

Panorama dos biocombustíveis

Ibriesbio

Contents

1	Introdução	1
2	Visão Geral dos Biocombustíveis	2
2.1	Definição	2
2.2	Importância e Benefícios Ambientais	2
3	Tipos de Biocombustíveis	2
3.1	Biodiesel	2
3.2	Etanol	5
3.3	Biometano	8
3.4	SAF (Sustainable Aviation Fuel - Querosene de Aviação Sustentável)	12
3.5	Biogás	15
3.6	HVO (Óleo Vegetal Hidrogenado)	18

1 Introdução

Os biocombustíveis representam uma categoria essencial de fontes de energia renovável, derivada de biomassa, que desempenha um papel crescente na matriz energética global. Eles surgem como uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis, oferecendo benefícios ambientais significativos e contribuindo para a segurança energética. Neste relatório, faremos um panorama abrangente sobre os biocombustíveis, desde suas definições e tipos até a análise de dados históricos, tendências futuras, desafios e oportunidades. Nosso objetivo é fornecer uma compreensão aprofundada de sua relevância para a transição energética e a descarbonização de diversos setores, especialmente o de transportes.

2 Visão Geral dos Biocombustíveis

2.1 Definição

Biocombustíveis são combustíveis produzidos a partir de biomassa, que é qualquer matéria orgânica de origem vegetal ou animal. Diferentemente dos combustíveis fósseis, que levam milhões de anos para se formar e liberam carbono retido na terra, os biocombustíveis utilizam carbono recentemente sequestrado da atmosfera por meio da fotossíntese. Isso os torna parte de um ciclo de carbono mais curto e teoricamente neutro em carbono, se a biomassa for cultivada de forma sustentável.

2.2 Importância e Benefícios Ambientais

A importância dos biocombustíveis reside na sua capacidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, mitigar as mudanças climáticas e promover o desenvolvimento rural. Os principais benefícios ambientais incluem:

- **Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE):** A queima de biocombustíveis geralmente resulta em uma emissão líquida de carbono menor em comparação com os combustíveis fósseis, uma vez que o CO₂ liberado é equivalente ao CO₂ absorvido pela planta durante seu crescimento.
- **Melhora da Qualidade do Ar:** Muitos biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, podem ter um perfil de combustão mais limpo, resultando em menores emissões de material particulado, óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x) em comparação com a gasolina e o diesel fósseis.
- **Fonte Renovável:** A matéria-prima para a produção de biocombustíveis é continuamente renovável, garantindo um suprimento sustentável a longo prazo, ao contrário das reservas finitas de combustíveis fósseis.
- **Biodegradabilidade:** Alguns biocombustíveis são biodegradáveis e menos tóxicos que seus equivalentes fósseis, reduzindo os impactos ambientais em caso de derramamento.

3 Tipos de Biocombustíveis

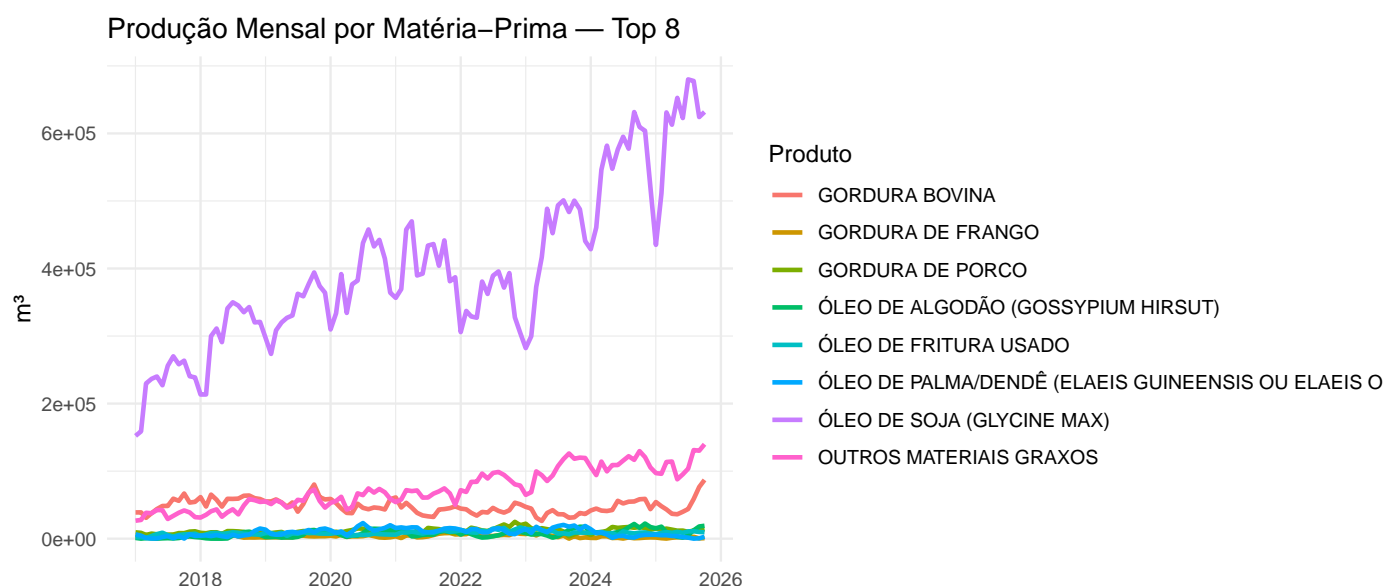
Exploraremos os principais tipos de biocombustíveis, detalhando sua produção, matérias-primas, vantagens e desafios.

3.1 Biodiesel

- **Produção:** O biodiesel é produzido principalmente por meio da transesterificação de óleos vegetais (ou gorduras animais) com um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol) na presença de um catalisador, resultando em ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos. A glicerina é um subproduto.

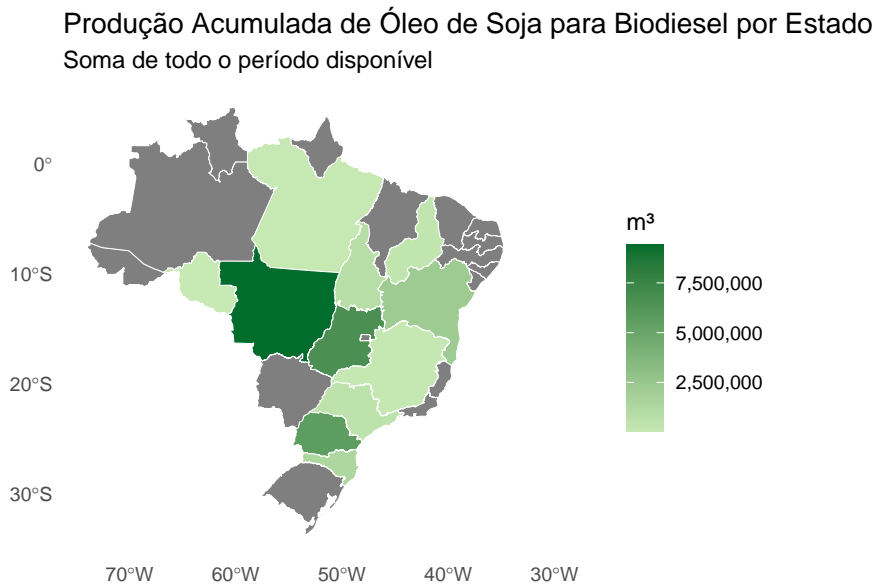
- **Matérias-primas comuns:** Óleo de soja, óleo de palma, óleo de girassol, óleo de canola (colza), sebo bovino, gordura de frango e óleos de cozinha residuais. No Brasil, o óleo de soja é a matéria-prima predominante.
- **Vantagens:** Redução de GEE, menor emissão de particulados, SOx e hidrocarbonetos não queimados. Pode ser utilizado puro ou misturado ao diesel fóssil em motores diesel existentes sem grandes modificações. Contribui para a valorização de resíduos e coprodutos agrícolas.
- **Desafios:** Custo de produção, competição com a produção de alimentos, potencial impacto no desmatamento (especialmente para palma), estabilidade oxidativa e desempenho em baixas temperaturas (dependendo da matéria-prima).

3.1.1 Produção Mensal de Biodiesel por Matéria-Prima — Top 8



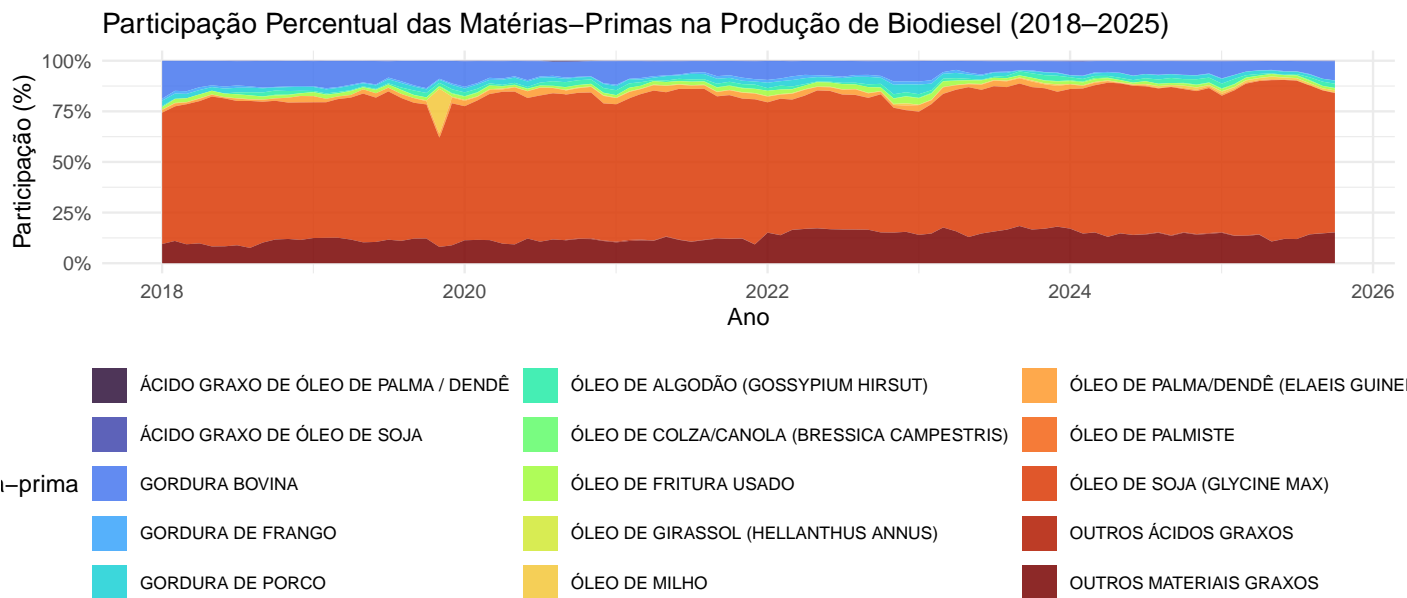
A predominância esmagadora do Óleo de Soja como principal matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil é evidente. As demais matérias-primas apresentam volumes significativamente menores, embora algumas, como gorduras animais e óleo de fritura usado, mostrem um crescimento discreto. Observamos que as gorduras animais (bovina, de frango e de porco) e o óleo de fritura usado são as principais fontes alternativas à soja, com volumes crescentes.

