

# COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO NO BRASIL

Sustainable Aviation Fuel – SAF

## Perspectivas Futuras

Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis

Diretoria de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Setembro 2024



MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA



Imagem



# Avisos

Esta publicação contém informações acerca da oferta de combustível sustentável de aviação (SAF) a partir de diferentes rotas tecnológicas, de acordo com estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Este documento possui caráter informativo, sendo destinado a subsidiar o planejamento do setor energético nacional. Logo, quaisquer decisões de encaminhamento (como formulação de políticas públicas, definição de diretrizes estratégicas, decisões de investimento ou de estratégias de negócio) dependem de outras instituições públicas e privadas.

A EPE se exime de qualquer responsabilidade por quaisquer ações e tomadas de decisão que possam ser realizadas por agentes econômicos ou qualquer pessoa com base nas informações contidas neste documento.

# Valor público

A EPE realiza estudos e pesquisas para subsidiar a formulação, implementação e avaliação da política e do planejamento energético brasileiro.

Com este estudo, a EPE traz transparência e reduz a assimetria de informação por meio da apresentação de dados e fatos que podem auxiliar os debates acerca dos esforços de transição energética no Brasil.

Neste caderno a EPE analisa os condicionantes de mercado, políticas públicas e acordos internacionais relacionados aos combustíveis sustentáveis de aviação, realizando trajetórias para a evolução de demanda deste biocombustível, favorecendo a tomada de decisão dos agentes interessados.



# Índice

Clique nos ícones e navegue pelo conteúdo



Contextualização ..... 5



Combustíveis Sustentáveis de Aviação..... 6



Histórico e legislação..... 7



Rotas tecnológicas..... 14



Produção de SAF (Atual e futura)..... 25



Trajetórias para oferta de SAF..... 28



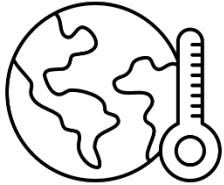
Considerações Finais..... 41



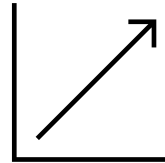
Referências..... 44



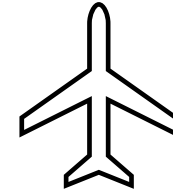
# Contextualização



As mudanças climáticas demandam ações globais de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE).  
O desafio é ainda maior para os setores de difícil descarbonização, como a aviação, que representou 2% das emissões globais em 2022.



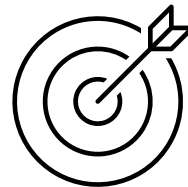
Estima-se que a demanda de querosene de aviação continuará crescendo e, consequentemente, as emissões de GEE, mesmo com melhorias na eficiência das aeronaves e ganhos sistêmicos.



Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) constituem uma das principais medidas para mitigar as emissões do setor.



O Brasil, com sua experiência na produção de biocombustíveis e disponibilidade de matérias-primas renováveis, pode assumir um papel de liderança no mercado de combustíveis renováveis e acelerar a transição para uma economia sustentável.



Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) definiu metas de redução de emissões para o setor e tem o objetivo de atingir emissões líquidas zero em 2050.

O Brasil também está elaborando um programa para o setor – o ProBioQAV.



A EPE elaborou este estudo para avaliar as possíveis trajetórias que o Brasil pode traçar na busca destes objetivos.

# O que é SAF ?

## Combustíveis Sustentáveis de Aviação

(*Sustainable Aviation Fuel* – SAF) são oriundos de recursos renováveis, tais como óleos vegetais, gordura animal, biomassa lignocelulósica, açúcares e amido, gases residuais, entre outros.

Por possuírem propriedades análogas ao querosene de aviação fóssil e compatíveis com a infraestrutura existente, os SAF são considerados *drop-in* nas condições de mistura estabelecidas pelos órgãos reguladores.

O uso do SAF contribui com a redução das emissões de CO<sub>2</sub> geradas pela aviação, um setor de difícil descarbonização.

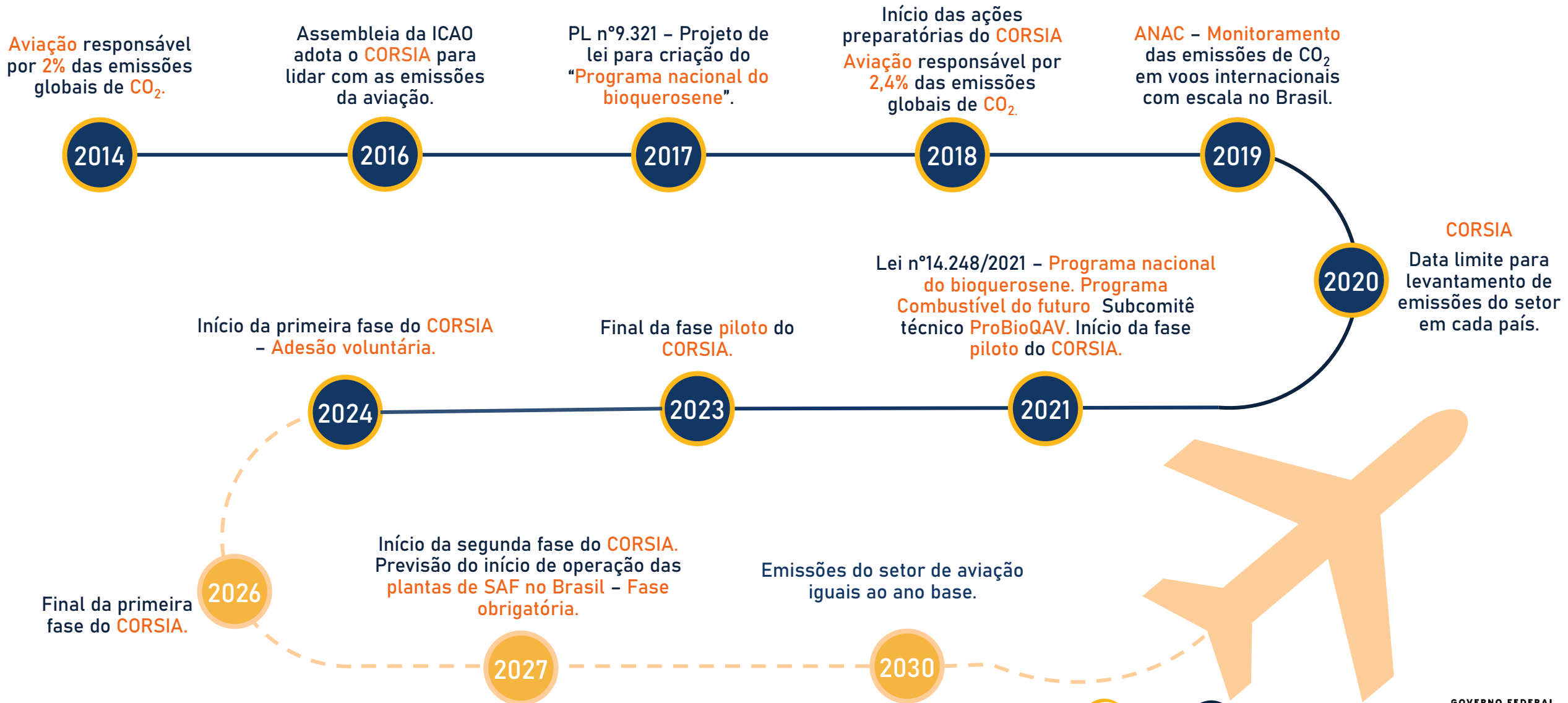




# Histórico e Legislação



# Histórico





# CORSIA



ICAO



CORSIA

(Carbon Offsetting and reduction scheme for international aviation)

## Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO)

- Esforços para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) da aviação.

## OBJETIVO ASPIRACIONAIS

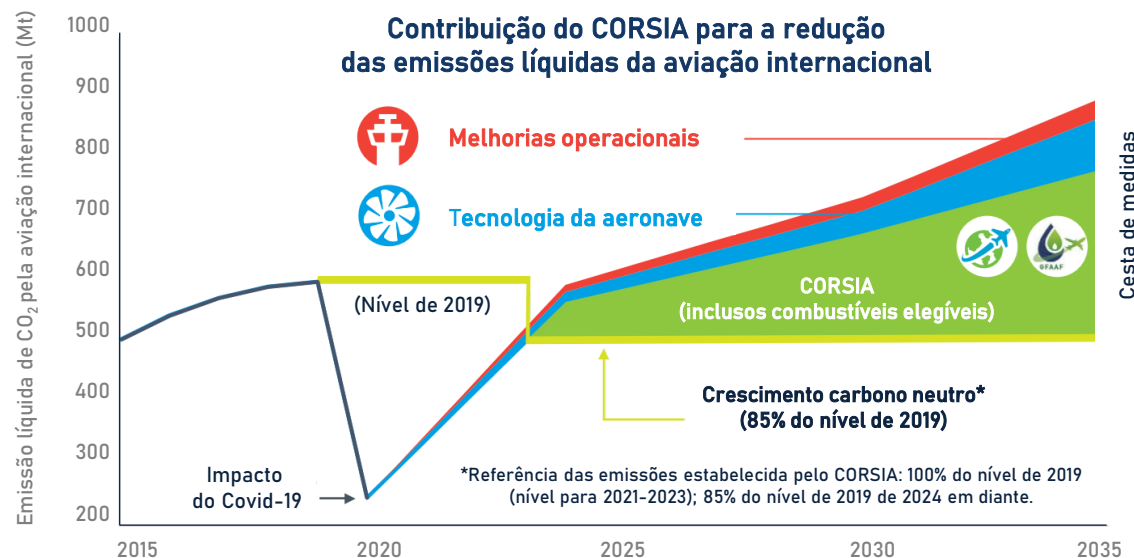
- Melhoria anual de 2% na eficiência energética até 2050;
- Crescimento carbono neutro a partir de 2020;
- Meta aspiracional de longo prazo de zerar emissões líquidas de carbono até 2050.

## MEDIDAS

- Melhorias tecnológicas e operacionais
- Uso de combustíveis sustentáveis de aviação
- CORSIA

## Esquema de compensação e redução de carbono para aviação internacional

- Mecanismo de mercado concebido para reduzir e compensar emissões de GEE da aviação internacional <sup>1</sup>



<sup>1</sup> Linha de base: 100% do nível de 2019 para 2021-2023 e 85% do nível de 2019 a partir de 2024, em função da pandemia de Covid-19 em 2020.

# CORSIA

## Como funciona o CORSIA?

O CORSIA foi dividido em três fases – duas fases iniciais voluntárias (2021-2023 e 2024-2026) e uma fase obrigatória que ocorrerá a partir de 2027.

