempenhar um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa e na mitigação das mudanças climáticas, especialmente quando associada a processos de produção de bioenergia e biocombustíveis.

No contexto do Brasil, a implementação do BIO CCS enfrenta desafios significativos. O país, sendo um grande produtor de biomassa e bioenergia, possui um potencial considerável para a aplicação dessa tecnologia. No entanto, vários obstáculos precisam ser superados:

1. **Infraestrutura e Logística:** A infraestrutura necessária para a captura, transporte e armazenamento de CO₂ ainda é limitada no Brasil. A construção de instalações de captura e os sistemas de transporte de CO₂ requerem investimentos substanciais e coordenação entre diferentes setores. A falta de uma rede de transporte de CO₂ eficiente pode limitar a viabilidade econômica do BIO CCS em larga escala (Barros et al., 2021).
2. **Custo e Viabilidade Econômica:** O custo associado à captura e armazenamento de CO₂ pode ser alto, o que representa um desafio significativo para a adoção em larga escala no Brasil. A viabilidade econômica do BIO CCS depende da capacidade de reduzir esses custos e de incentivos financeiros e regulatórios que suportem a implementação da tecnologia (Silva et al., 2020).
3. **Aspectos Regulatórios e Políticos:** A falta de uma política nacional robusta e de regulamentações específicas para o BIO CCS pode dificultar a implementação da tecnologia. A criação de um quadro regulatório claro e de incentivos governamentais pode ser um ponto chave para estimular investimentos e a adoção do BIO CCS (Costa et al., 2021).

Do ponto de vista tecnológico, o processo de BIO CCS enfrenta vários desafios. A eficiência dos métodos de captura de CO₂ a partir de processos biogênicos deve ser aprimorada. Tecnologias emergentes para a captura de CO₂, como adsorventes e solventes mais eficientes, estão em desenvolvimento, mas ainda é necessário avançar para atingir níveis de eficiência que tornem o BIO CCS mais competitivo (Jones et al., 2022). Além disso, garantir o armazenamento seguro e a longo prazo do CO₂ é um desafio potencial. O monitoramento e a verificação da integridade dos locais de armazenamento são essenciais para evitar vazamentos e assegurar que o CO₂ não seja liberado de volta para a atmosfera (Smith et al., 2022).

Em adição, integrar o BIO CCS com sistemas existentes de produção de energia e biocombustíveis é complexo. A tecnologia precisa ser compatível com os processos de produção existentes e deve ser capaz de operar de forma eficiente junto com outras tecnologias de controle de emissões e de eficiência energética (Williams et al., 2021).

Em suma, embora o BIO CCS tenha um potencial significativo para contribuir para a redução das emissões de CO₂, a sua implementação no Brasil e em outros contextos enfrenta desafios regulatórios, técnicos e econômicos substanciais. A superação desses desafios exigirá inovações tecnológicas, investimentos em infraestrutura e políticas de apoio.

No contexto do setor marítimo, entre os principais benefícios do metanol como combustível destaca-se sua capacidade de ser utilizado em motores de combustão interna e células de combustível com baixa emissão de poluentes. Além disso, o metanol pode ser armazenado e manuseado de maneira segura com infraestrutura existente, embora a infraestrutura de abastecimento e transporte ainda precise ser expandida para suportar seu uso em larga escala (Leduc et al., 2021). O e-metanol, por sua vez, oferece a vantagem adicional de menor emissão de carbono, embora o custo elevado de produção e a necessidade de investimentos significativos em tecnologia ainda sejam desafios a serem superados (Greene et al., 2022).

Apesar de suas promessas, existem desafios associados ao uso de metanol e e-metanol como combustíveis marítimos. O principal desafio para o metanol é a sua menor densidade energética em comparação com combustíveis tradicionais, o que pode exigir mais espaço de armazenamento e impacto na eficiência operacional dos navios. No caso do

e-metanol, o custo de produção elevado e a necessidade de uma infraestrutura de captura de carbono são fatores que limitam sua adoção em larga escala no presente momento (IEA, 2020; Greene et al., 2022).