3.1.2 Mapa da Produção Acumulada de Biodiesel a partir de Óleo de Soja por Estado



Os estados do Sul e Centro-Oeste são claramente as regiões com maior produção acumulada de biodiesel a partir de óleo de soja, representadas pelas cores mais escuras/intensas no mapa.

3.1.2.1 Participação Percentual das Matérias-Primas na Produção de Biodiesel (2018–2025)



O gráfico demonstra uma clara dominância do Óleo de Soja (Glycine Max), que consistentemente representa a maior parte da produção de biodiesel, frequentemente superando 70%. Outros materiais graxos

e ácidos graxos, juntamente com gorduras animais como a bovina, formam o segundo maior bloco de contribuintes, com as gorduras animais mostrando uma tendência de crescimento na sua participação a partir de 2023.

3.1.3 Cenário de Produção e Matérias-Primas

Ao analisar o panorama do biodiesel, observamos um crescimento constante e significativo na produção mensal total de biodiesel no Brasil entre 2018 e 2025, com projeções indicando uma contínua expansão para 2026, mesmo com uma aparente e breve desaceleração projetada entre o final de 2025 e o início de 2026. A produção, que se mantinha em patamares próximos a 600.000 m³ mensais em 2022, mostra uma tendência de ultrapassar essa marca.

Regionalmente, os dados indicam a liderança inquestionável da região Sul e Centro-Oeste na produção de biodiesel, detendo consistentemente as maiores fatias da produção total. Embora o Nordeste e o Norte apresentem volumes menores, notamos uma presença relevante e uma tendência de crescimento contínuo em suas produções. A região Sudeste, no entanto, é a única exceção a essa dinâmica de expansão, registrando um declínio em sua participação percentual ao longo do período analisado. Ao aprofundarmos nos estados, vemos que Rio Grande do Sul e Mato Grosso são os líderes de produção, com volumes expressivos, enquanto Paraná, Goiás e Bahia também contribuem significativamente, e todos esses estados mostram tendências de crescimento.

A predominância esmagadora do Óleo de Soja como principal matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil é um ponto crucial. Entre 2018 e 2025, o óleo de soja representou consistentemente a maior parte da produção, frequentemente superando 50%. As demais matérias-primas, embora importantes, apresentam volumes significativamente menores. Ao excluirmos o óleo de soja da análise, percebemos que as gorduras animais (bovina, de frango e de porco) e o óleo de fritura usado são as principais fontes alternativas, com volumes crescentes. A gordura bovina, por exemplo, mantém uma participação estável entre 20% e 30% na mistura de matérias-primas (excluindo soja) projetada para 2025, enquanto “Outros Materiais Graxos” representam a maior proporção, variando entre 50% e 65%. O óleo de algodão exibe uma variação sazonal mais pronunciada, com picos de participação em abril.

Em termos de processamento de óleo de soja especificamente para biodiesel, observamos um aumento substancial e contínuo no volume, que partiu de cerca de 300.000 m³ em 2018 e pode ultrapassar 600.000 m³ em 2026. As regiões Sul e Centro-Oeste lideram esse processamento, com o Sudeste também apresentando volumes consideráveis. Os estados de Rio Grande do Sul e Mato Grosso são os maiores processadores de óleo de soja para biodiesel, seguidos pelo Paraná, e todos mostram uma tendência de crescimento. A produção acumulada de biodiesel a partir de óleo de soja por estado reafirma visualmente que o Sul e o Centro-Oeste são as regiões com a maior contribuição.

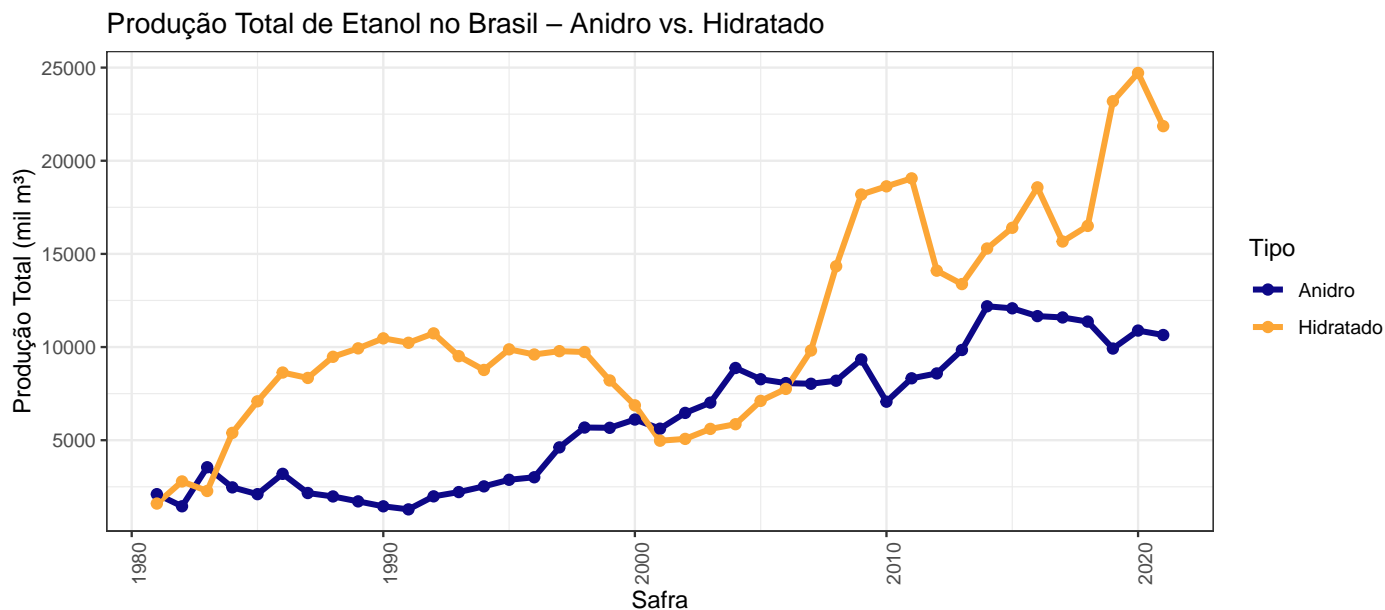
A diversificação das matérias-primas, embora ainda dominada pela soja, demonstra uma busca por alternativas e valorização de resíduos.

3.2 Etanol

- **Produção:** O etanol é um álcool produzido pela fermentação de açúcares. Pode ser de primeira geração (a partir de amido ou açúcar), segunda geração (celulósico, a partir de biomassa lignocelulósica) ou terceira geração (a partir de algas).
- **Diferentes fontes:**

- **Cana-de-açúcar:** Brasil é líder mundial na produção de etanol de cana, com alta eficiência energética e balanço de GEE favorável.
 - **Milho:** Principal matéria-prima nos EUA, o processo envolve moagem, sacarificação e fermentação do amido.
 - **Mandioca, beterraba, sorgo:** Outras fontes agrícolas com menor expressão global.
 - **Biomassa lignocelulósica (celulósico):** Materiais como palha de cana, bagaço, resíduos florestais. Processo mais complexo que envolve pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação.
- **Uso em veículos e misturas:** Utilizado puro (E100) ou em misturas com gasolina (E10, E25 no Brasil, E85 em alguns países). Motores flex-fuel adaptados para ambos.
 - **Vantagens:** Alta octanagem, combustão mais limpa, redução de GEE (especialmente o de cana), renovável e de fácil produção em diversas regiões.
 - **Limitações:** Competição por terra e água com a produção de alimentos, balanço energético do etanol de milho é questionado, necessidade de motores adaptados para altas concentrações.

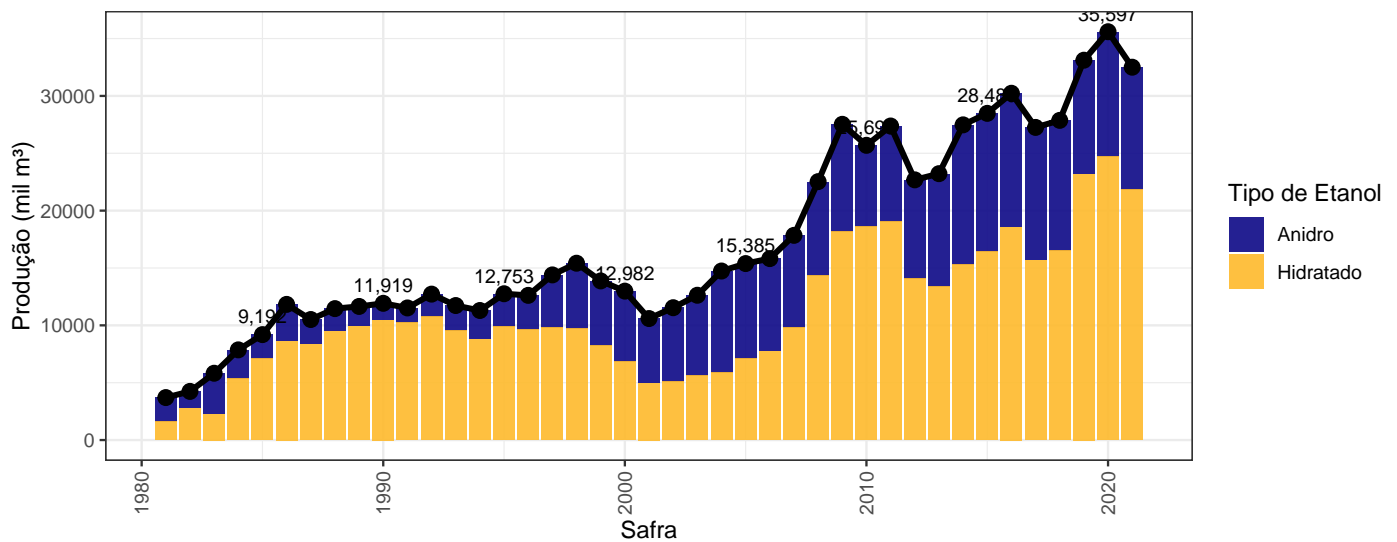
3.2.0.1 Produção Total de Etanol no Brasil



Este gráfico de série temporal compara a produção total de etanol anidro e hidratado no Brasil, em mil m³, por safra, de 1980 a 2020. Observamos que a produção de etanol hidratado é consistentemente superior à de etanol anidro ao longo de quase todo o período, com a diferença se acentuando nas últimas décadas.