### FASES INICIAIS

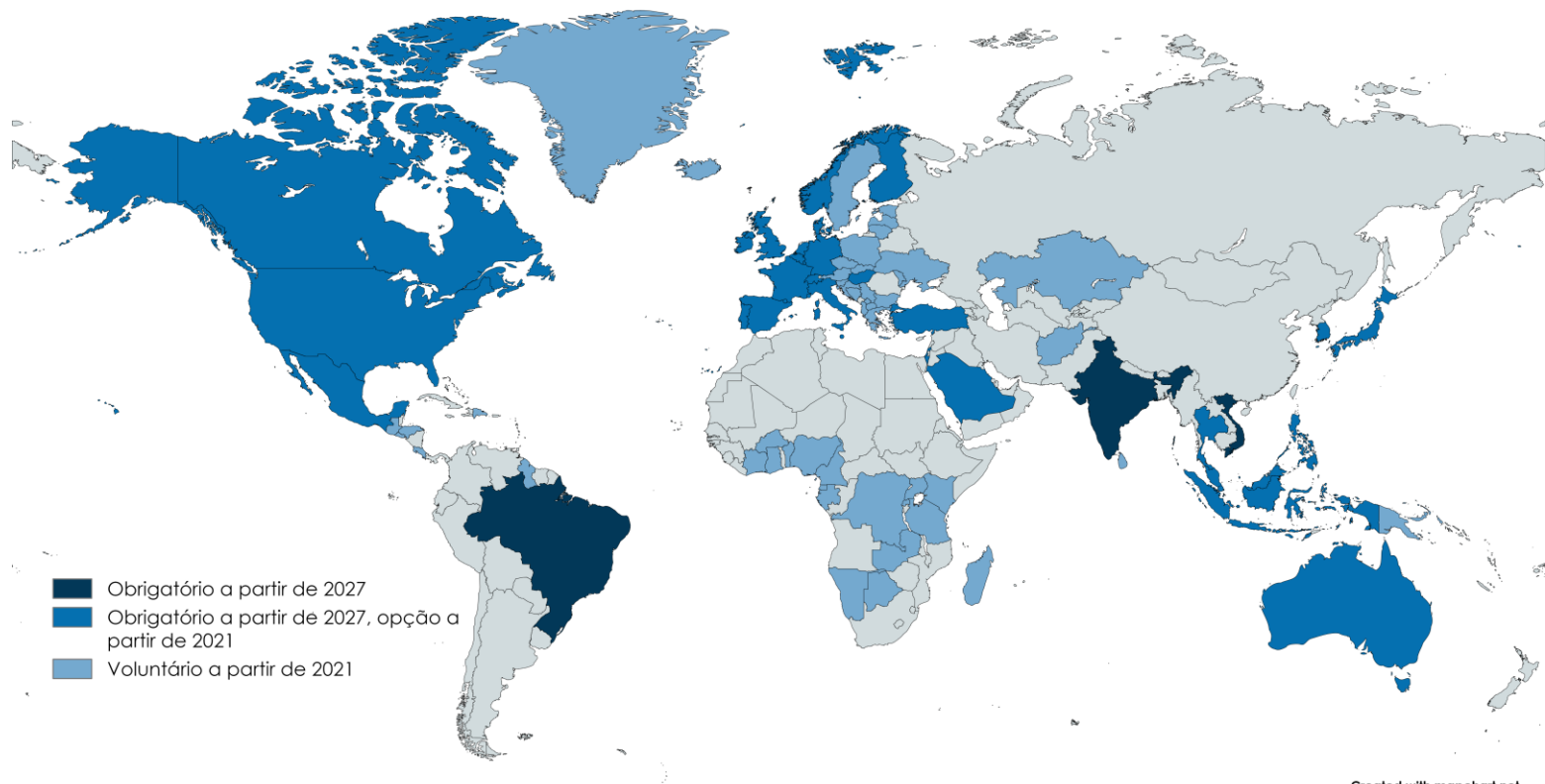
Aplicada apenas a voos internacionais entre países que se voluntariaram, o que significa que voos internacionais de e para países que não se voluntariaram estarão isentos.

### FASE OBRIGATÓRIA

Abrangerá todos os voos internacionais (incluindo aqueles que viajam de ou para países que não se voluntariaram para as fases iniciais). Todavia, haverá algumas pequenas exceções:

- Países menos desenvolvidos. No entanto, esses países podem se voluntariar se desejarem.
- Países que têm uma parcela muito pequena do tráfego internacional.

## Países participantes do CORSIA (2023)



Created with mapchart.net

# Outras iniciativas de SAF no mundo\*



## Reino Unido

Política pública em fase de construção com o objetivo de introduzir metas a partir de 2025 e atingir pelo menos 10% de utilização de SAF até 2030.



## Holanda

Roadmap de SAF em desenvolvimento com um mandato a nível nacional ou da união Europeia.



## Alemanha

Planeja introduzir um mandato de SAF em 2026 com foco na rota *Power to Liquids* (PtL).



## Noruega

Em 2020 introduziu o mandato de SAF de 0,5% com a ambição de aumentar para 30% em 2030.



## Estados Unidos

Objetivo de ampliar a produção de SAF em, pelo menos, 3 bilhões de litros por ano até 2030.



## França

Definiu *Roadmap* de SAF com objetivos de consumo de 2% até 2025, 5% até 2030 e 50% em 2050.



## Espanha

Objetivo de fornecimento de 2% de SAF em 2025. Novas biorrefinarias em planejamento, com foco especial em resíduos.



## Suécia

Implementou mandato volumétrico de SAF de 1% em 2021, com o objetivo de atingir 30% em 2030.



## Finlândia

Intenção de implementar mandato de SAF de 30% até 2030.



## Coreia do Sul

Estabelecerá padrões de qualidade para SAF em 2024 e planeja iniciar mandato de mistura em 2026.

### Legenda

- Mandato de SAF em análise
- Mandato de SAF implementado



Credited with mapchat.net



MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA



\* Mapa ilustrativo e não exaustivo.  
Fonte: 3, 4, 5.

# Panorama nacional – Programa Combustível do Futuro



O **Programa Combustível do Futuro**, instituído em 2021 pelo CNPE, foi criado para propor medidas para incrementar a utilização de **combustíveis sustentáveis** em todos os modos de transporte, com vistas à **descarbonização** da matriz energética de transporte nacional e o incremento de **eficiência energética dos veículos**.

O **Comitê Técnico Combustível do Futuro** foi constituído com vistas a desenvolver o Programa por meio de subcomitês específicos para cada tema.

- Em 2023, o Programa deu origem ao [Projeto de Lei 4516/2023](#)<sup>1</sup> que visa:
  - Instituir o **Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação – ProBioQAV**;
  - Instituir o Programa Nacional de Diesel Verde – PNDV;
  - Alterar os limites máximo e mínimo do teor de mistura de etanol anidro à gasolina C;
  - Dispor sobre a regulamentação e fiscalização da produção e comercialização de combustíveis sintéticos;
  - Dispor sobre a regulamentação e fiscalização da Captura e Estocagem de Carbono (CCS);
  - Integrar políticas públicas de mobilidade e biocombustíveis – RenovaBio e Rota 2030, PBEV.

<sup>1</sup> Ainda em tramitação até a publicação deste documento. [8] Em 8 de outubro de 2024 houve a sanção do projeto de lei na Lei nº 14.993/2024.

Fonte: 6, 7, 8



# Panorama nacional – ProBioQAV



## OBJETIVO

Incentivo à pesquisa, à produção, à comercialização e ao uso energético do SAF na matriz energética brasileira.



## APLICAÇÃO

A partir de 2027, os operadores aéreos ficam obrigados a reduzir as emissões de GEE em suas operações domésticas por meio da utilização de SAF.



## CONTABILIZAÇÃO

Análise de Ciclo de Vida (ACV) do poço-à-roda de cada rota tecnológica de produção de SAF

## Percentual Anual Mínimo de Redução das Emissões de GEE

|      |     |
|------|-----|
| 2027 | 1%  |
| 2028 | 1%  |
| 2029 | 2%  |
| 2030 | 3%  |
| 2031 | 4%  |
| 2032 | 5%  |
| 2033 | 6%  |
| 2034 | 7%  |
| 2035 | 8%  |
| 2036 | 9%  |
| 2037 | 10% |

- Base de cálculo = volume de emissões das operações domésticas realizadas pela empresa aérea no ano correspondente, supondo utilização de combustível fóssil.
- Poderão ser admitidos meios alternativos para cumprimento da meta.
- CNPE poderá alterar os percentuais a qualquer tempo por motivo justificado de interesse público.

# Rotas tecnológicas

## Matérias-primas



# Rotas Tecnológicas | Autorizadas

Principais matérias-primas

Rotas tecnológicas aprovadas pela ASTM D7566 e ANP Res. 856/2021

Mistura máxima<sup>1</sup>

Triglicerídeos

Oleaginosas, algas, óleos e gorduras residuais

HEFA

Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados

50%

HC-HEFA

Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados

10%

CHJ

Querosene de hidrotermólise catalítica

50%

Biomassa lignocelulósica

Eucalipto, pinheiro, capim elefante, bagaço de cana

SPK-FT

Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch

50%

SPK-A

Querosene parafínico sintetizado com aromáticos

50%

SIP

Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados

10%

Açúcares e amidos

Cana-de-açúcar, milho, beterraba, mandioca

ATJ

Querosene parafínico sintetizado por álcool

50%

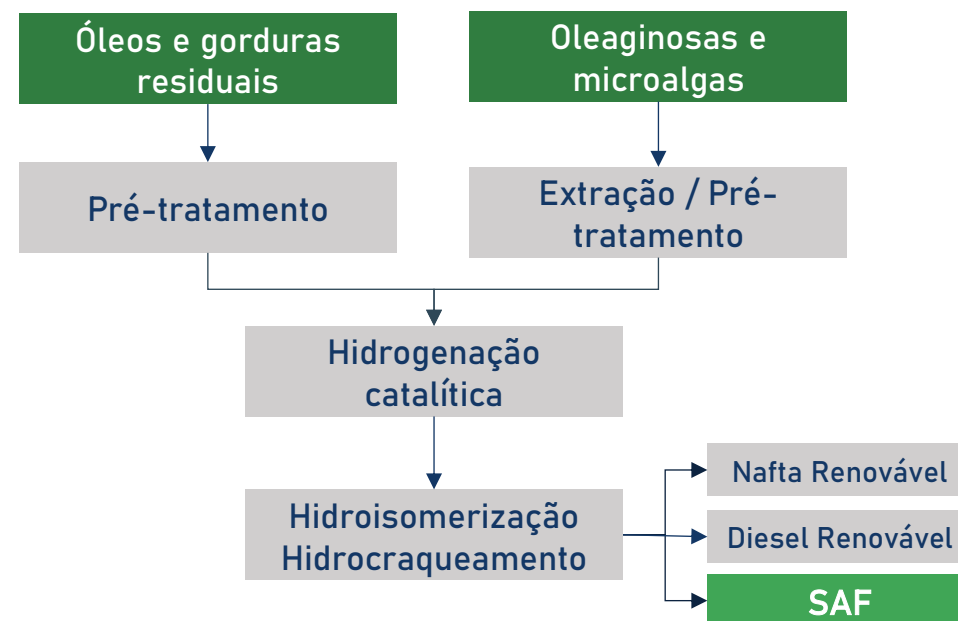
<sup>1</sup> Mistura máxima: percentual máximo permitido de mistura ao querosene de aviação em resolução ANP.