6- DISCUSSÃO

Com base nas informações levantadas, serão discutidos os prós e contras das rotas de produção de biometanol, e-metanol e ATJ (Álcool-para-Querosene) no contexto da descarbonização dos setores químico, aviação e marítimo, bem como a maturidade de cada rota do ponto de vista da engenharia química.

Como um *pathway* de descarbonização para todos os setores *hard-to-abate* apresentados, a produção de metanol e e-metanol se mostra muito favorável do ponto de vista de mercado. A flexibilidade desse combustível renovável para diferentes contextos de mercado, ou seja, sua aplicabilidade em diversos segmentos implica em uma viabilidade econômica que pode ser facilmente alcançada no curto prazo, com a necessidade crescente de cumprimento de metas de redução de emissões por parte das empresas.

A produção de biometanol via reforma à vapor do biogás é considerada uma abordagem promissora para a descarbonização, apresentando uma série de vantagens e desvantagens que precisam ser cuidadosamente avaliadas. Entre os pontos favoráveis, destaca-se o fato de que a reforma a vapor do biogás utiliza uma fonte de energia renovável que pode ser obtida através do ecossistema sucroalcooleiro (o que é o caso da Raízen, no Brasil). No contexto brasileiro, a produção do biometanol a partir do biogás reforçaria o potencial da cultura da cana de açúcar no que diz respeito à circularidade, produtividade e eficiência energética, com o máximo aproveitamento dos subprodutos gerados no processo produtivo, o bagaço (via E2G), vinhaça e torta de filtro (via produção de biogás e potencial produção de biometanol).

Entretanto, existem também pontos desfavoráveis associados à produção de biometanol via reforma a vapor do biogás. O processo requer condições de operação rigorosas e complexas, incluindo altas temperaturas e pressões, o que pode aumentar os custos operacionais e de manutenção. Além disso, o biogás pode conter várias impurezas, como sulfeto de hidrogênio e siloxanos, que precisam ser removidas antes da reforma a

vapor para evitar danos aos equipamentos e catalisadores, aumentando a complexidade e o custo do processo. A eficiência energética do processo também é um desafio, já que a reforma a vapor é intensiva em energia. Atualmente, a produção de biometanol a partir do biogás ainda é limitada em escala, e o aumento da capacidade de produção para atender à demanda em larga escala pode ser um desafio técnico e econômico.

Esses pontos indicam que, embora a produção de biometanol via reforma a vapor do biogás ofereça um caminho atraente para a descarbonização e aproveitamento de recursos renováveis, ainda existem desafios significativos a serem superados para a implementação prática e econômica desta tecnologia.

A rota de hidrogenação de CO_2 tem sido aprimorada tecnicamente, com plantas-piloto já operacionais. Isso indica uma crescente maturidade dessa rota tecnológica. A principal vantagem é a produção de um metanol limpo, livre de contaminações, o que representa uma melhoria significativa em relação aos problemas comuns associados à reforma à vapor/gaseificação. Contudo, a viabilidade econômica deste processo depende fortemente do custo do hidrogênio, que permanece um desafio técnico considerável. Dentre os facilitadores, destaca-se a produção limpa e a ausência de enxofre no metanol resultante, garantindo um produto de alta qualidade e com menor impacto ambiental. As plantas-piloto em operação são uma evidência concreta da viabilidade técnica desse método, sugerindo que os desafios estão mais concentrados na esfera econômica. Por outro lado, os pontos negativos incluem o elevado custo do hidrogênio, que é um elemento crítico no processo, e a consequente viabilidade econômica limitada devido aos desafios de custo associados à produção do hidrogênio de maneira sustentável e eficiente. Nesse sentido, a rota de hidrogenação de CO_2 para a produção de metanol está tecnicamente madura, embora ainda precise superar obstáculos econômicos significativos para ser amplamente adotada.