3.2.0.2 Produção de Etanol (Anidro + Hidratado)

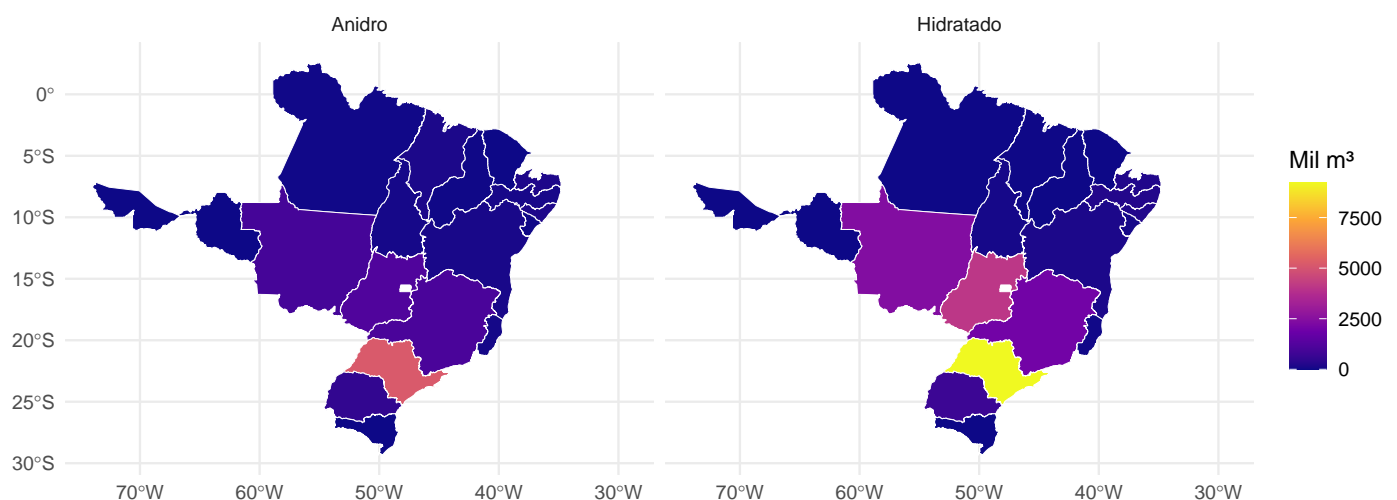
Produção de Etanol (Anidro + Hidratado) por Safra
Barras Empilhadas + Linha do Total



O gráfico mostra que a produção total de etanol no Brasil (anidro + hidratado) cresceu desde os anos 1980, saindo de menos de 5 mil m³ para picos acima de 35 mil m³ após 2020. Observam-se ciclos de expansão e retração ligados a diversos fatores como preços internacionais do açúcar, condições climáticas e demanda interna.

3.2.0.3 Produção de Etanol Anidro vs. Hidratado

Produção de Etanol Anidro vs. Hidratado — Safra 2021



Este mapa compara a produção de etanol anidro e hidratado por estado na safra de 2021. As cores mais intensas para o etanol hidratado (à direita) concentram-se principalmente em São Paulo, Goiás e Mato Grosso do Sul, enquanto o etanol anidro (à esquerda) mostra uma distribuição similar, mas com volumes geralmente menores.

3.2.1 Etanol: A Dinâmica da Produção Nacional

Ao explorarmos os dados históricos do etanol no Brasil, constatamos a complexidade e a robustez desse biocombustível em suas duas principais formas: hidratado e anidro.

No que se refere ao etanol hidratado, observamos uma liderança consistente de São Paulo na produção ao longo de todo o período analisado (1980 a 2020), com volumes significativamente superiores aos demais estados. Goiás e Mato Grosso do Sul demonstram um crescimento notável na produção a partir dos anos 2000, enquanto Minas Gerais e Paraná mantêm uma participação relevante, mas com crescimento menos expressivo. A produção total de etanol hidratado no Brasil, que é a soma da produção dos estados, revelou um crescimento substancial e contínuo, atingindo um pico significativo de 24.713 mil m³ na safra de 2020, com uma aceleração notável a partir dos anos 2000. O ranking dos maiores produtores por safra, nas últimas três safras disponíveis (2019, 2020 e 2021), mostra uma notável consistência dos cinco maiores estados, com São Paulo mantendo sua liderança absoluta. Visualmente, o mapa da produção de etanol hidratado em 2021 reitera a alta concentração no Sudeste (São Paulo, Minas Gerais) e Centro-Oeste (Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso), com produções muito baixas ou inexistentes nas regiões Norte e Nordeste.

Para o etanol anidro, a estrutura de produção espelha a do hidratado. São Paulo lidera a produção, com Goiás e Mato Grosso apresentando crescimento relevante a partir dos anos 2000. Minas Gerais e Paraná também contribuem, mas em menor volume. A produção total de etanol anidro no Brasil mostra um padrão de crescimento contínuo, atingindo seu ponto mais alto em 2014, com 12.079 mil m³, embora com volumes absolutos menores que os do etanol hidratado. O heatmap da produção por estado e safra para o etanol anidro reforça a concentração geográfica nos mesmos estados líderes do hidratado, com uma intensificação da produção ao longo do tempo. O ranking dos maiores produtores de etanol anidro nas últimas três safras também se mantém inalterado, com São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul liderando consistentemente. O mapa da produção de etanol anidro em 2021 demonstra uma sobreposição geográfica significativa com a produção de etanol hidratado, indicando cadeias de suprimento e infraestrutura possivelmente frequentemente compartilhadas.

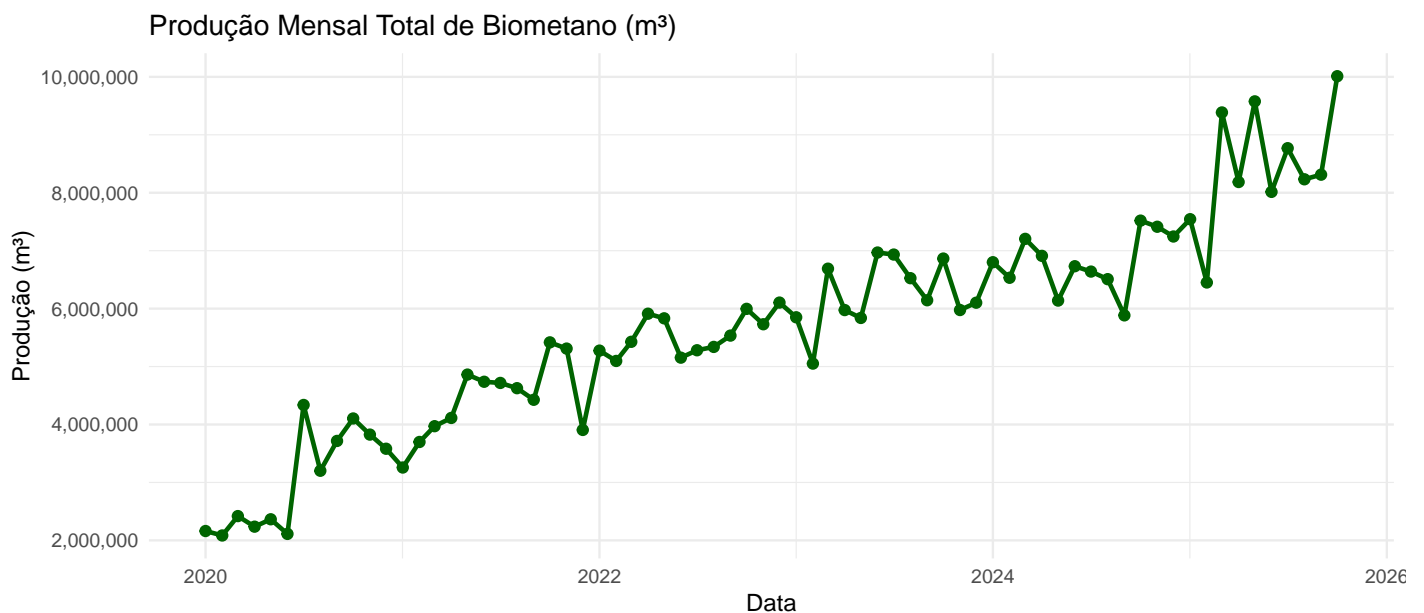
Ao comparar a produção total de etanol (anidro e hidratado), observamos que a produção de etanol hidratado é consistentemente superior à de etanol anidro ao longo de quase todo o período, com a diferença se acentuando nas últimas décadas. Ambas as produções crescem de forma robusta, com o hidratado atingindo cerca de 25.000 mil m³ e o anidro cerca de 12.000 mil m³ em 2020. A participação relativa do etanol anidro e hidratado variou ao longo das safras; enquanto o anidro predominava nos anos 1980, o hidratado ganhou espaço nos anos 1990. Por fim, o gráfico de treemap da Safra 2021 confirma que São Paulo é o maior produtor de etanol do Brasil para ambos os tipos, com Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul como outros polos importantes, e a produção de etanol hidratado geralmente superando a de anidro na maioria dos grandes estados produtores.

3.3 Biometano

- **Produção:** O biometano é o metano purificado obtido a partir do biogás. O biogás é produzido pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos (agrícolas, pecuários, efluentes industriais, lixo urbano). Após a produção do biogás, que contém principalmente metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), ele passa por um processo de purificação (upgrading) para remover o CO₂ e outros contaminantes, elevando a concentração de metano acima de 90%.

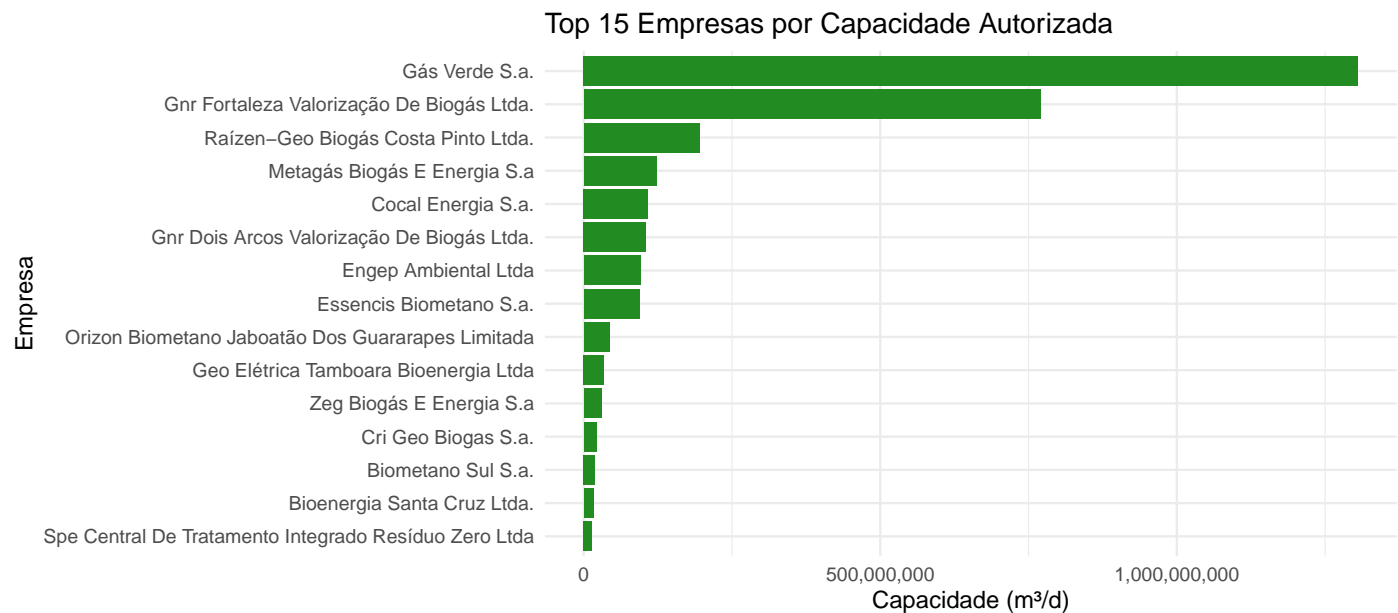
- **Uso como combustível veicular ou injeção na rede de gás natural:** O biometano purificado possui características físico-químicas semelhantes ao gás natural, podendo ser comprimido (GNC) ou liquefeito (GNL) para uso em veículos ou injetado diretamente na rede de gasodutos existente.
- **Vantagens:** Valorização de resíduos orgânicos, redução de emissões de metano (um GEE potente) para a atmosfera, produção de fertilizantes orgânicos (digestato), flexibilidade de uso.
- **Desafios:** Custo da infraestrutura de purificação e compressão, escala de produção, logística de coleta de resíduos, padronização da qualidade para injeção na rede.