Fonte: 9, 10

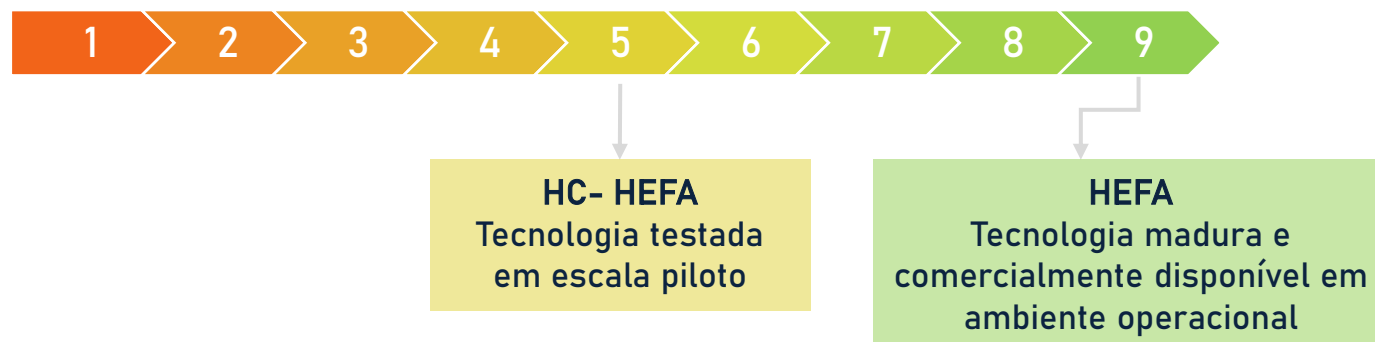
# Rotas Tecnológicas | HEFA e HC-HEFA

A produção de SAF pelas rotas HEFA e HC-HEFA consiste na conversão de triglicerídeos em cadeias de hidrocarbonetos renováveis através de reações que utilizam hidrogênio e catalisadores.

- A etapa de hidrogenação catalítica envolve os processos de hidroxidação, descarboxilação e descarbonilação, que visam remover insaturações, oxigênio e compostos indesejáveis dos óleos para elevar a densidade energética e estabilidade de armazenamento;
- As etapas de hidroisomerização e hidrocrackeamento buscam encurtar e ramificar as cadeias de hidrocarbonetos a fim de atender alguns dos critérios estabelecidos na ASTM, como o ponto de fluidez e propriedades de fluxo a frio.



## Nível de Prontidão Tecnológica (TRL)



A rota HC-HEFA é uma variação da HEFA que utiliza hidrocarbonetos bioderivados. Atualmente, apenas o óleo obtido da alga *Botryococcus braunii* é reconhecido nessa classificação. A rota HC-HEFA foi certificada pela ASTM D7566 em 2020 e seu percentual máximo de mistura é de 10%.

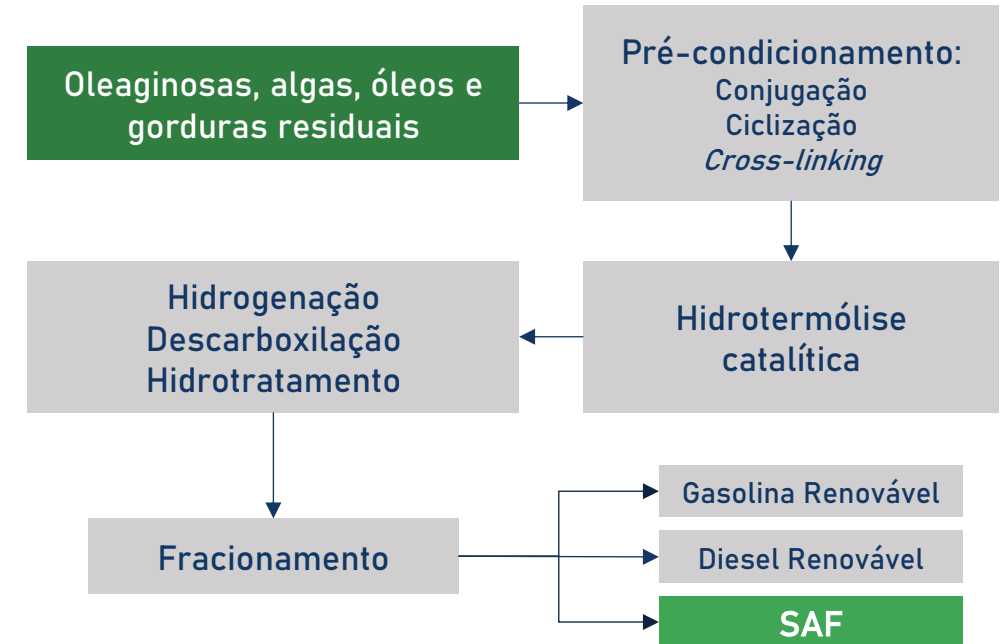




# Rotas Tecnológicas | CHJ

Na rota CHJ, a matéria-prima lipídica é submetida a uma etapa de pré-condicionamento, seguida pela hidrotermólise catalítica e uma etapa adicional de refino para originar o querosene sintético.

- A etapa de pré-condicionamento inclui reações de conjugação, ciclização e *cross-linking* para alterar a estrutura de ácidos graxos dos triglicerídeos e, com isso, melhorar a eficiência do processo;
- No reator hidrotérmico, o óleo pré-condicionado reage com água em condição supercrítica para converter os triglicerídeos em um mix de hidrocarbonetos por meio de reações de craqueamento, hidrólise, descarboxilação, desidratação, isomerização, recombinação e/ou aromatização;
- Por fim, o óleo é submetido ao hidrotratamento e fracionamento de produtos.



## Nível de Prontidão Tecnológica (TRL)



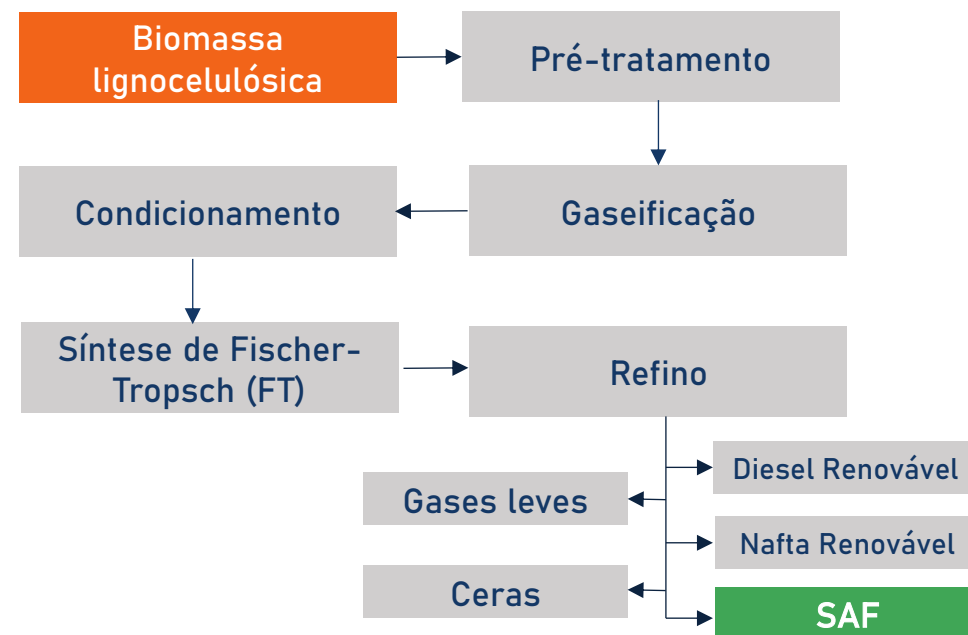
**CHJ**  
Tecnologia demonstrada  
em ambiente relevante

A rota CHJ utiliza as mesmas matérias-primas que a rota HEFA, porém aplica processos químicos distintos para adequá-las à faixa do querosene de aviação. As reações na rota CHJ consomem menos hidrogênio em comparação com HEFA, mas requerem maior pressão e temperatura para operar.

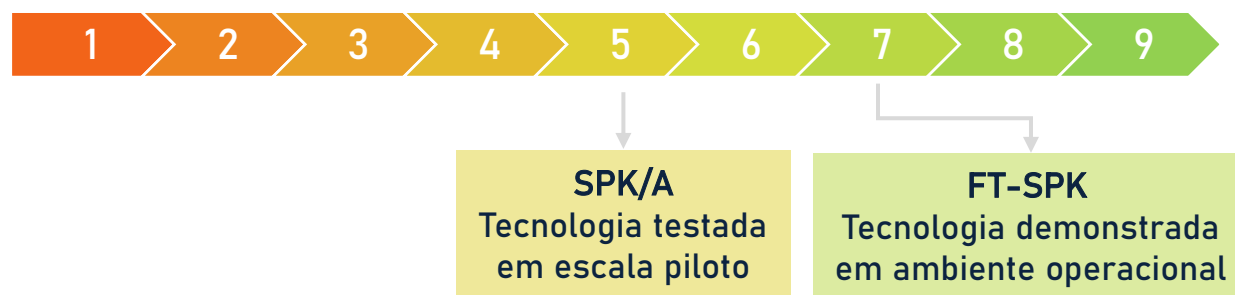
# Rotas Tecnológicas | SPK-FT e SPK/A

As rotas de obtenção SPK-FT e SPK/A envolvem conversão da biomassa vegetal em combustíveis, incluindo o SAF, tendo a síntese de Fischer-Tropsch (FT) como uma de suas etapas principais.