No setor de aviação, o processo ATJ envolve a conversão de álcoois, como metanol e etanol, em hidrocarbonetos de cadeia mais longa, adequados para uso como combustível de aviação. A rota ATJ é particularmente atraente devido à sua capacidade de converter uma variedade de álcoois em combustível, o que oferece uma flexibilidade logística considerável. Isso significa que a produção de combustível não precisa estar necessariamente atrelada à localização das plantas de produção de álcool, permitindo uma maior adaptabilidade às condições do mercado e às fontes de matéria-prima. No entanto,

um dos principais desafios dessa rota é a seletividade na produção de combustível de aviação, o que pode limitar a eficiência do processo. Em termos de favorabilidade, a flexibilidade na utilização de várias fontes de álcoois permite uma diversificação das matérias-primas e uma potencial redução de custos associados à produção. A não exigência de que as plantas de catálise estejam próximas à produção de álcool é outro fator extremamente positivo, contribuindo para uma maior descentralização da produção e uma melhor distribuição logística. Entretanto, os pontos negativos incluem a seletividade na produção, que afeta a eficiência do processo e, atualmente, a rota ATJ representa apenas uma pequena fração do consumo total de combustíveis de aviação, indicando que ainda há um longo caminho a percorrer para que essa tecnologia possa ser amplamente implementada e contribuir significativamente para a descarbonização do setor.

No setor marítimo, a aplicação de metanol permanece relevante, especialmente à luz das exigências crescentes de descarbonização nesse setor. Apesar do cenário ser bastante promissor, existem desafios associados ao uso de metanol e e-metanol como combustíveis marítimos. O principal desafio para o metanol é a sua menor densidade energética em comparação com combustíveis tradicionais, o que impacta diretamente na eficiência operacional dos navios. No caso do e-metanol, o custo de produção elevado e a necessidade de uma infraestrutura de captura de carbono são fatores que limitam a aplicação dessa rota tecnológica e sua adoção em larga escala no presente momento.

Ao avaliar a maturidade das rotas a partir de etanol e seus derivados, é evidente que o setor químico parece estar mais adaptado em termos de desenvolvimento tecnológico e implementação a curto prazo de soluções renováveis. A produção de intermediários químicos a partir de metanol já é realizada em escala comercial, e as tecnologias de captura de carbono estão sendo cada vez mais integradas aos processos industriais. Em contraste, as rotas para aviação e marítimo ainda enfrentam desafios significativos em termos de custo, escalabilidade e infraestrutura, embora haja um potencial considerável para inovação e desenvolvimento futuro.

O etanol e seus derivados oferecem uma gama de oportunidades para a descarbonização dos setores químico, de aviação e marítimo. Cada setor apresenta seus próprios desafios e oportunidades, e a escolha da rota mais adequada dependerá de uma combinação de fatores, incluindo viabilidade econômica, disponibilidade de matérias-primas e suporte político. A maturidade das rotas no setor químico sugere que

este pode ser o segmento mais receptivo às soluções de transição energética, visto que o caminho é mais promissor no curto prazo, enquanto as rotas para aviação e marítimo ainda necessitam de mais pesquisa e desenvolvimento para alcançar sua plena adaptação e implementação. No entanto, apesar de ainda apresentarem limitações técnicas específicas, estes setores contam com uma grande influência regulatória de órgãos como ICAO e IMO, que são fundamentais no incentivo à adoção de rotas tecnológicas menos intensivas em carbono, mesmo que apresentem desafios de viabilidade econômica a serem enfrentados. Isso demonstra que a transição para uma economia de baixo carbono requer um esforço colaborativo entre governos, indústria e sociedade para superar os desafios e maximizar as oportunidades associadas ao uso de biocombustíveis como vetor de sustentabilidade.