3.3.1 Produção Total ao longo do tempo



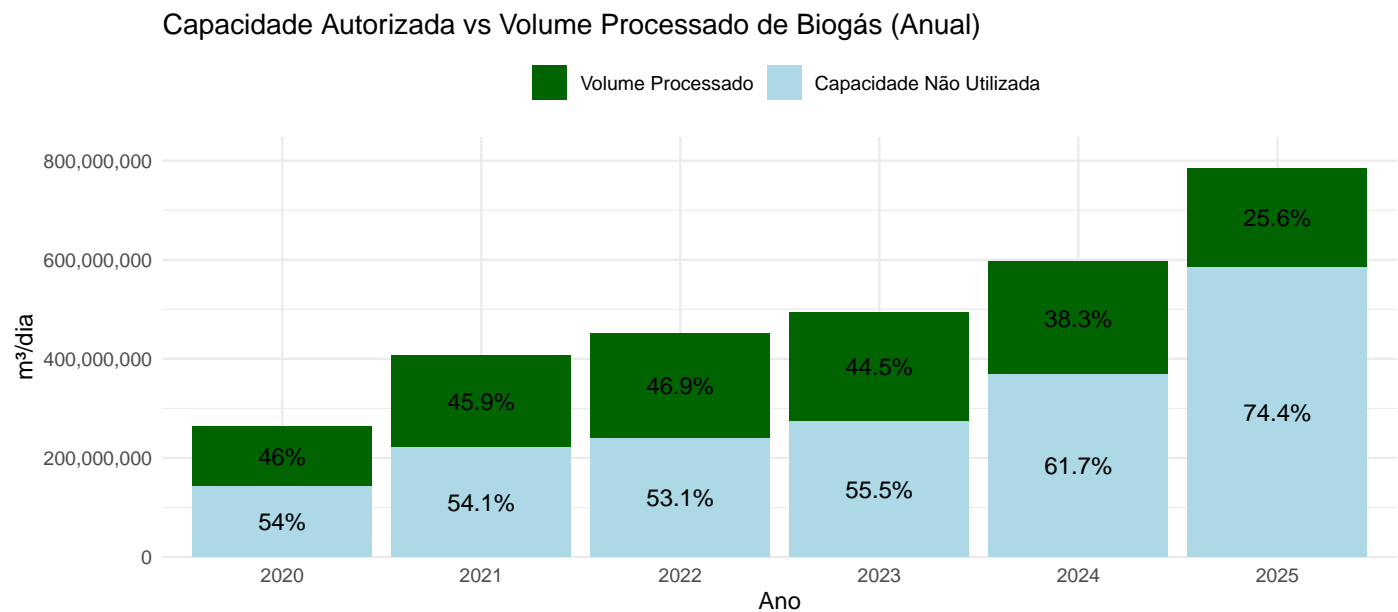
Este gráfico de linha mostra a evolução da produção mensal total de biometano no Brasil, em m³, de 2020 a 2026. Observamos um crescimento da produção, partindo de volumes muito baixos em 2020 e projetando um aumento acentuado até 2026.

3.3.2 Top 15 Empresas por Capacidade Autorizada



A Gás Verde S.A. lidera em capacidade autorizada de produção de biometano, seguida por GNR Fortaleza e Raízen-Geo Biogás Costa Pinto. A concentração da capacidade autorizada em poucas empresas de grande porte sugere um mercado em consolidação.

3.3.3 Capacidade Autorizada vs Volume Processado de Biogás (Anual)



Esse gráfico de barras mostra a capacidade não utilizada (em %) e o volume processado (em %). A taxa de capacidade não utilizada cresce de 54% em 2020 para 74,4% em 2025. Isso pode indicar que muitas

plantas autorizadas ainda não estão operando em plena capacidade ou que a demanda de biometano ainda não absorve toda a produção potencial.

3.3.4 Biometano: Expansão e Desafios de Capacidade

Ao analisar o setor de biometano no Brasil, identificamos um mercado em franca e robusta expansão, embora com desafios notáveis relacionados à utilização da capacidade instalada.

A produção mensal total de biometano no Brasil demonstra um crescimento expressivo. Partindo de volumes muito baixos em 2020, o gráfico da série histórica projeta um aumento acentuado até 2026, com a produção atingindo cerca de 8.000.000 m³ mensais em meados de 2025. Esse crescimento robusto indica o potencial do biometano como substituto do gás natural fóssil.

Regionalmente, a produção de biometano é liderada com folga pela região Sudeste, seguida de perto pelo Nordeste, enquanto o Sul apresenta volumes menores. É importante notar que apenas a região Sudeste exibe uma tendência de crescimento contínuo, enquanto o Nordeste e o Sul mostram uma tendência mais linear. Ao detalhar os estados, Rio de Janeiro destaca-se como o líder absoluto na produção de biometano, com um volume significativamente maior que os demais. Ceará e São Paulo vêm em seguida, seguidos por Paraná, Rio Grande do Sul e Minas Gerais, que completam os seis estados produtores.

Em relação aos tipos de biometano, observamos que a produção de biometano (não comprimido) é substancialmente maior e cresce mais rapidamente do que a de biometano comprimido. Isso sugere que a maior parte do biometano produzido parece ser destinada ao uso direto ou à injeção na rede de gás natural, em vez de ser majoritariamente comprimido para uso veicular específico, possivelmente indicando limitações na infraestrutura de compressão ou uma prioridade para outros mercados. O mapa de calor da produção mensal de biometano por estado (projeção para 2025) reafirma que São Paulo, Ceará e Rio de Janeiro são, de longe, os maiores produtores mensais, com outros estados contribuindo em volumes muito menores.

Um ponto de destaque é o crescimento explosivo da capacidade autorizada total de produção de biometano. A série temporal da capacidade mostra um salto de valores mínimos em 2020 para uma projeção de cerca de 100.000.000 m³/dia em 2026. Regionalmente, o Sudeste e o Nordeste dominam amplamente essa capacidade autorizada, com o Sul apresentando um crescimento notável. Entre as empresas, a Gás Verde S.A. lidera as 15 maiores em capacidade autorizada, com um volume significativamente superior às demais, seguida por GNR Fortaleza e Raízen-Geo Biogás Costa Pinto, o que sugere um mercado em consolidação dominado por grandes players. O mapa de calor da capacidade autorizada por estado para 2025 ilustra que São Paulo domina essa capacidade, com outros estados como Pernambuco, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e Ceará também apresentando volumes, mas em menor escala.

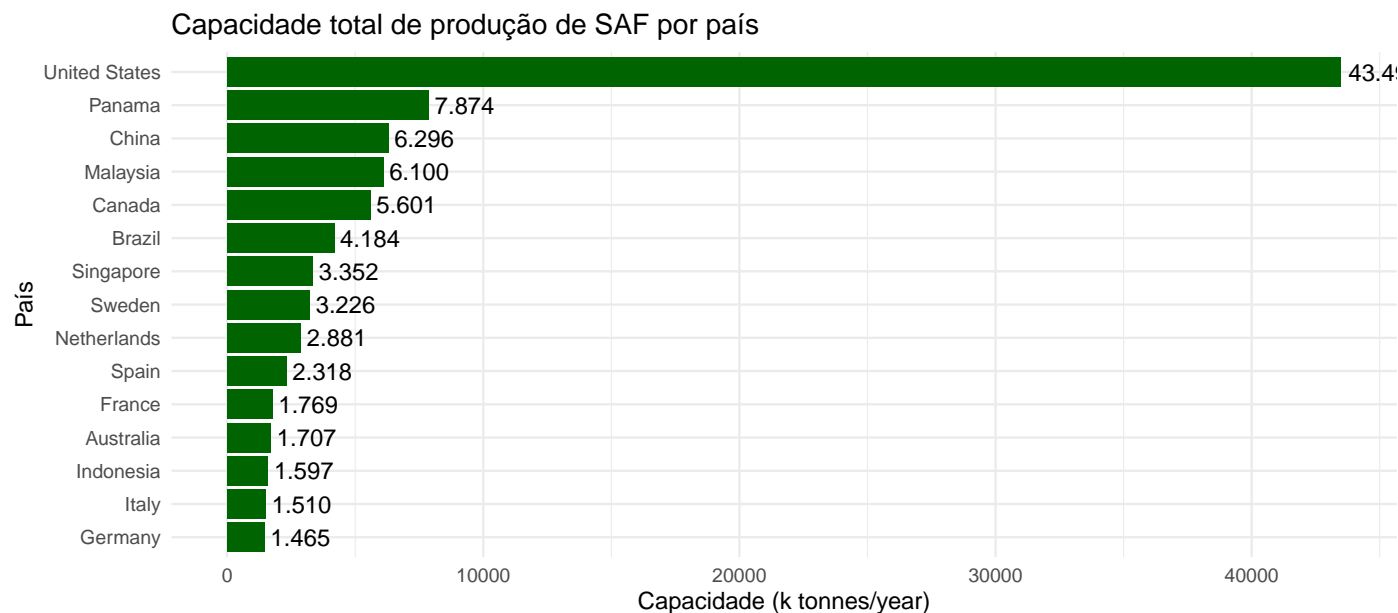
No entanto, a relação entre capacidade autorizada e volume processado de biogás anualmente revela um desafio significativo. Constatamos que a capacidade autorizada é sempre maior do que o volume efetivamente processado, e essa diferença se amplia significativamente em 2025. A taxa de capacidade não utilizada cresce de 54% em 2020 para 74,4% em 2025, indicando que muitas plantas autorizadas ainda não estão operando em plena capacidade ou que a demanda de biometano ainda não absorve toda a produção potencial. O gráfico de dispersão da relação entre capacidade de processamento e volume processado de biogás também mostra que, para capacidades autorizadas mais altas, o volume processado tende a ser menor que a capacidade instalada, revelando uma subutilização da capacidade, especialmente em grandes instalações. Isso sugere um desafio sistêmico na otimização da capacidade em

todo o país. Curiosamente, ao analisar a taxa média de utilização da capacidade por empresa, notamos que empresas como Gás Verde S.A., GNR Dois Arcos e GNR Fortaleza se destacam com as maiores taxas, superando 60% e até 80%, o que pode indicar um desempenho excepcional de eficiência nessas operações específicas.