- Após pré-tratamento, a biomassa é submetida ao processo termoquímico de gaseificação com o objetivo de converter os materiais carbonosos em gás de síntese ( $\text{CO} + \text{H}_2$ );
- O gás de síntese é então aplicado à síntese FT que, através de suas reações, produz uma faixa de hidrocarbonetos com vários comprimentos de cadeia de carbono;
- A etapa adicional de processo – craqueamento, isomerização e fracionamento – visa aumentar o rendimento da fração de querosene e adequá-la às especificações técnicas desse produto.



## Nível de Prontidão Tecnológica (TRL)



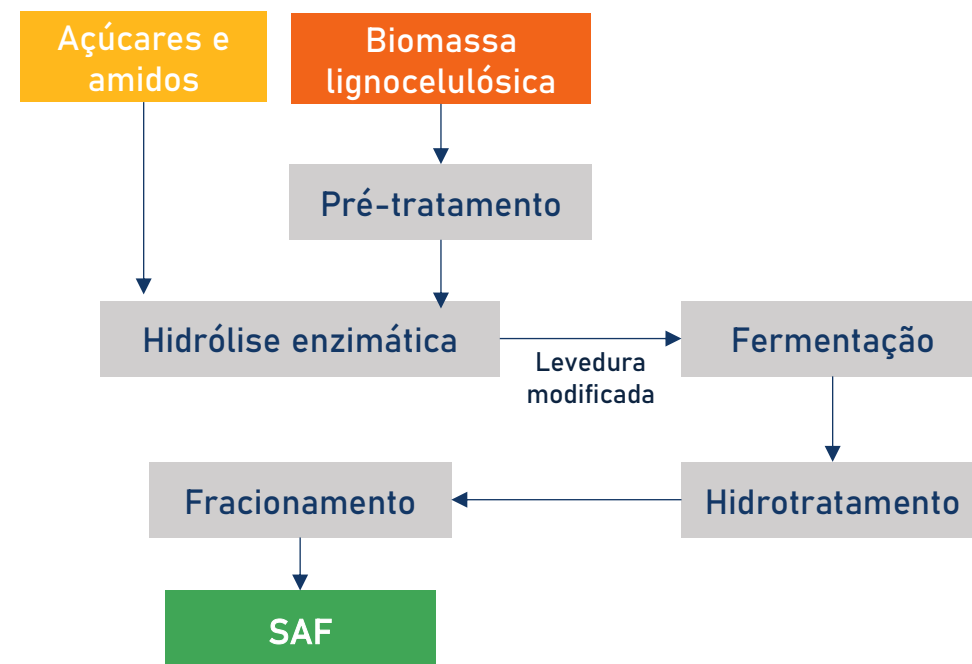
A rota de obtenção de SPK/A é uma variação do processo Fischer-Tropsch com adição de aromáticos, o que auxilia a prevenir vazamentos e deterioração das partes de borracha que vedam os motores, auxiliando a manter a pressão hidráulica. Assim como SPK-FT, seu percentual máximo de mistura é de 50%.



# Rotas Tecnológicas | SIP

A rota SIP ocorre a partir da fermentação de açúcares com uso de leveduras modificadas.

Esta rota bioquímica converte os açúcares em uma molécula de hidrocarboneto  $C_{15}H_{24}$  chamada farneseno que, após passar por um processo de hidrotratamento, produz o farnesano ( $C_{15}H_{32}$ ) um combustível cujo percentual máximo de mistura com o querosene fóssil é de 10%.



## Nível de Prontidão Tecnológica (TRL)



**SIP**  
Tecnologia entre protótipo e demonstração em ambiente operacional

Essa tecnologia é comercializada pela Amyris e Total utilizando cana-de-açúcar e uma cepa de *S. cerevisiae* no processo de fermentação para produzir farneseno.



# Rotas Tecnológicas | ATJ-SPK

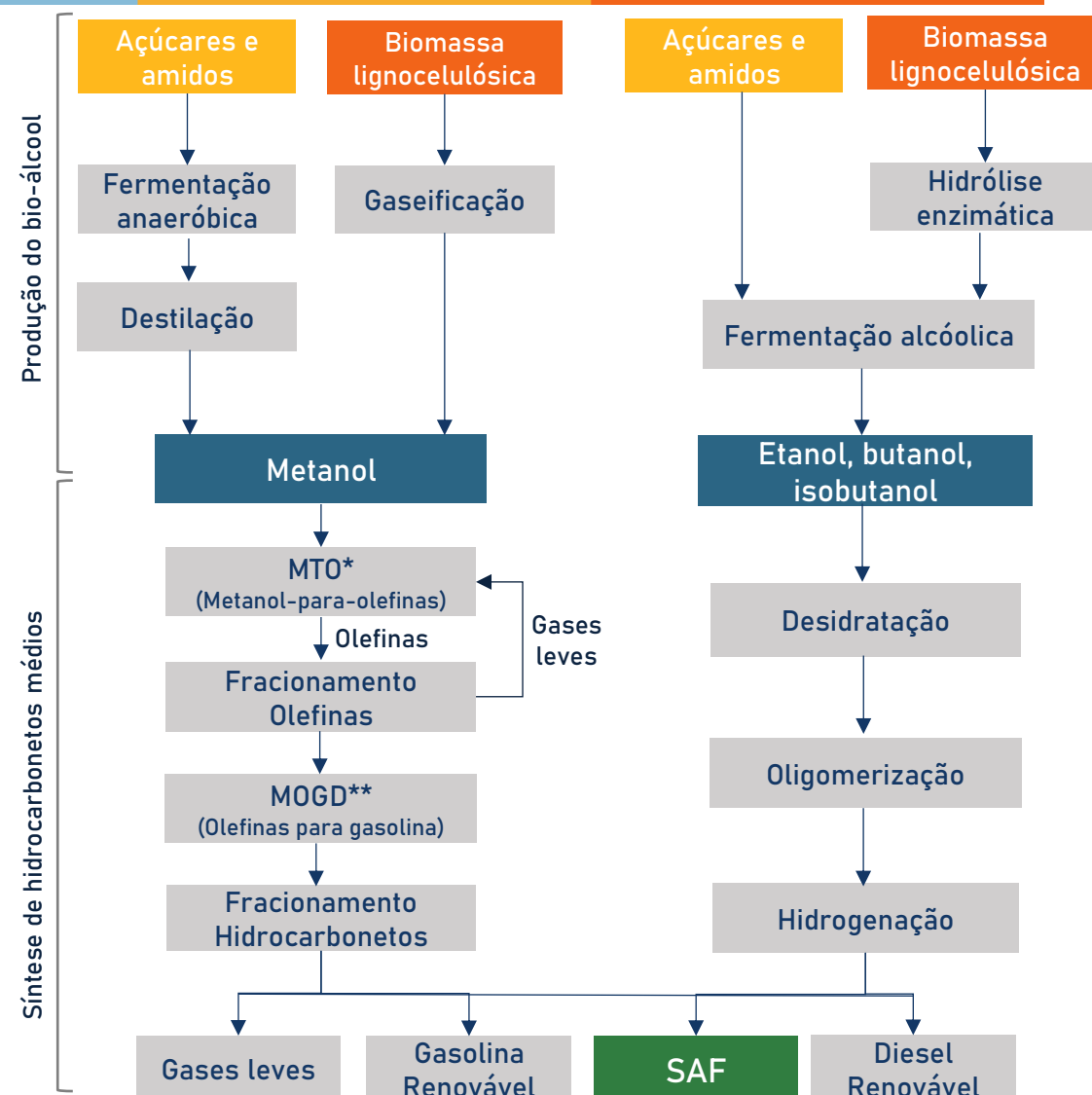
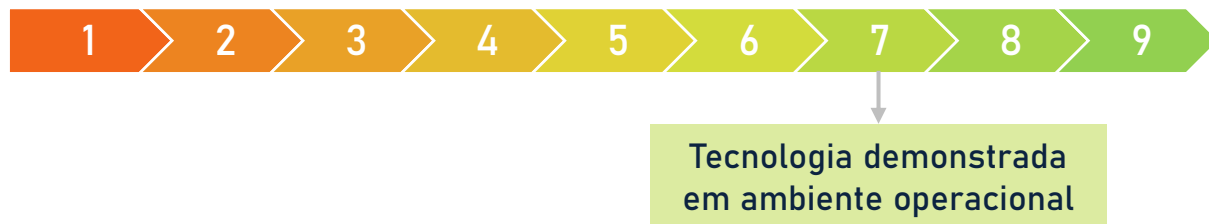
A rota ATJ pode ser dividida em duas etapas: produção do bio-álcool e síntese de hidrocarbonetos médios.

- A produção de bio-álcoois inclui desde rotas consolidadas, como a fermentação alcoólica, até alternativas mais inovadoras, como as rotas termoquímicas. Diferentes tipos de bio-álcoois vêm sendo considerados para a rota ATJ, como metanol, etanol, n-butanol e isobutanol.
- Na etapa de síntese ocorre a conversão de álcoois de cadeia curta em hidrocarbonetos de cadeia mais longa (C8-C16). Existem duas rotas principais para a obtenção do álcool nesse processo, a partir do metanol e dos álcoois superiores.

*\*MTO (Metanol-para-olefinas): Reator de leito fluidizado com catalisador. Há a formação de metano, parafinas C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>, olefinas C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> e gasolina C<sub>5</sub>-C<sub>11</sub>*

*\*\*MOGD (olefina-para-gasolina): Reator de leito fixo, na presença de catalisador.*

## Nível de Prontidão Tecnológica (TRL)



# Rotas Tecnológicas | Oportunidades e desafios



## Oportunidades

HEFA e  
HC-HEFA

- + Disponibilidade de matéria-prima em larga escala;
- + Baixo teor de enxofre e de compostos aromáticos, além de elevados valores de cetano.

CHJ

- + O processo pode usar matéria-prima úmida e ter alta eficiência energética devido às condições de reação suaves;
- + O pré-condicionamento da matéria-prima reduz o consumo de hidrogênio na etapa final de refino.

SPK-FT e  
SPK/A

- + Por ser isento de enxofre, o líquido FT causa menos poluição ao meio ambiente.

SIP

- + Não há necessidade de catalisadores químicos e reações em alta temperatura ou pressão.

ATJ

- + Utiliza como matéria-prima bio-álcoois cuja tecnologia de produção já está consolidada;
- + Ampla variedade de recursos disponíveis.



## Desafios

- Desafio logístico para utilizar óleos e gorduras residuais;
- Processo intensivo em hidrogênio.

- Elevado uso de água no processo.