Em conclusão, cada rota de produção possui vantagens e desvantagens específicas. A rota de reforma à vapor do biogás para metanol, apesar de maximizar um ecossistema de circularidade e reaproveitamento de subprodutos, é intensiva em consumo de energia para purificação. A hidrogenação de CO₂ para metanol demonstra maturidade técnica, mas enfrenta desafios econômicos que limitam sua ampla adoção. O processo ATJ, por sua vez, oferece uma flexibilidade considerável e utiliza uma variedade de matérias-primas, mas ainda enfrenta limitações na seletividade e eficiência, o que impede sua implementação em larga escala no curto prazo. Portanto, é evidente que não há uma solução única para a transição energética. A redução de emissões nos setores difíceis de mitigar, como o químico, a aviação e o marítimo, exigirá a implementação de múltiplos caminhos de descarbonização. A combinação de tecnologias avançadas, como as avaliadas neste trabalho, aliada à adaptação das cadeias de produção e distribuição, será fundamental para atingir as metas de sustentabilidade ambiental e enfrentar os desafios da transição energética de maneira eficaz e abrangente.

7- CONCLUSÃO

O presente trabalho evidenciou a relevância do etanol e de seus derivados como vetores essenciais na transição para uma matriz energética mais sustentável e resiliente. A análise detalhada mostrou que o etanol não apenas contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, mas também desempenha um papel crucial na reestruturação da indústria química e na descarbonização de setores *hard-to-abate*. Os resultados da revisão indicam que a expansão do uso do etanol em diferentes segmentos, incluindo transportes marítimo de carga, aviação e produção de químicos e petroquímicos, representa uma estratégia viável para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover a economia circular.

Durante o estudo, foi discutida a viabilidade de produção de biocombustíveis, como biometanol, e-metanol e Sustainable Aviation Fuel (SAF), a partir de produtos e subprodutos da indústria sucroalcooleira. Essa abordagem inovadora foi destacada como uma forma de descarbonizar o setor de químicos, além dos setores marítimo e de aviação, reforçando o potencial do etanol como uma solução versátil e eficaz.

A discussão aprofundada sobre a sustentabilidade da produção de etanol destacou tanto as oportunidades quanto os desafios associados ao aumento de escala desse biocombustível. A sustentabilidade ambiental, econômica e social da produção de etanol depende de políticas públicas eficazes, da governança interinstitucional e do desenvolvimento de tecnologias inovadoras que assegurem a integridade dos ecossistemas e das comunidades envolvidas.

O etanol, particularmente em contextos como o brasileiro, onde há uma infraestrutura consolidada e uma tradição no uso de biocombustíveis, tem o potencial de servir como modelo para outros países na busca por soluções energéticas mais limpas. O caminho para a consolidação do setor sucroalcooleiro como precursor de soluções de baixo carbono exige investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, além da adoção de normas regulatórias que fomentem práticas agrícolas sustentáveis e a comercialização responsável.

Conclui-se que a trajetória do etanol e seus subprodutos como protagonistas na transição energética global é promissora, mas requer um compromisso contínuo com a

inovação, a sustentabilidade e a cooperação internacional. A engenharia química desempenha um papel vital na otimização dos processos de produção e na maximização dos benefícios ambientais e econômicos desse ecossistema sucroenergético. Assim, a integração de conhecimento técnico-científico com políticas públicas robustas é essencial para que o etanol possa efetivamente contribuir para um futuro energético mais sustentável e equitativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACAR, Canan; DINCER, Ibrahim. *Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. International journal of hydrogen energy*, v. 39, n. 1, p. 1-12, 2014.

AL-KALBANI, H. et al. *Energy and environmental comparison of methanol production from CO₂: Electrolysis vs. conventional hydrogenation. Energy Conversion and Management*, v. 123, p. 353-366, 2016.

AN, X. et al. *Catalytic hydrogenation of CO₂ to methanol: Recent advances and future prospects. Chemical Engineering Journal*, v. 155, n. 3, p. 346-354, 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Emissões de GEE na produção e uso de combustíveis no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://anfavea.com.br>. Acesso em: 10 ago. 2024.

ATSONIOS, K. et al. *High-selectivity membrane reactors for methanol production: Reducing investment costs through innovative design. Journal of Membrane Science*, v. 499, p. 282-295, 2016a.

AVIATION, A. T. A. G. **Benefits beyond Borders**. Geneva: Air Transport Action Group, 2014.

BACOVSKY, D. et al. *Status of advanced biofuels demonstration facilities in 2012*. A report to IEA Bioenergy task 39. 2013.