3.4 SAF (Sustainable Aviation Fuel - Querosene de Aviação Sustentável)

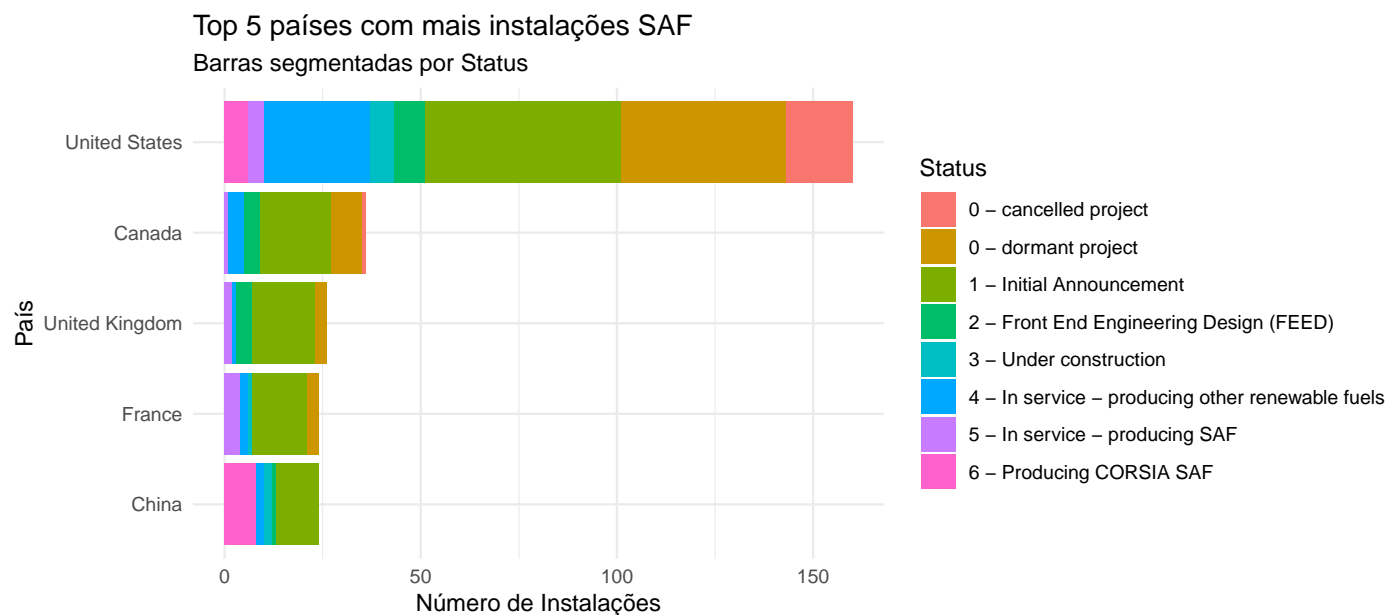
- **Produção:** O SAF refere-se a combustíveis de aviação alternativos que reduzem drasticamente as emissões de GEE em comparação com o querosene fóssil. As rotas de produção incluem:
 - **HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids):** A partir de óleos vegetais e gorduras residuais (similar ao HVO). É a tecnologia mais madura.
 - **Fischer-Tropsch (FT):** A partir de biomassa lignocelulósica ou resíduos sólidos urbanos (biomassa para líquido - BtL).
 - **Alcohol-to-Jet (AtJ):** A partir de etanol ou isobutanol.
 - **Power-to-Liquid (PtL):** A partir de hidrogênio verde e CO2 capturado.
- **Certificações necessárias para uso em aviação:** Para ser usado, o SAF precisa atender a rigorosas especificações técnicas da ASTM International (por exemplo, ASTM D7566 ou ASTM D1655 para misturas). A certificação garante a segurança e o desempenho do combustível em aeronaves.
- **Benefícios e desafios para adoção em larga escala:**
 - **Benefícios:** Única solução de curto a médio prazo para descarbonizar a aviação em larga escala, pois aeronaves existentes podem usar SAF com poucas ou nenhuma modificação. Redução de até 80% das emissões de GEE no ciclo de vida.
 - **Desafios:** Custo de produção significativamente mais alto que o querosene fóssil, disponibilidade limitada de matérias-primas sustentáveis, necessidade de políticas de incentivo robustas, infraestrutura de produção ainda incipiente.

3.4.1 Capacidade total por país (mil toneladas/ano)



Este gráfico de barras horizontais mostra a capacidade total de produção de SAF por país, em mil toneladas por ano. Os Estados Unidos possuem mais de 43 milhões toneladas/ano de capacidade. O Panamá tem a segunda maior capacidade, superando 7 milhões toneladas/ano, seguido pela China e pela Malásia, ambos acima de 5.000 mil toneladas/ano. O Brasil aparece em sexto lugar, com uma capacidade próxima a 4.000 mil toneladas/ano.

3.4.2 Top 5 países com mais instalações, segmentado por Status



Este gráfico de barras empilhadas mostra o número de instalações SAF para os 5 principais países (Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Alemanha, França), segmentado pelo status do projeto. Nos Estados Unidos, a categoria “Initial Announcement” domina, seguida por “Producing CORSIA SAF” e “Under construction”. Os outros países também mostram uma distribuição similar, com uma proporção significativa de projetos em fase inicial.

3.4.3 SAF (Sustainable Aviation Fuel): Promessa e Desafios de Implantação Global

A análise do SAF (Sustainable Aviation Fuel) revela um setor em efervescência global, caracterizado por um rápido aumento no número de anúncios de projetos, mas com a maior parte da capacidade ainda em fases iniciais de desenvolvimento.

Observamos que os Estados Unidos lideram com folga o número de instalações de SAF, totalizando 160, um número substancialmente maior em comparação com o Canadá (36) e o Reino Unido (26). O Brasil ocupa uma posição relevante, a sétima, com 23 instalações. Contudo, quando analisamos a capacidade total de produção por país, percebemos que nem sempre o maior número de instalações se traduz na maior capacidade. Curiosamente, o Panamá, que não aparece entre os 15 países com mais instalações, aparece com a segunda maior capacidade total, superando 7 milhões de toneladas por ano, seguido pela China e Malásia, ambas acima de 6.000 mil toneladas por ano.

A evolução anual dos anúncios de instalações de SAF demonstra um aumento gradual até 2019, seguido por um crescimento exponencial a partir de 2020, atingindo um pico de quase 100 anúncios em 2023. Esse rápido aumento reflete um crescente interesse e compromisso global com a descarbonização da aviação. No entanto, a distribuição das capacidades das instalações mostra que a maior frequência de projetos se concentra em capacidades menores (entre 0 e 1.000 mil toneladas por ano), com a frequência diminuindo drasticamente para instalações de grande porte.

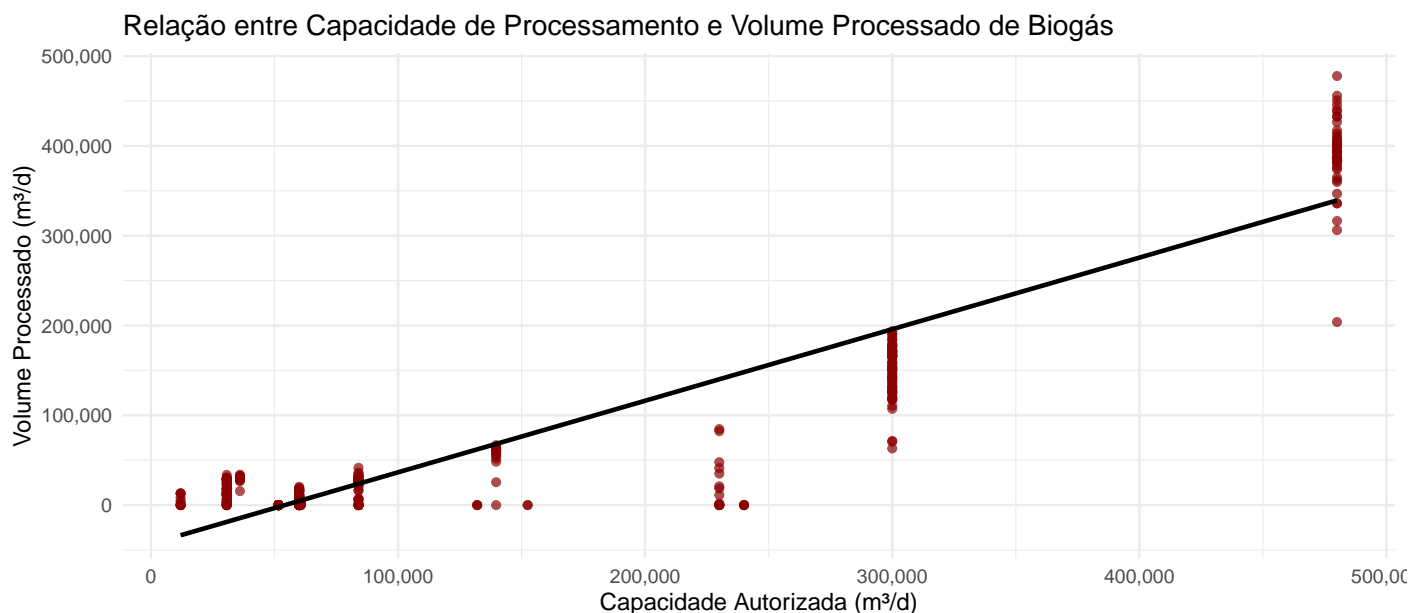
Um ponto crítico é a capacidade total por status das instalações. A categoria “Initial Announcement” (Anúncio Inicial) representa a maior parcela da capacidade total, indicando que a maioria dos projetos ainda está em fases iniciais de planejamento. Embora “Em operação - produzindo SAF” e “Produzindo SAF para CORSIA” representem capacidades menores, “Em construção” também possui uma parcela relevante. Isso sugere que a maior parte da capacidade planejada ainda não está operacional. A distribuição geral do número de instalações por status corrobora essa observação, com “Initial Announcement” sendo a categoria com o maior número de instalações (mais de 200). As categorias de projetos cancelados ou dormentes também estão presentes, indicando que nem todos os projetos avançam.