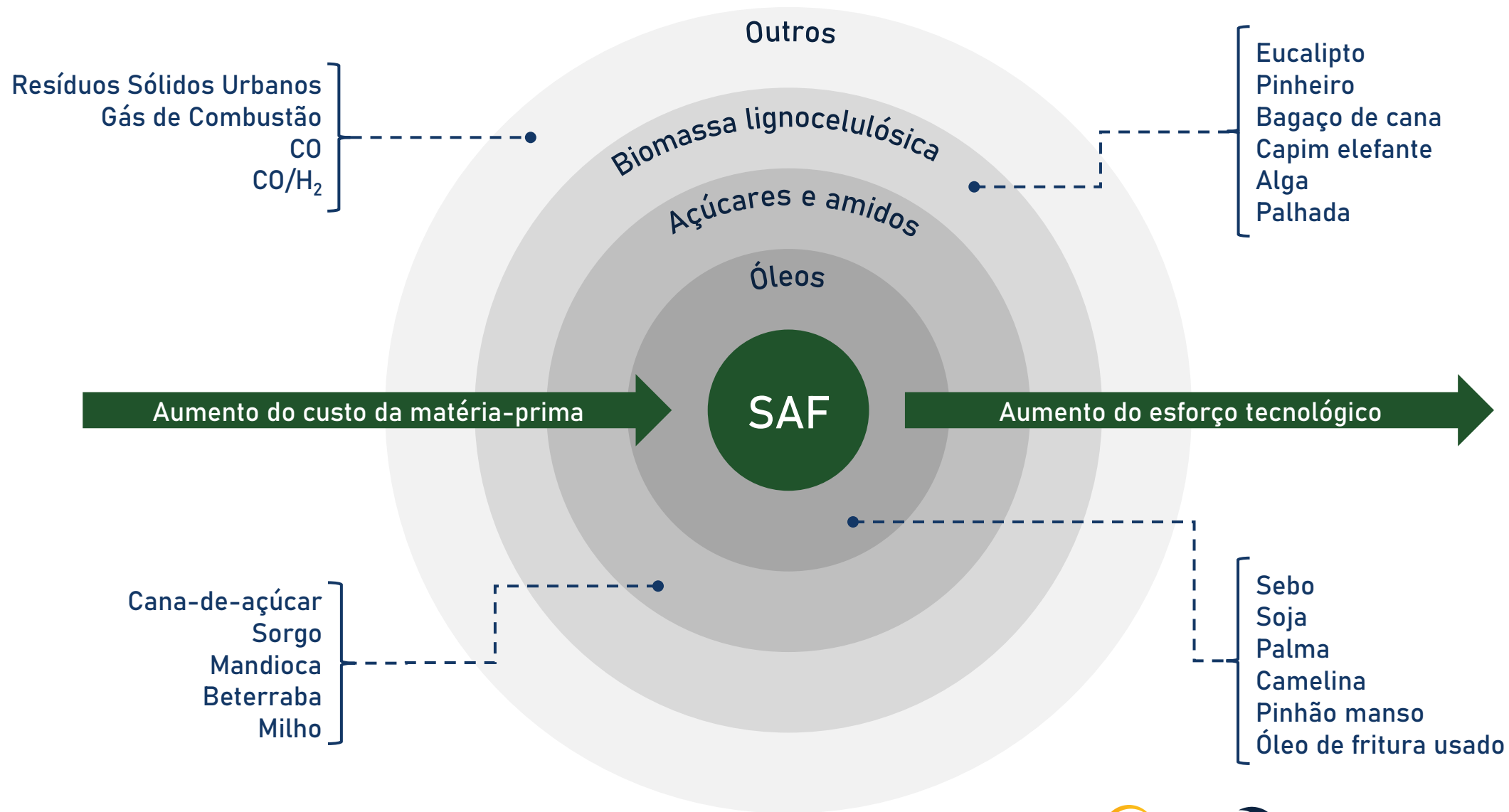
- Baixa viabilidade econômica nas escalas reduzidas para adequação na utilização de biomassa e resíduos;
- Necessidade de desenvolvimento de processos e catalisadores mais adequados para pequena escala.

- Apresenta viscosidade cinemática relativamente alta em comparação com outras rotas;
- Mais adequado para a produção de produtos químicos de alto valor.

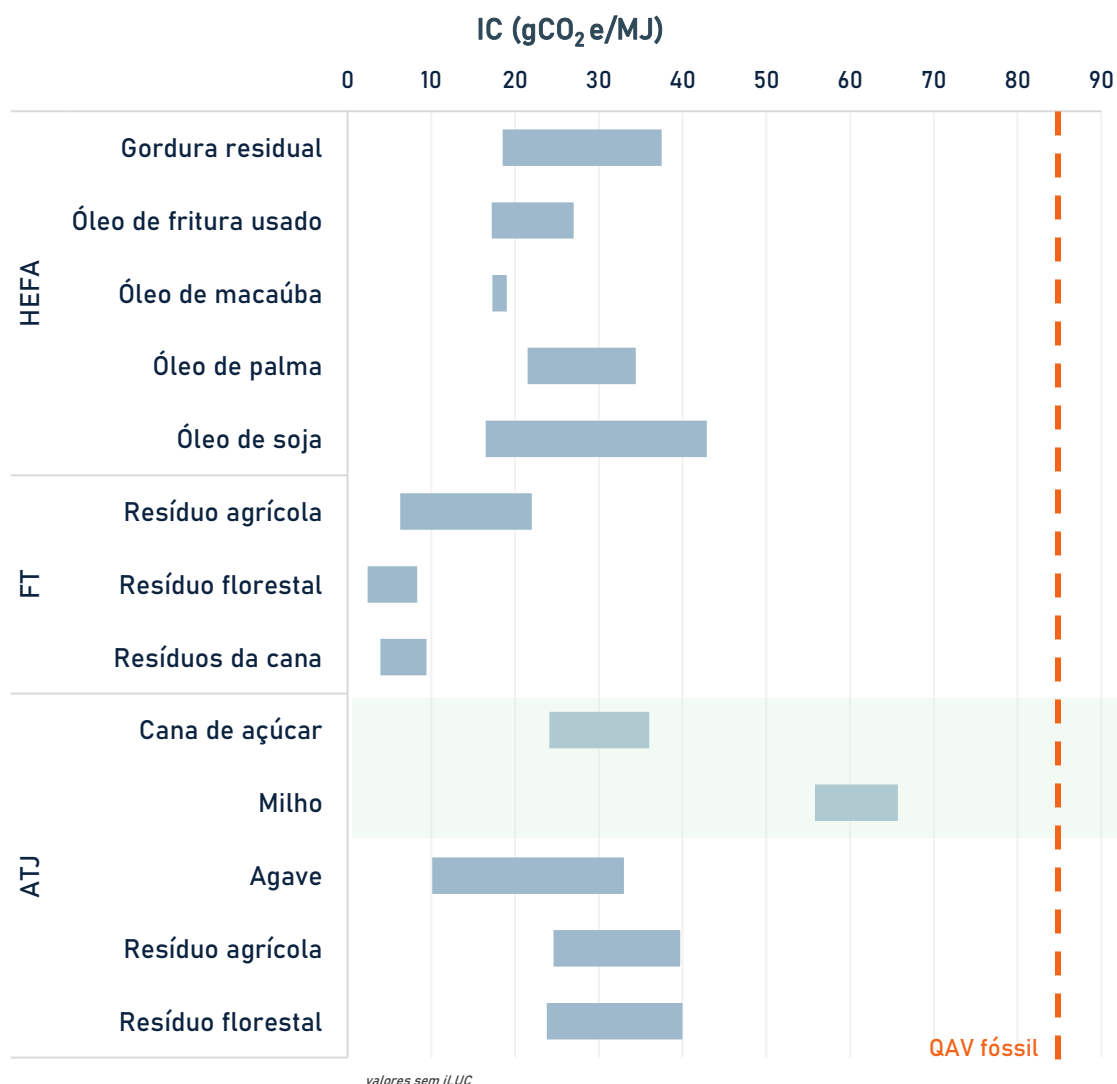
- Disponibilidade de matéria-prima comprometida, pois bio-álcoois possuem mercado estabelecido no segmento de transporte rodoviário.



# Matérias-primas | Custo e esforço tecnológico



# Rotas Tecnológicas & Matéria-Prima | Intensidade de Carbono (IC)



## • Cana:

Valores não incluem SAF-AtJ de etanol de 2° geração (E2G) a partir dos resíduos da cana. Estima-se que o E2G de resíduos da cana possua uma IC 30% inferior ao etanol de 1° geração\*, podendo assim o SAF-AtJ de E2G representar um potencial de descarbonização ainda maior.

\*Raizen 2023

## • Milho:

Valor disponível referente apenas ao SAF-AtJ de etanol de milho dos EUA. A literatura ainda carece de valores regionais de SAF-AtJ de milho 2° safra do Brasil.

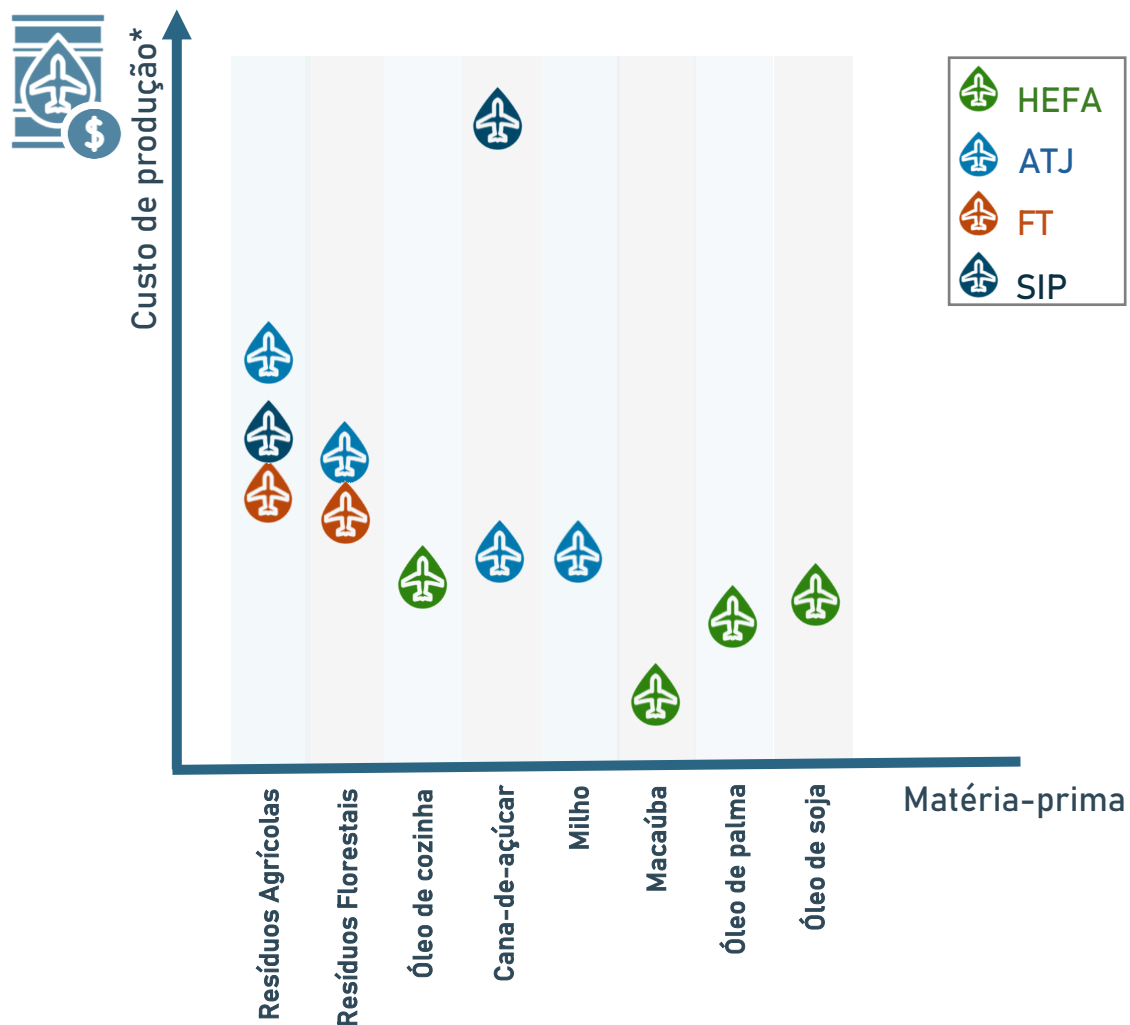
Estima-se que a IC do SAF-AtJ produzido a partir do etanol de milho 2° safra do Brasil seja significativamente inferior ao SAF-AtJ de milho dos EUA, principalmente devido ao uso de bioenergia na indústria.