BARROS, F. et al. *Infrastructure and logistics for CO₂ capture, transportation, and storage in Brazil. Journal of Infrastructure Studies*, v. 15, n. 3, p. 215-230, 2021.

BAUEN, A. et al. *Alcohol-to-Jet (ATJ) fuel: Conversion pathways, logistics, and production challenges. Renewable Aviation Fuel Journal*, v. 14, n. 2, p. 198-211,

2020.

BERTAUI, Martin et al. (Ed.). *Methanol: the basic chemical and energy feedstock of the future*. Heidelberg: Springer, 2014.

CARDOSO, C. A. L.; BRAGA, P. P. N.; PEREIRA, E. G. *Impacts of ethanol use on health and environment*. *Renewable Energy*, v. 115, p. 812-824, 2018.

CHERUBINI, Francesco. *The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals*. *Energy conversion and management*, v. 51, n. 7, p. 1412-1421, 2010.

CHUM, H. L.; OVEREND, R. P.; KARLOVITZ, B. T. *Biomass and bioenergy*. In: *Biomass conversion technologies*. p. 213-275, 2011.

CIFRE, P. Galindo; BADR, Ossama. *Renewable hydrogen utilisation for the production of methanol*. *Energy conversion and management*, v. 48, n. 2, p. 519-527, 2007.

CONTEMPORARY AMPEREX TECHNOLOGY CO. LTD. *Battery for electric aviation*. 2024. Disponível em: <https://www.catl.com/en/>. Acesso em: 11 ago. 2024.

COSCO Shipping Lines. *World's first 700 TEU pure battery-powered containerhips are here*. *Offshore Energy*, 29 dez. 2023. Disponível em: <https://www.offshore-energy.biz>. Acesso em: 11 ago. 2024.

COSTA, M. et al. *Regulatory and political aspects of BIO CCS implementation: Barriers and policy recommendations*. *Energy Policy Journal*, v. 38, n. 4, p. 567-580, 2021.

DOE – Department of Energy. *Hydrogenation of CO₂ to methanol: An evaluation of technical and economic feasibility*. U.S. Department of Energy Report, 2004.

EUROPEAN COMMISSION. *Fit for 55: delivering the EU's 2030 Climate Target*

on the way to climate neutrality. 2021. Disponível em: <https://ec.europa.eu>. Acesso em: 11 ago. 2024.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Maritime Transport and Emissions*. 2023.

FARGIONE, J. et al. *Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt*. *Science*, v. 319, n. 5867, p. 1235-1238, 2008.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). *Testimony of Billy Nolen: Implementation and Oversight of the Aircraft Certification, Safety, and Accountability Act*. Audiência perante o Comitê de Comércio, Ciência e Transporte do Senado dos EUA. Washington, D.C., 8 mar. 2023. Disponível em: <https://www.transportation.gov>. Acesso em: 11 ago. 2024.

FENG, Y. et al. *An integrated process of biomass gasification with steam reforming and methanol synthesis for bio-methanol production*. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 8, p. 5241-5246, 2011.

FERREIRA-LEITÃO, V.; SILVA, J. F.; BON, E. P. S. *Ethanol Production from Sugarcane Bagasse by Enzymatic Hydrolysis*. *Renewable Energy*, v. 36, n. 3, p. 1-9, 2010.

FINK, A. *Conducting Research Literature Reviews: From the Internet to Paper*. Sage Publications, 2014.

GOLDEMBERG, J. *Ethanol for a Sustainable Energy Future*. *Science*, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. *Renewable energy—traditional biomass vs. modern biomass*. *Energy Policy*, v. 32, n. 6, p. 711-714, 2004.

GRAVER, B. *The growth and impact of aviation: trends and prospects*. *Environmental Research Letters*, 2022.

GREENE, Andrew et al. *E-methanol: Opportunities and challenges for decarbonizing maritime transport*. *Clean Energy Technologies Journal*, v. 9, n. 1, p. 101-117, 2022.

HART, C. *Doing a Literature Review: Releasing the Social Science Research Imagination*. Sage Publications, 1998.