Ao segmentarmos os cinco principais países por status de suas instalações, vemos que, mesmo nos líderes como os Estados Unidos, a categoria “Initial Announcement” domina, seguida por “Dormant Project” e “In service – producing other renewable fuels”. Essa distribuição é similar em outros países, com uma proporção significativa de projetos em fase inicial. Isso destaca que, embora o setor de SAF esteja em intenso desenvolvimento, a concretização da capacidade produtiva ainda demanda esforços substanciais. Geograficamente, o mapa-múndi das instalações SAF por país mostra as maiores concentrações na América do Norte e Europa, com a Ásia também apresentando pontos de interesse e o Brasil se destacando na América do Sul, indicando que as economias desenvolvidas com regulamentações mais avançadas e maior pressão por descarbonização lideram essa corrida.

3.5 Biogás

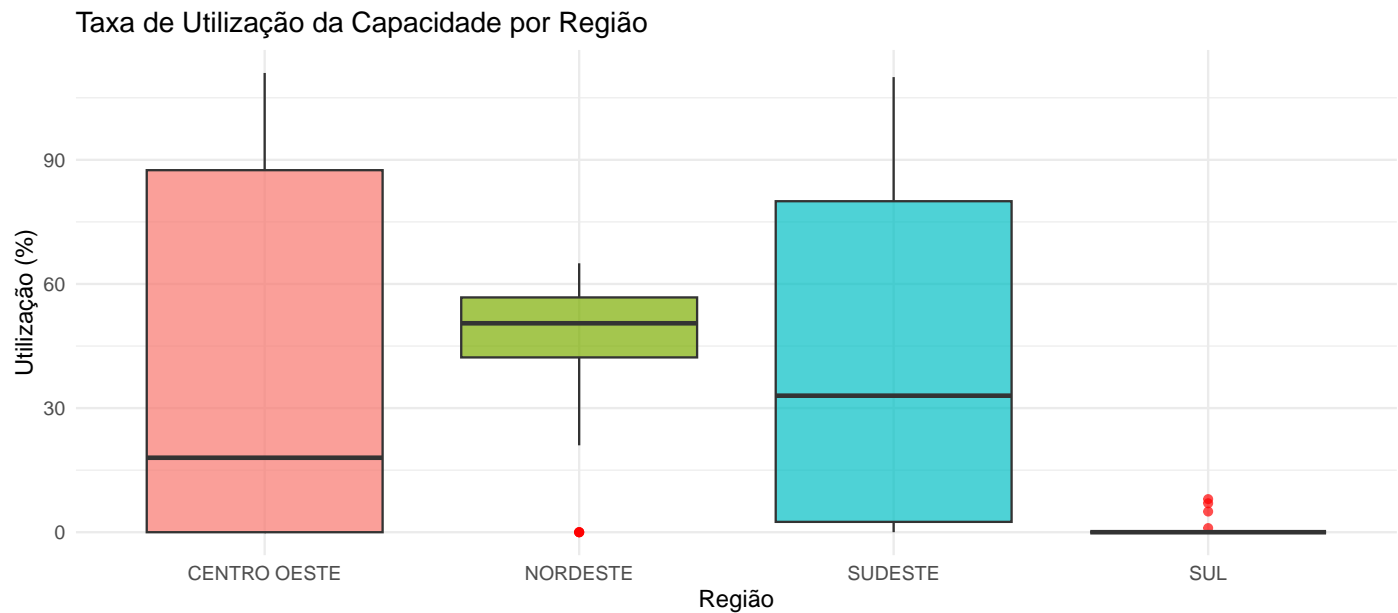
- **Produção:** O biogás é uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4 , 50-75%) e dióxido de carbono (CO_2 , 25-50%), com traços de outros gases (H_2S , H_2 , N_2 , O_2). É produzido pela digestão anaeróbia da biomassa orgânica por microrganismos em ambientes fechados (biodigestores), sem a presença de oxigênio.
- **Uso para geração de energia elétrica, calor e como combustível veicular após purificação:**
 - **Geração de energia elétrica e calor (cogeração):** O biogás bruto pode ser queimado em motogeradores ou turbinas para produzir eletricidade e calor simultaneamente, otimizando o uso energético.
 - **Combustível veicular (após purificação):** Conforme detalhado no item de biometano, o biogás pode ser purificado para se tornar biometano e, então, utilizado como combustível em veículos adaptados.
- **Vantagens:** Solução para gerenciamento de resíduos orgânicos, geração de energia descentralizada, redução de odores e patógenos, produção de fertilizantes (digestato).
- **Desafios:** Variabilidade da composição do biogás (necessita tratamento), sensibilidade dos biodigestores a flutuações, custos de capital para instalação de usinas, necessidade de escala para viabilidade econômica.

3.5.1 Relação entre Capacidade de Processamento e Volume Processado de Biogás



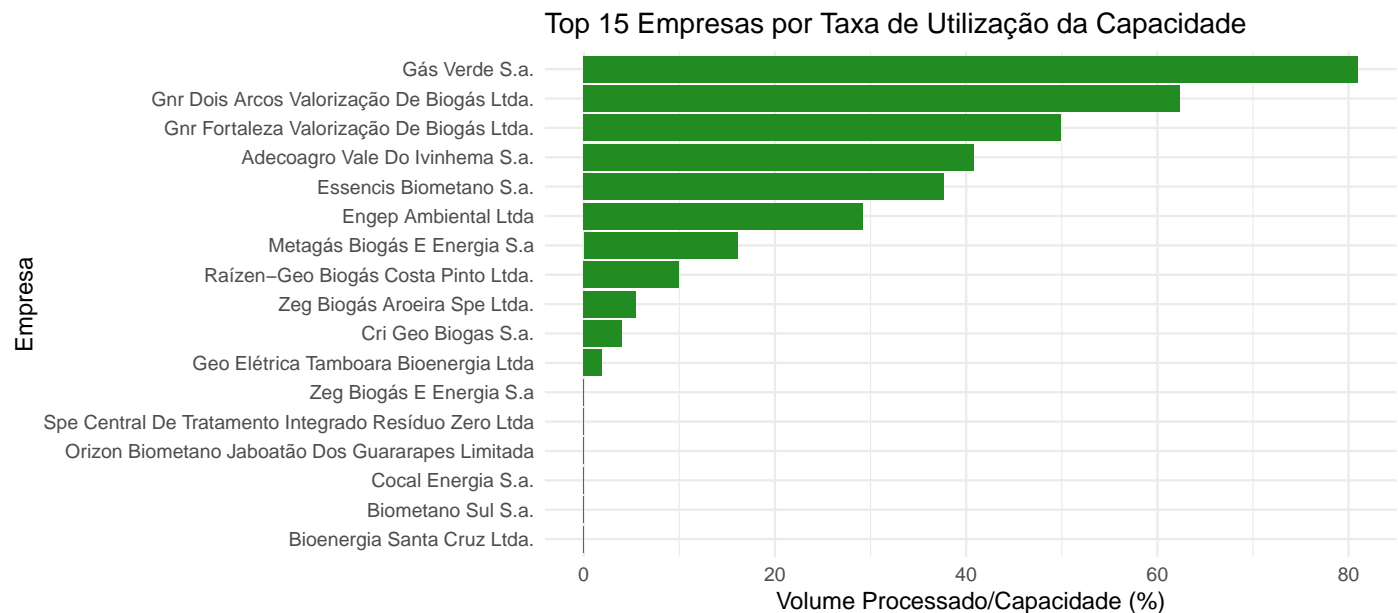
Este gráfico de dispersão correlaciona a capacidade de processamento de biogás (m^3/dia no eixo X) com o volume processado (m^3/dia no eixo Y). Observamos que, para capacidades de processamento mais baixas (abaixo de $100.000 \text{ m}^3/\text{dia}$), há uma tendência do volume processado se aproximar da capacidade.

3.5.2 Taxa de Utilização da Capacidade por Região



Observamos que a taxa de utilização varia entre as regiões, com nenhuma delas atingindo níveis muito altos. Não há uma região que se destaque significativamente como tendo uma utilização plena, o que sugere um desafio sistêmico na otimização da capacidade. A subutilização da capacidade de biogás não é um problema isolado de uma região, mas uma tendência geral no país. Isso pode indicar desafios comuns, como a gestão da matéria-prima, questões regulatórias ou custos operacionais.

3.5.3 Top 15 Empresas por Taxa média de Utilização da Capacidade



Este gráfico de barras horizontais lista as 15 principais empresas por taxa de utilização da capacidade de biogás (medida como Volume Processado/Capacidade em %). Empresas como Gás Verde S.A., GNR Dois Arcos e GNR Fortaleza se destacam com as maiores taxas, superando 60 e 80% . Se interpretarmos como um índice de eficiência, os valores elevados indicariam um desempenho excepcional.

3.5.4 Biogás: Produção, Utilização e o Desafio da Subutilização

O biogás é uma mistura gasosa, predominantemente composta por metano (CH_4 , 50-75%) e dióxido de carbono (CO_2 , 25-50%), com traços de outros gases. Sua produção ocorre por meio da digestão anaeróbia de biomassa orgânica em ambientes fechados, os biodigestores, sem a presença de oxigênio. Esta matéria-prima pode ser de origem agrícola, pecuária, efluentes industriais ou lixo urbano.

A utilização do biogás é bastante versátil. Ele pode ser empregado diretamente para a geração de energia elétrica e calor por meio de motogeradores ou turbinas, em um processo conhecido como cogeração, que otimiza o uso energético. Além disso, após um processo de purificação (upgrading) que remove o CO_2 e outros contaminantes, o biogás pode ser transformado em biometano, um combustível com características físico-químicas semelhantes ao gás natural, apto para ser usado em veículos adaptados ou injetado na rede de gasodutos existente.

Entre as vantagens do biogás, destacamos sua função como uma solução para o gerenciamento de resíduos orgânicos, a capacidade de gerar energia de forma descentralizada, a redução de odores e patógenos, e a produção de fertilizantes orgânicos (o digestato), que pode ser utilizado na agricultura. No entanto, o setor enfrenta desafios importantes, como a variabilidade da composição do biogás, que exige tratamento, a sensibilidade dos biodigestores a flutuações, os custos de capital para a instalação de usinas e a necessidade de escala para garantir a viabilidade econômica.

Analisando os dados de capacidade e utilização no Brasil, observamos um cenário complexo. A relação entre a capacidade de processamento de biogás e o volume processado revela que, para capacidades de processamento mais baixas (abaixo de 100.000 m^3/dia), o volume processado tende a se aproximar da capacidade instalada. Contudo, para capacidades maiores, notamos uma dispersão considerável, indicando que o volume processado é, em muitos casos, significativamente inferior à capacidade autorizada.

A distribuição da taxa de utilização da capacidade confirma essa tendência, mostrando um pico de frequência em taxas de utilização mais baixas. Isso nos leva a concluir que um grande número de instalações opera com uma parcela considerável de sua capacidade ociosa. A frequência diminui à medida que a taxa de utilização se aproxima de 100%, o que reforça que a subutilização da capacidade é um problema disseminado no setor de biogás.