**Maior intensidade de carbono do SAF-AtJ quando produzido em usina não-integrada fora do Brasil, principalmente devido:**

- às emissões de transporte marítimo do etanol do Brasil até a planta de SAF no exterior;
- ao consumo de combustível fóssil (ex: gás natural) na indústria para produção de SAF.

**Oportunidade:** Sistema de *Book&Claim* como alternativa para viabilizar produção de SAF nas localidades mais competitivas em IC, como o Brasil, acelerando o alcance das metas de descarbonização com menores custos para a sociedade.

# Rotas Tecnológicas & Matéria-Prima | Custos de produção



- O custo de produção por rota está representado pelo preço de venda mínimo viável do SAF.
- O custo de produção de cada rota poderá variar de forma heterogênea, de acordo com diferentes ganhos potenciais de produtividade via:
  - **Economia de escala:** as rotas mais adotadas, com maior investimento e volume de SAF produzido, poderão estar sujeitas a uma redução de custo mais acelerada do que as rotas com uma menor taxa de adoção;
  - **Economia de escopo:** as rotas que proporcionarem uma maior gama de produtos gerados conjuntamente ao SAF, podem se beneficiar da resiliência de um portfólio mais diversificado.
- A existência de um mercado de carbono consolidado pode fomentar a produção de SAF. Caso o benefício ambiental possa ser quantificado, poderá haver aumento da competitividade do combustível renovável.

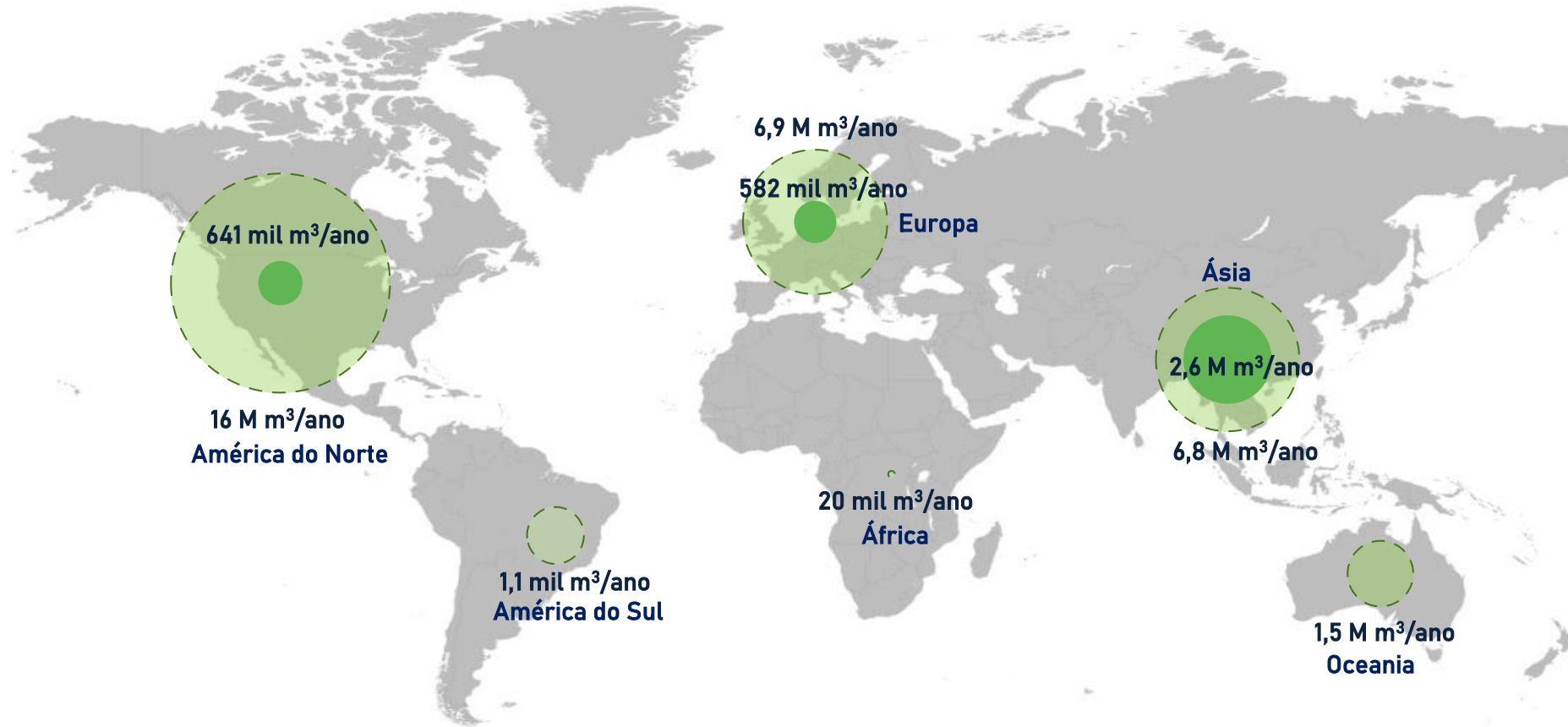
# Produção de SAF

Atual e futura

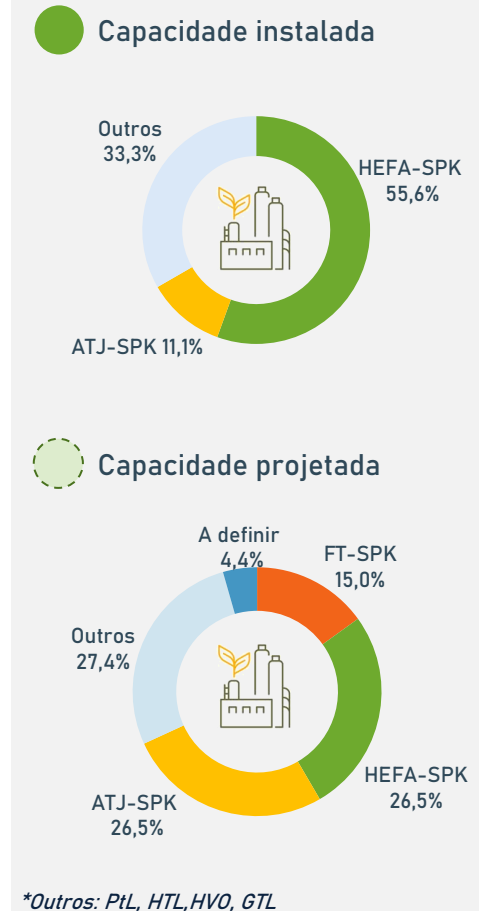


# Produção de SAF | Mundo

## Capacidade instalada x Capacidade projetada (2030)



### Legenda



\*Dados de capacidade de biorrefinarias considerando produção máxima de SAF

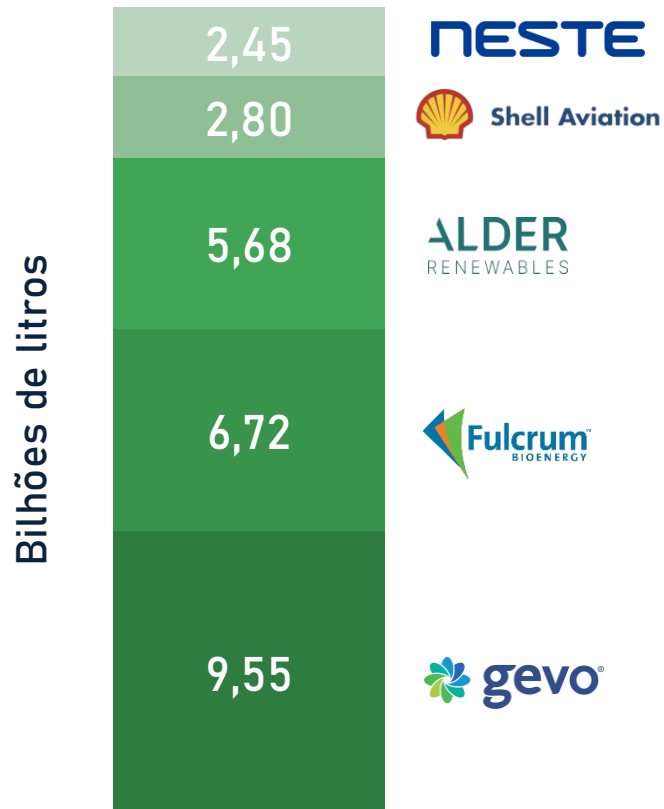
\*Dados de capacidade projetada consideram decisão final de investimento com data definida e a definir

Fonte: 29 (S&P Global Commodity Insights, ©2024 by S&P Global Inc)



# Produção de SAF | Experiências e consumo

## Principais produtores de SAF por volume total de *offtake*<sup>1</sup>



## Experiências de voo utilizando SAF

Voos comerciais que foram operados usando SAF, desde 2011:

736.319

Número de aeroportos regularmente abastecidos com SAF:

69

Companhias aéreas que se comprometeram com metas de SAF para 2030:

50

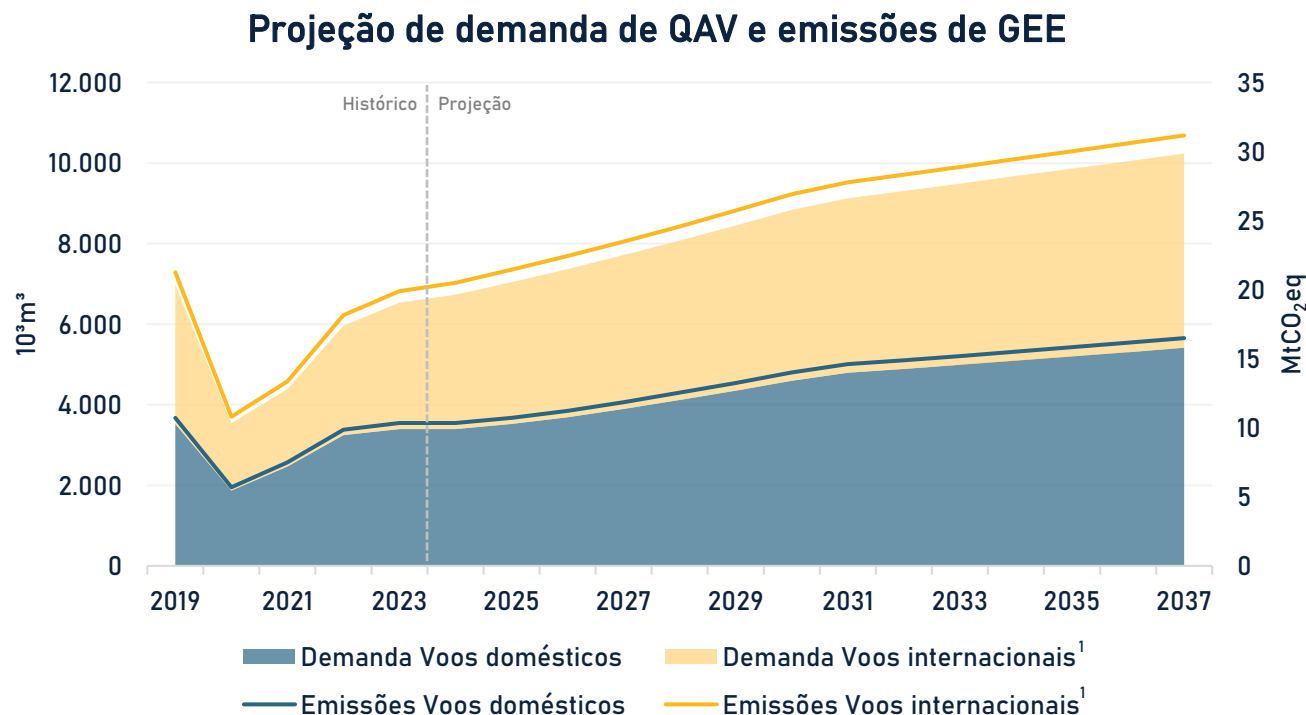
<sup>1</sup>Valores acumulados até outubro/2023

Fonte: 30, 33

# Trajetórias para oferta de SAF



# A demanda de QAV continuará crescendo nos próximos anos

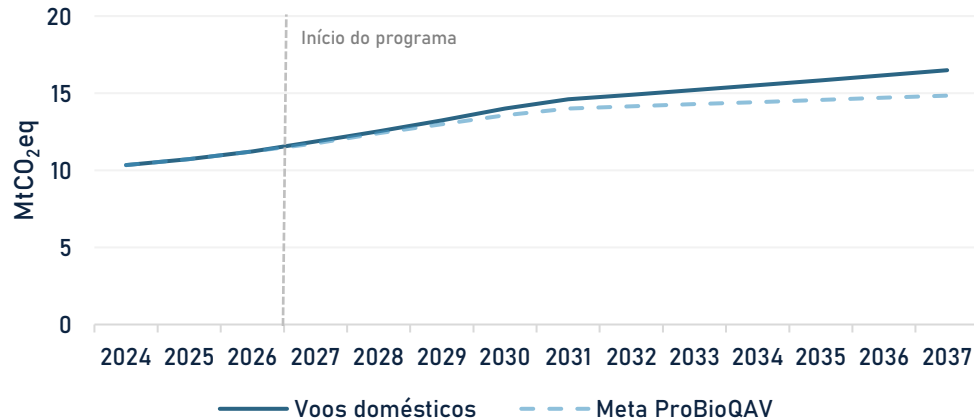


- Para acompanhar a recuperação da demanda do setor pós-pandemia, tanto a produção nacional quanto a importação de QAV no Brasil devem crescer.
- Mesmo com melhorias na eficiência das aeronaves e no planejamento de viagens, as emissões do setor também apresentam tendência de aumento.
- Nesse contexto, a produção de SAF deve assumir um papel chave para a descarbonização da aviação através dos programas ProBioQAV e CORSIA.
- O Brasil pode se destacar na produção de SAF por sua expertise com biocombustíveis e disponibilidade de biomassa e outras fontes renováveis de energia.

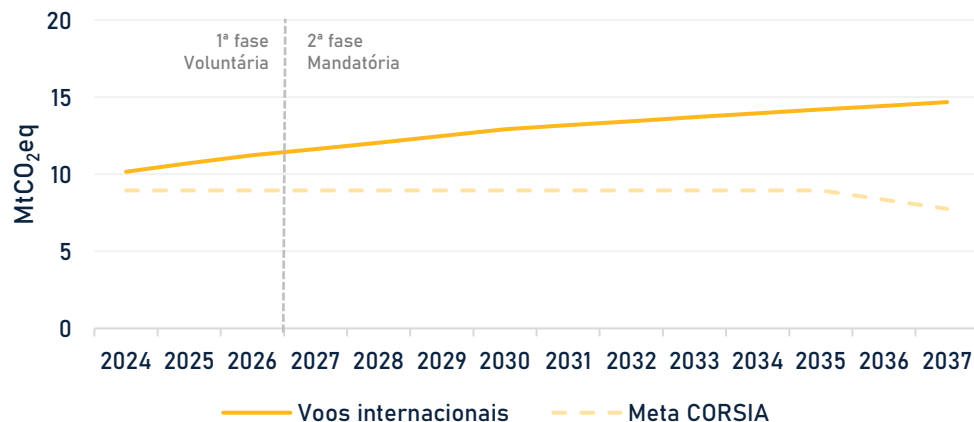
<sup>1</sup> Voos operados por empresas nacionais ou estrangeiras com origem/destino fora do Brasil.  
Fonte: elaboração própria, com base em 34

# Metas de redução de emissões

## Aplicação das metas ProBioQAV

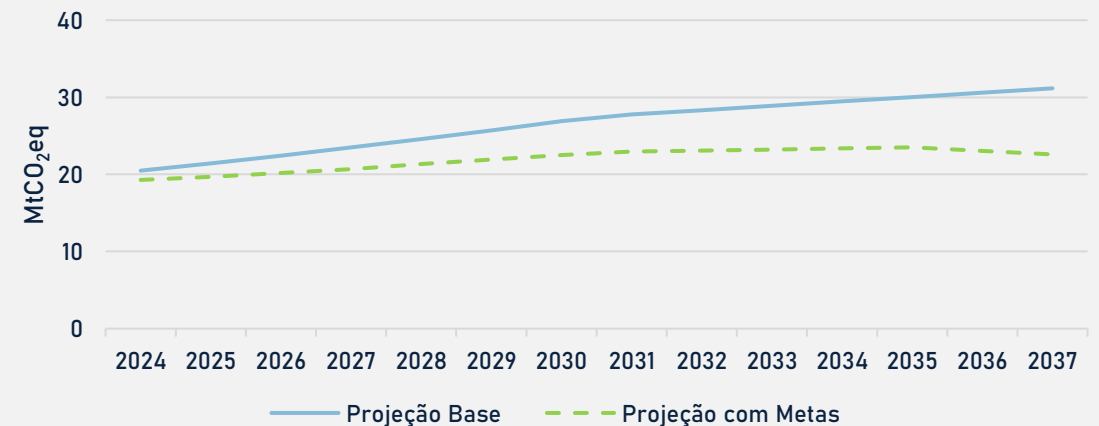


## Aplicação das metas CORSIA



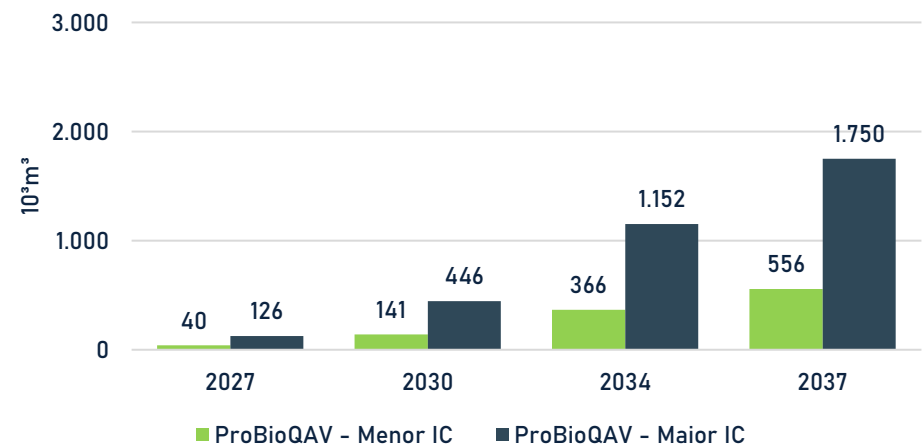
- O ProBioQAV e o CORSIA não se baseiam em mandatos volumétricos, e sim em metas de redução de emissões:
  - **ProBioQAV** – percentual de redução gradual de emissões aplicado aos voos domésticos (vide slide 12).
  - **CORSIA** – crescimento neutro em carbono até 2035, seguido de redução para alcançar o net zero em 2050 na aviação internacional (vide slide 9).
- A aplicação de ambos os programas se traduz em uma redução de emissões que pode ser atendida com SAF.