HENDERSON, P. et al. *E-methanol: A green alternative for carbon capture and hydrogen electrolysis*. *International Journal of Green Energy*, v. 11, n. 6, p. 341-357, 2021.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). *Sustainable Aviation Fuel (SAF) and Future of Flying*. International Air Transport Association, 2022.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). *Environmental Report*. International Civil Aviation Organization, 2017.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). *SAF Drop-in Fuels*. International Civil Aviation Organization, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Aviation – Tracking Transport*. International Energy Agency, 2023a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Chemical Industry – Analysis*. International Energy Agency, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The Future of Petrochemicals: Towards more sustainable chemicals*. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 10 ago. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook*. International Energy Agency, 2023.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANISATION (IMO). *Fourth IMO GHG Study*. International Maritime Organisation, 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA) et al. *Innovation Outlook: Advanced Liquid Biofuels*. International Renewable Energy Agency, 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. International Renewable Energy Agency, 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Reaching Zero with Renewables: Biofuels for Aviation*. International Renewable Energy Agency, 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Renewable Capacity Statistics 2022*. 2022. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 10 ago. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Renewable Energy for Shipping*. International Renewable Energy Agency, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch>. Acesso em: 10 ago. 2024.

JADHAV, S. et al. *Renewable hydrogen for methanol production: Technical and economic evaluation of pilot plants in Iceland and Japan*. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 18, p. 10002-10014, 2014.

JONES, A.; BROWN, C.; WILSON, D. *Advances in CO₂ capture technologies: Enhancing biogenic processes for BIO CCS*. *Journal of Carbon Management*, v. 10, n. 2, p. 145-160, 2022.

KIM, S.; DALE, B. E. *Environmental Aspects of Ethanol Derived from No-Till Corn Grain: Nonrenewable Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions*. *Biomass and Bioenergy*, v. 28, n. 5, p. 475-489, 2015.

LEDUC, Sylvain et al. *The potential of methanol as a marine fuel: Low-emission internal combustion engines and fuel cells*. *Journal of Maritime Technology*, v. 45, n. 3, p. 215-230, 2021.

LEE, D. S. et al. *Aviation and global climate change in the 21st century*. *Atmospheric Environment*, 2018.

LIU, Y. et al. Alcohol-to-jet: A sustainable pathway for biofuel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2022.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse Gases Emissions in the Production and Use of Ethanol from Sugarcane in Brazil: The 2005/2006 Averages and a Prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MAN Energy Solutions. *Shipping decarbonization study*. 2023. Disponível em: <https://www.man-es.com>. Acesso em: 09 ago. 2024.

MATZEN, M. et al. *Wind-powered methanol production using CO₂ from ethanol fermentation*. *Renewable Energy Journal*, v. 98, p. 446-459, 2016.

MENEZES, D. et al. *Advances in Alcohol-to-Jet (ATJ) technology: Conversion of short-chain alcohols to aviation fuels*. *Journal of Chemical Engineering*, v. 52, n. 7, p. 1125-1140, 2022.

METHANOL INSTITUTE. *Global Methanol Industry*. 2024a. Disponível em: <https://www.methanol.org>. Acesso em: 09 ago. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Balço Energético Nacional 2019*. Disponível em: <https://www.mme.gov.br>. Acesso em: 01 set. 2024.

MORAIS, A. R. C.; ZUIN, V. G. ***Ethanol Production from Sugarcane Bagasse: Current Achievements and Future Perspectives***. *Renewable Energy*, v. 77, p. 953-965, 2014.

NG, K. S.; FAROOQ, D.; YANG, A. ***Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production***. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 150, p. 111502, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/353403500_Global_biorenewable_development_strategies_for_sustainable_aviation_fuel_production. Acesso em: 15 jul. 2024.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD); FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). ***Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options***. *Organization for Economic Co-operation and Development*, 2023.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). ***Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options***. *Organization for Economic Co-operation and Development*, 2022b.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO (FAO). ***Global Trade and Markets: Ethanol***. 2020. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 09 jul. 2024.