Quando segmentamos a taxa de utilização da capacidade por região, percebemos que não há uma região que se destaque por atingir níveis muito altos de aproveitamento. Embora a taxa varie entre as regiões (Centro-Oeste, Nordeste, Sudeste, Sul), nenhuma delas demonstra uma utilização plena ou um nível de eficiência significativamente superior. Isso sugere que a subutilização da capacidade de biogás não é um problema isolado de uma localidade específica, mas sim uma tendência geral no país, indicando desafios sistêmicos que podem estar relacionados à gestão da matéria-prima, questões regulatórias ou custos operacionais.

Apesar desse quadro de subutilização geral, algumas empresas se destacam por suas taxas médias de utilização da capacidade. Entre as 15 principais empresas, Gás Verde S.A., GNR Dois Arcos Valorização de Biogás Ltda. e GNR Fortaleza Valorização de Biogás Ltda. apresentaram as maiores taxas,

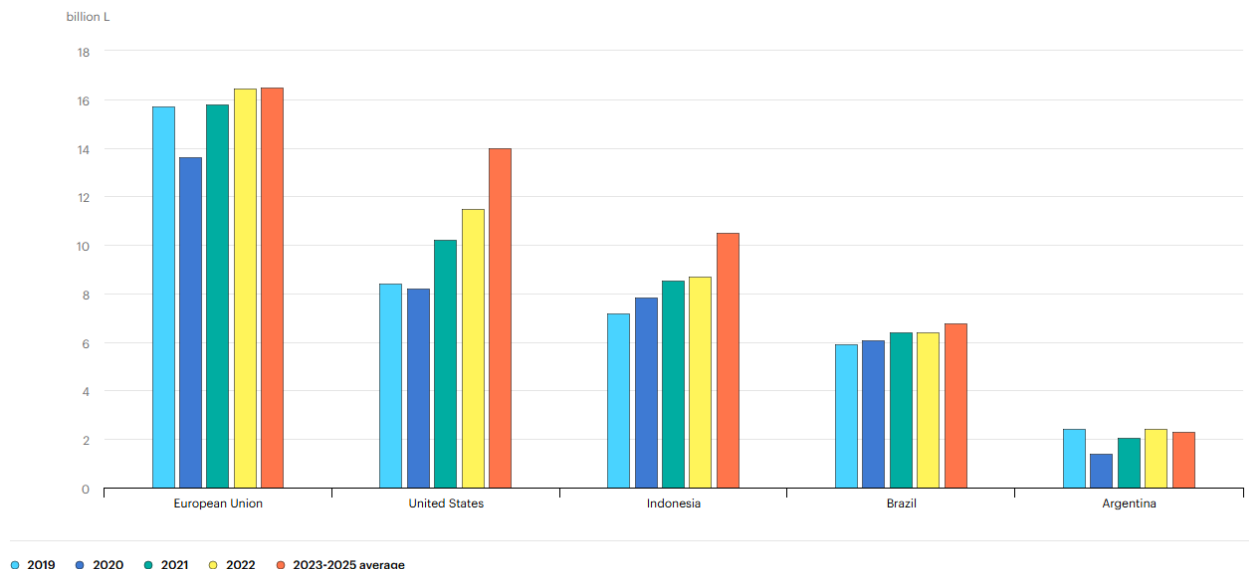
superando 60% e, em alguns casos, atingindo mais de 80%. Esses resultados podem ser interpretados como indicadores de um desempenho operacional excepcional por parte dessas companhias, que conseguem otimizar o uso de sua infraestrutura.

Em resumo, o biogás representa uma valiosa fonte de energia renovável com múltiplos benefícios ambientais e econômicos, mas o pleno aproveitamento de seu potencial no Brasil ainda depende da superação dos desafios relacionados à utilização eficiente da capacidade instalada e à otimização da gestão de resíduos e processos.

3.6 HVO (Óleo Vegetal Hidrogenado)

- **Processo de produção:** O HVO, também conhecido como diesel renovável ou “diesel verde”, é produzido por hidrotratamento de óleos vegetais ou gorduras animais. Neste processo, os triglicerídeos e ácidos graxos livres são convertidos em hidrocarbonetos parafínicos por hidrogenação e desoxigenação catalítica, resultando em um produto quimicamente idêntico ao diesel fóssil, mas de origem renovável.
- **Características:** Quimicamente idêntico ao diesel fóssil, o HVO possui alta qualidade, incluindo um alto número de cetano (superior ao diesel fóssil e ao biodiesel FAME), baixo teor de aromáticos e enxofre, e excelentes propriedades em baixas temperaturas.
- **Vantagens em relação a outros biocombustíveis:**
 - Pode ser usado 100% puro em motores diesel existentes sem necessidade de modificações ou misturas.
 - Qualidade superior ao biodiesel FAME (ésteres metílicos de ácidos graxos), especialmente em termos de estabilidade oxidativa e desempenho a frio.
 - Redução significativa de GEE e outras emissões poluentes.
 - Pode ser produzido a partir de uma ampla gama de matérias-primas, incluindo óleos residuais.
- **Aplicações:** Veículos pesados, ferroviário, marítimo, e em frotas cativas ou locais onde a infraestrutura de carregamento de veículos elétricos é inviável. Também utilizado como componente de mistura premium para melhorar a qualidade do diesel fóssil.
- **Desafios:** Custo de produção relativamente elevado, disponibilidade de matéria-prima sustentável e pressão sobre os recursos hídricos e terrestres.

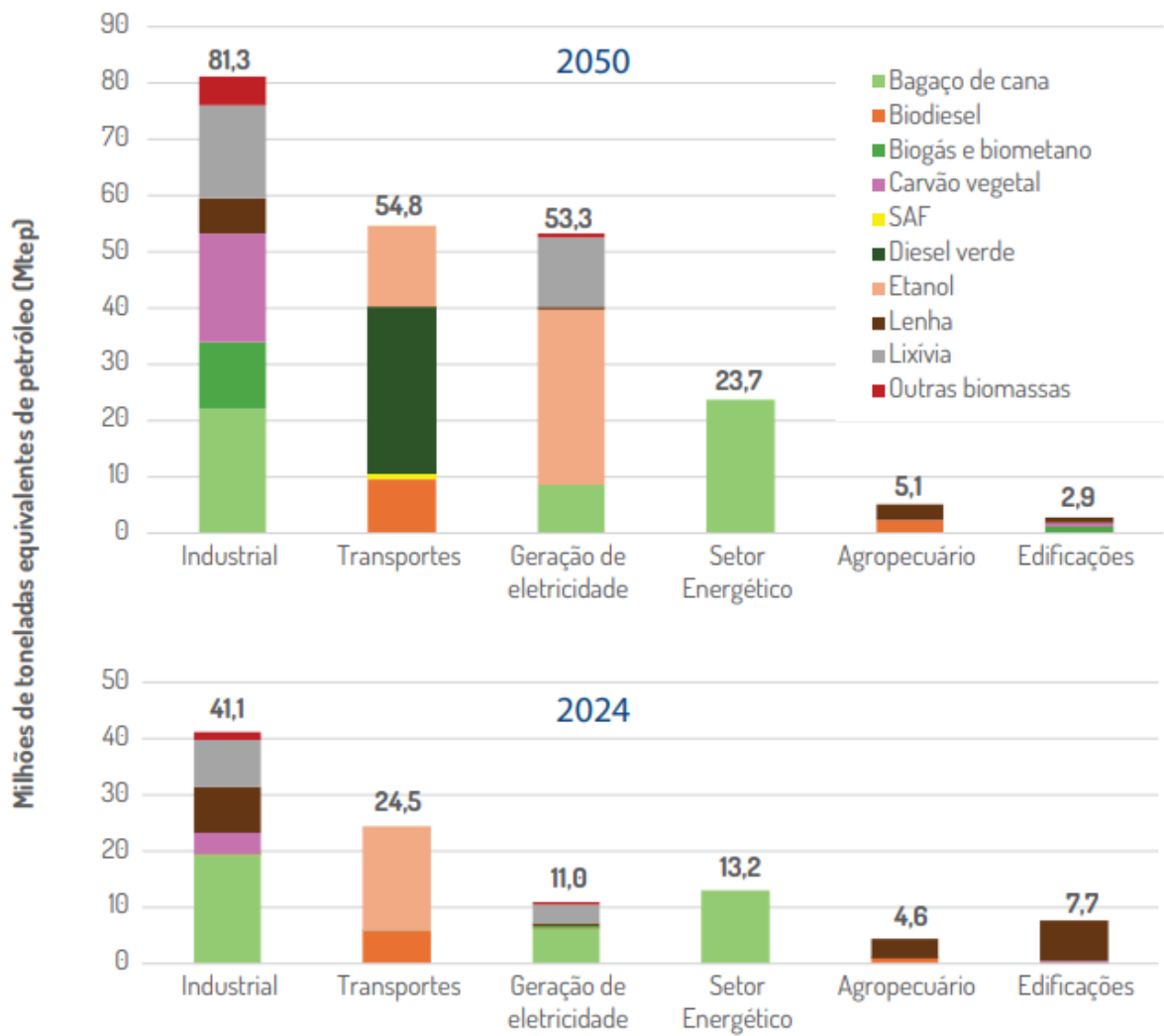
3.6.1 Panorama da produção de biodiesel e HVO nos principais mercados globais, 2019-2025



Fonte: International Energy Agency (IEA), disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/biodiesel-and-hvo-production-overview-for-key-global-markets-2019-2025>”

O gráfico compara a produção de biodiesel e HVO entre 2019 e 2025 em cinco mercados globais. A União Europeia aparece como maior produtora, mantendo volumes elevados e estáveis ao longo dos anos. Os Estados Unidos mostram o crescimento mais acelerado. A Indonésia também se destaca com aumento contínuo, apoiada por mandatos elevados de mistura de biodiesel. O Brasil apresenta crescimento moderado, com produção relativamente estável e dependente da política de mistura obrigatória. Já a Argentina mantém os menores volumes entre os países analisados, com pouca variação no período.

3.6.2 Demanda de biocombustíveis por setor para os anos de 2024 (valor histórico) e 2050 (projeção)



Fonte: Balanço Energético Nacional (EPE, 2025b) e Futuro da Energia (OC, 2024b), disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2025/10/Final-relatorio-biocombustiveis-out-2025.pdf>

O gráfico mostra que o diesel verde ainda tem participação muito pequena em 2024, praticamente inexistente nos principais setores(industrial, transportes, eletricidade, energético, agropecuário e edificações). Isso reflete o estágio inicial da produção e uso do HVO no Brasil, marcado por limitações tecnológicas, custo elevado e ausência de políticas específicas de grande escala.

Para 2050, porém, a projeção indica uma expansão significativa do diesel verde, principalmente no setor de transportes, onde passa a compor uma fração visível da demanda de biocombustíveis.

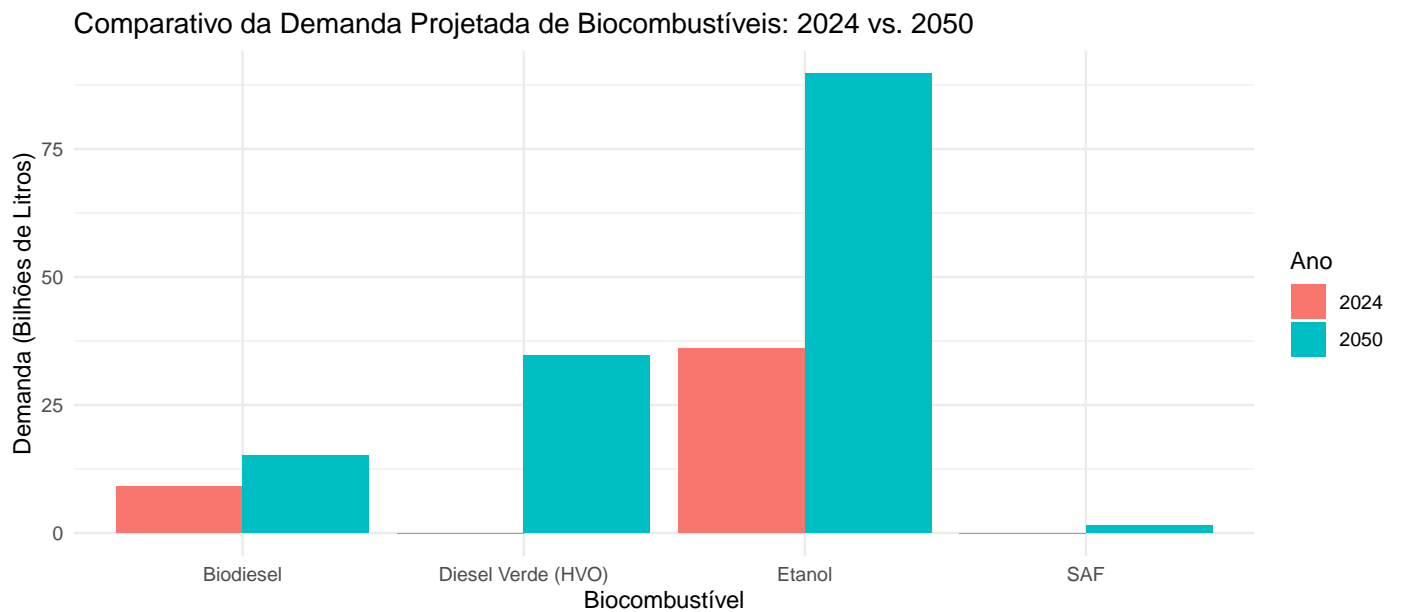
Em resumo, o gráfico aponta que o diesel verde deixará de ser marginal e se tornará um componente relevante da matriz bioenergética até 2050, impulsionado por políticas climáticas, metas de redução de emissões e maturação da infraestrutura de produção.

3.6.3 Demanda de bioenergia em unidades comerciais para os anos de 2024 (valor histórico), 2035, 2045 e 2050 (projeção)

	2024	2035	2045	2050	Demanda adicional (2050 em relação a 2024)
Bilhões de litros					
Biodiesel	9,0	13,8	14,9	15,2	6,2
Etanol	36,0	72,6	84,0	89,7	53,8
Diesel verde	0,0	3,5	20,8	34,6	34,6
SAF	0,0	0,4	1,0	1,4	1,4
Milhões de toneladas					
Bagaço de cana	182,6	256,6	256,5	255,8	73,2
Carvão vegetal	6,4	18,3	26,8	30,8	24,5
Lenha	63,0	42,7	36,2	33,7	-29,3
Lixívia	40,0	63,3	88,0	100,9	60,9

Fonte: Balanço Energético Nacional (EPE, 2025b) e Futuro da Energia (OC, 2024b), disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2025/10/Final-relatorio-biocombustiveis-out-2025.pdf>

Essa tabela traz a demanda projetada no Futuro da Energia (OC, 2024b) para cada um dos biocombustíveis que serão considerados na análise de sensibilidade do total de áreas de culturas energéticas necessárias para fabricá-los.



A tabela e o gráfico apresentam a evolução da demanda de bioenergia em unidades comerciais para os anos de 2024, 2035, 2045 e 2050, além da demanda adicional projetada para 2050 em relação a

2024. Ela mostra um crescimento expressivo de quase todos os biocombustíveis, com destaque para aqueles usados na descarbonização do transporte. O etanol mais que dobra sua demanda até 2050, enquanto o biodiesel cresce de forma moderada. Já o diesel verde (HVO) apresenta a expansão mais intensa: parte de praticamente zero em 2024 e chega a 34,6 bilhões de litros em 2050, tornando-se um dos vetores centrais da transição energética, seguido pela expansão do SAF, embora em menor escala. Entre as biomassas sólidas, observa-se aumento significativo da demanda por bagaço de cana, carvão vegetal e lixo, enquanto a lenha é a única fonte que apresenta redução, refletindo sua substituição por alternativas mais modernas e eficientes. No conjunto, a tabela evidencia uma forte mudança estrutural na matriz bioenergética, com crescimento expressivo dos biocombustíveis avançados e queda das fontes tradicionais.

3.6.4 Rotas tecnológicas certificadas e autorizadas pela ANP para a produção de diesel verde e/ou combustível de aviação com conteúdo renovável

Rota de produção	Produção permitida pela ANP	Matéria-prima	Mistura máxima no combustível final (aviação)
HEFA	Diesel Verde (HVO) e SAF	Óleos e gorduras	50% *
FT	Diesel Verde e SAF	Resíduos agrícolas e florestais, madeira, e resíduos sólidos	50%
A-FT	SAF	Resíduos agrícolas e florestais, madeira, e resíduos sólidos	50%
ATJ	Diesel Verde e SAF	Matérias-primas renováveis (cana-de-açúcar, milho ou resíduos florestais)	50%
SIP	Diesel Verde e SAF	Açúcares	10%
CHJ	Diesel Verde e SAF	Óleos e gorduras	50%
{Coprocesso- mento com petróleo}	SAF **	Óleos e gorduras, hidrocarbonetos de FT	5%

* Nota 1: A mistura máxima da rota HEFA é de 10% no caso de hidrocarbonetos produzidos pela microalga *Botryococcus braunii*.

** Nota 2: O coprocessamento de óleos vegetais e gorduras animais com matéria-prima fóssil para a produção de diesel também é possível, mas resulta em um produto diferente do Diesel Verde, como especificado na seção “Diesel coprocessado com óleos vegetais (Diesel C)”.

Fonte: ANP (2021c, 2021b) [link]https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-904/NT-EPE-DPG-SDB-2025-06_An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura_Ano%20base%202024.pdf

A tabela resume as rotas tecnológicas reconhecidas e autorizadas pela ANP para produzir diesel verde (HVO) e combustível de aviação sustentável (SAF) no Brasil, destacando quais matérias-primas podem ser usadas e os limites de mistura do SAF no combustível final. As rotas HEFA, CHJ e parte do

coprocessamento utilizam óleos e gorduras, sendo hoje as mais consolidadas comercialmente. Já as rotas FT e A-FT permitem o uso de resíduos agrícolas, florestais e sólidos, ampliando significativamente o potencial de matérias-primas e fortalecendo a economia circular. A rota ATJ, derivada de açúcares ou etanol, conecta o setor sucroenergético à produção de SAF e diesel verde. Em relação à mistura no combustível de aviação, a maioria das rotas permite até 50%, exceto SIP (10%) e o coprocessamento com petróleo (5%), refletindo limitações técnicas e certificadoras. No conjunto, a tabela mostra que o Brasil já dispõe de um portfólio amplo de rotas renováveis, com diferentes matérias-primas e graus de maturidade, possibilitando uma expansão diversificada da produção de diesel verde e SAF.

3.6.5 HVO (Óleo Vegetal Hidrogenado) - Diesel Verde: A Matriz Energética do Futuro

O HVO, ou diesel verde, emerge como um biocombustível com um papel cada vez mais estratégico na transição energética, especialmente para o setor de transportes. Os dados e projeções que analisamos enfatizam sua ascensão de uma participação quase marginal para um componente central da matriz bioenergética.

No panorama da produção global de biodiesel e HVO entre 2019 e 2025, observamos que a União Europeia é a maior produtora, mantendo volumes elevados e estáveis. Os Estados Unidos, por sua vez, demonstram o crescimento mais acelerado nesse período. A Indonésia também se destaca com um aumento contínuo, impulsionado por mandatos de mistura de biodiesel. O Brasil apresenta um crescimento moderado e uma produção relativamente estável, que está intrinsecamente ligada à política de mistura obrigatória. Já a Argentina, entre os países analisados, mantém os menores volumes e pouca variação no período.

Quando observamos a demanda de biocombustíveis por setor para 2024 e a projeção para 2050, percebemos que o diesel verde tem uma participação muito pequena em 2024, sendo praticamente inexistente nos principais setores como o industrial, transportes, eletricidade, energético, agropecuário e edificações. Esse cenário reflete o estágio inicial de produção e uso do HVO no Brasil, marcado por limitações tecnológicas, custos elevados e a ausência de políticas específicas de grande escala. No entanto, a projeção para 2050 é dramaticamente diferente. Indica uma expansão significativa do diesel verde, principalmente no setor de transportes, onde ele passa a compor uma fração visível da demanda de biocombustíveis. Essa transformação sugere que o HVO deixará de ser marginal para se tornar um vetor central da transição energética, impulsionado por políticas climáticas, metas de redução de emissões e a maturação da infraestrutura de produção.

Ao compararmos a demanda projetada de biocombustíveis entre 2024 e 2050, a tabela e o gráfico ilustram o crescimento expressivo de quase todos os biocombustíveis, com destaque para aqueles voltados à descarbonização do transporte. O etanol, por exemplo, mais que dobra sua demanda até 2050, e o biodiesel cresce de forma moderada. Contudo, o diesel verde (HVO) parte de praticamente zero em 2024 e projeta alcançar 34,6 bilhões de litros em 2050. Esse crescimento o posiciona como um dos vetores centrais da transição energética, superando a expansão do SAF, embora em menor escala.

Por fim, as rotas tecnológicas certificadas e autorizadas pela ANP para a produção de diesel verde (HVO) e combustível de aviação com conteúdo renovável (SAF) mostram que o Brasil já dispõe de um portfólio amplo. Rotas como HEFA, CHJ e o coprocessamento utilizam óleos e gorduras, sendo as mais consolidadas comercialmente. Já as rotas FT e A-FT permitem o uso de resíduos agrícolas, florestais e sólidos, o que expande significativamente o potencial de matérias-primas e fortalece a economia circular. A rota ATJ, derivada de açúcares ou etanol, conecta o setor sucroenergético à produção de SAF e diesel verde. Em relação à mistura no combustível de aviação, a maioria das rotas permite até 50%,

com algumas exceções como SIP (10%) e o coprocessamento com petróleo (5%), refletindo limitações técnicas e certificadoras. Esse conjunto de informações sugere que o país possui a base tecnológica para uma expansão diversificada da produção de diesel verde e SAF.