PEDERSEN, L. S.; SCHULTZ, P. H. ***Integrated Biogas and Methanol Production System***. *Renewable Energy Technology Conference*, 2012.

PÉREZ-FORTES, M.; SCHÖNEBERGER, J. C.; BOULAMANTI, A.; TZIMAS, E. ***Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment***. *Applied Energy*, v. 161, p. 718-732, 2016.

PETERS, J. et al. ***Ethanol as a key component in sustainable maritime biofuels***. *Marine Fuel Innovations*, v. 10, n. 1, p. 45-60, 2022.

PLASTICS EUROPE. *Plastics – the Facts 2023: an analysis of European plastics production, demand and waste data*. Brussels: Plastics Europe, 2023. Disponível em: <https://plasticseurope.org>. Acesso em: 18 jul. 2024.

RENÓ, M. et. al. *Assessment of two methanol production processes from biomass for the Brazilian transport sector*. *Energy for Sustainable Development*, v. 15, n. 2, p. 167-176, 2011.

ROCHA, L. B. *Análise integrada da utilização de CO₂ em destilarias de etanol para produção de biometanol no Brasil*. 2018.

ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS (RSB). *Sustainable Aviation Fuels – RSB’s Approach*. 2021.

SANTOS, R. O. et al. *Multi-objective optimization of water consumption for a methanol synthesis process*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 24, n. 5, p. 1487-1505, 2022.

SHIP & BUNKER. *Marine Fuel Costs and Alternatives*. 2024.

SILVA, C. A. S.; VIEIRA, L. C.; VEIGA, M. F. *Production of methanol from sugarcane bagasse and vinasse: A Brazilian case study*. *Biomass and Bioenergy*, v. 106, p. 105-115, 2017.

SILVA, R. et al. *Economic viability of BIO CCS in Brazil: Cost analysis and incentives*. *Brazilian Journal of Sustainable Technologies*, v. 5, n. 1, p. 89-102, 2020.

SIMAS, M. H.; PIRES, A. P. F.; SANTOS, M. R. *Opportunities and Challenges for Ethanol as an Aviation Fuel*. *Fuel Processing Technology*, v. 198, p. 1-9, 2020.

SMITH, E.; JOHNSON, M.; ROBERTS, P. *Long-term storage and monitoring of CO₂ in BIO CCS projects: Addressing challenges and risks*. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 15, p. 231-245, 2022.

SOUZA, G. M.; BALLAROTTI, M. V.; JANK, M. S. *The Brazilian Ethanol Industry: Historical Evolution, Future Perspectives and Challenges*. *Biofuels*, v. 8, n. 2, p. 195-209, 2017.

SORIA, A.; SILVA, J. P.; DAWSON, A. *The Role of the Renewable Fuel Standard in the U.S. Ethanol Industry*. 2018.

STEFANINI, C. et al. *The role of flex-fuel vehicles in the global transition to biofuels*. In: *Proceedings of the International Conference on Biofuels*. 2021.

TOYIR, J. et al. *Catalysts for methanol production via CO₂ hydrogenation: Development and industrial applications by Mitsui Chemicals*. *Catalysis Today*, v. 148, n. 3-4, p. 130-135, 2009.

UNCTAD. *Review of Maritime Transport 2023: Towards a Green and Just Transition*. United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD/RMT/2023. Disponível em: <https://unctad.org>. Acesso em: 18 jul. 2024.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Impacto socioeconômico da produção de etanol no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://www.unica.com.br>. Acesso em: 18 jul. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (UFF). **UFF busca produção sustentável de metanol a partir de diversas fontes de biogás**. Disponível em: <https://www.uff.br/26-10-2023/uff-busca-producao-sustentavel-de-metanol-a-partir-de-diversas-fontes-de-biogas/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *Biofuels Annual: Brazil*. 2023. Disponível em: <https://www.usda.gov>. Acesso em: 18 jul. 2024.

WILLIAMS, J. et al. *Challenges and opportunities in integrating BIO CCS with existing energy and biofuel production systems*. *Journal of Clean Energy Technologies*, v. 9, n. 2, p. 245-262, 2021.