## Aplicação CORSIA + ProBioQAV

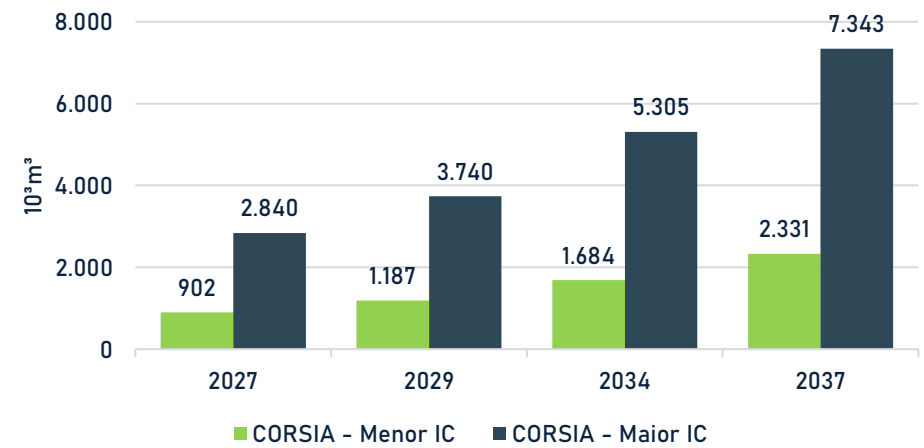


# Demanda de SAF no Brasil

Demanda ProBioQAV

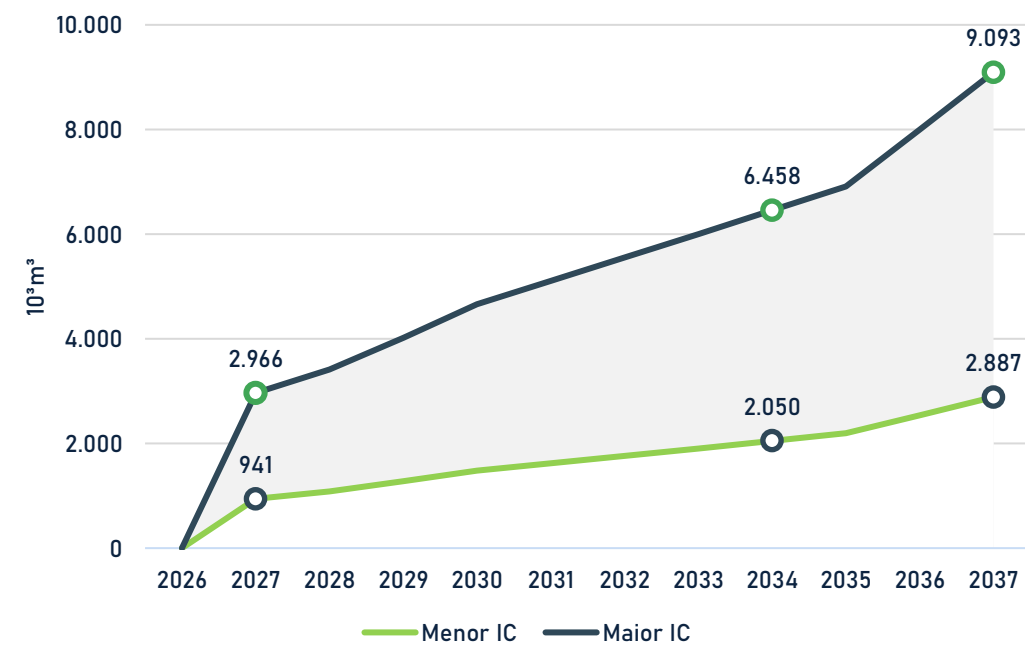


Demanda CORSIA



- A demanda volumétrica de SAF irá variar de acordo com a intensidade de carbono (IC) do combustível produzido, uma vez que CORSIA e ProBioQAV estabelecem metas de redução de emissões.

Demanda nacional SAF





# Trajetórias propostas



## Projetos anunciados

Os projetos anunciados são suficientes para atender as metas de redução de emissões?



## Matérias-primas

### Consolidadas

Como óleo de soja, etanol de cana 1G e de milho podem contribuir para atender as metas?



### Alternativas

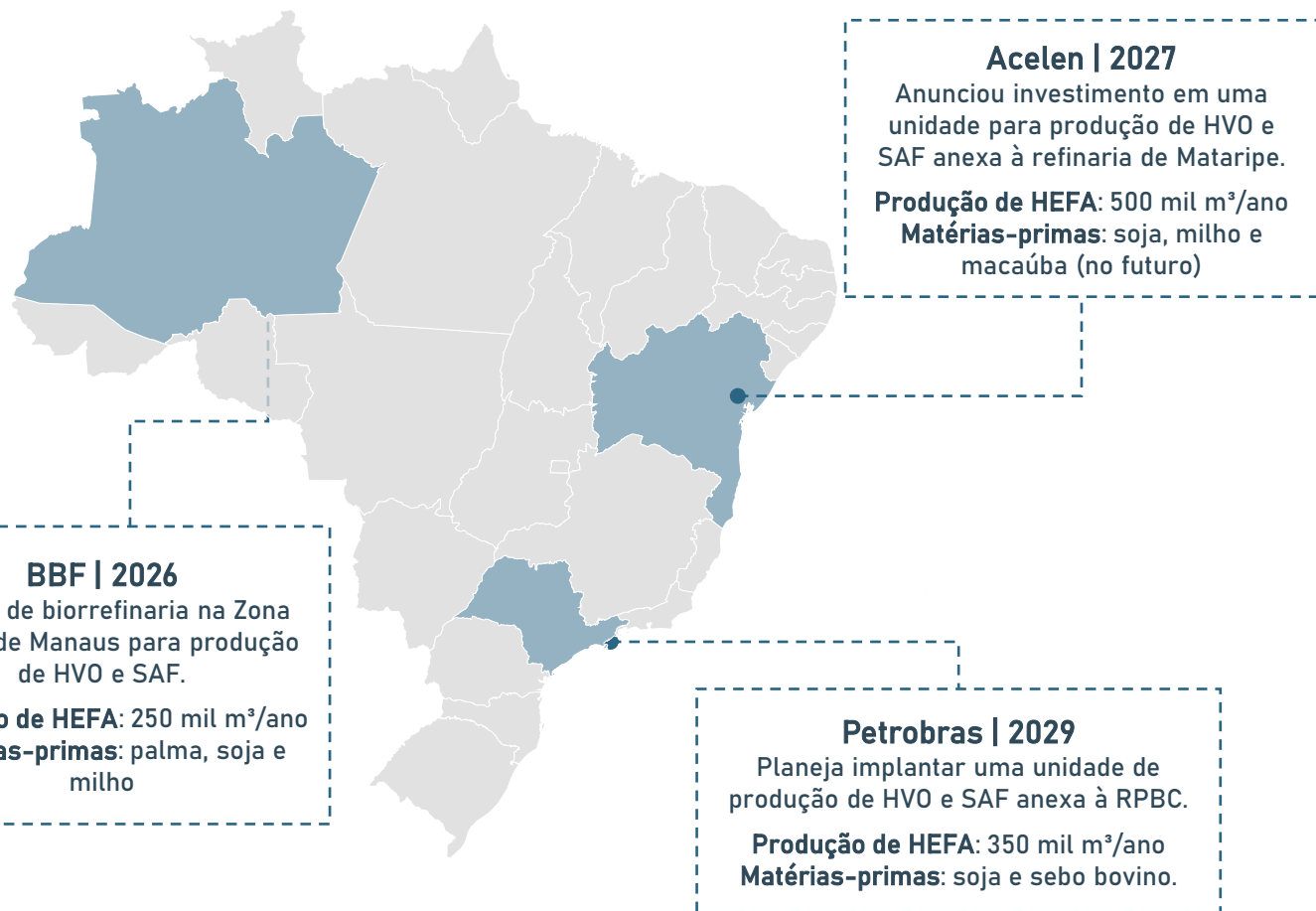
Como matérias-primas alternativas podem contribuir para atender as metas?



## Aproveitamento de resíduos

Qual é o potencial de produção de SAF a partir de resíduos orgânicos disponíveis no Brasil?

# Trajetória I | Projetos anunciados

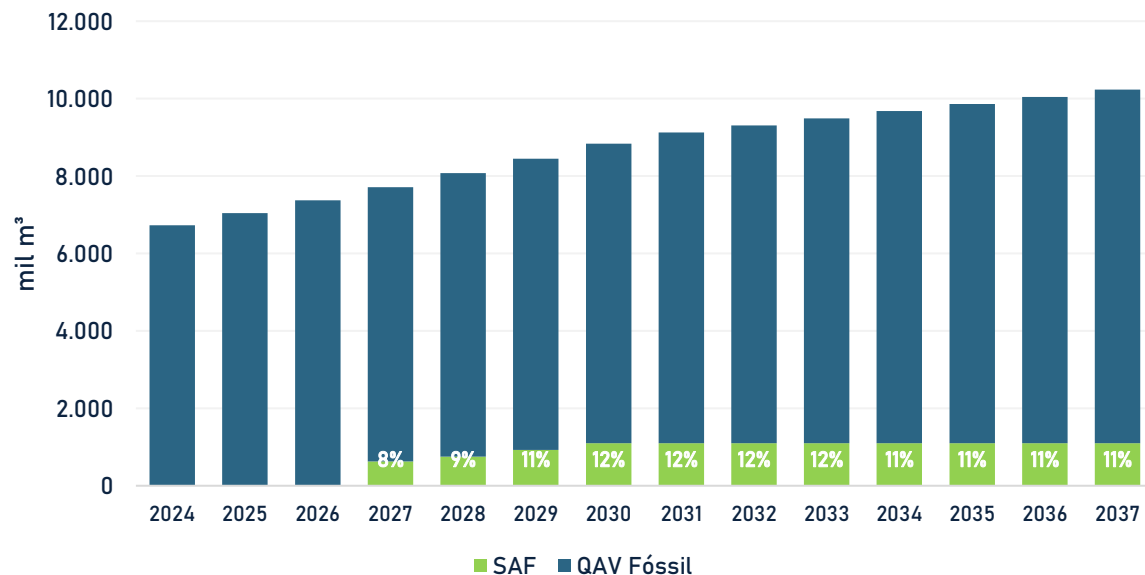


- Os projetos anunciados optam pela rota HEFA para produção de SAF, uma vez que é a opção tecnológica com maior TRL até o momento.
- O óleo de soja será utilizado como matéria-prima principal ou secundária em todas as unidades anunciadas, o que se deve à disponibilidade desse produto em larga escala.
- Os projetos também buscam algum nível de diversificação com a inclusão de outras fontes de óleo vegetal e gordura, como o óleo de palma, sebo bovino e a macaúba.
- Esta trajetória avalia em que medida esses projetos podem atender as metas de redução de emissões do CORSIA e ProBioQAV.

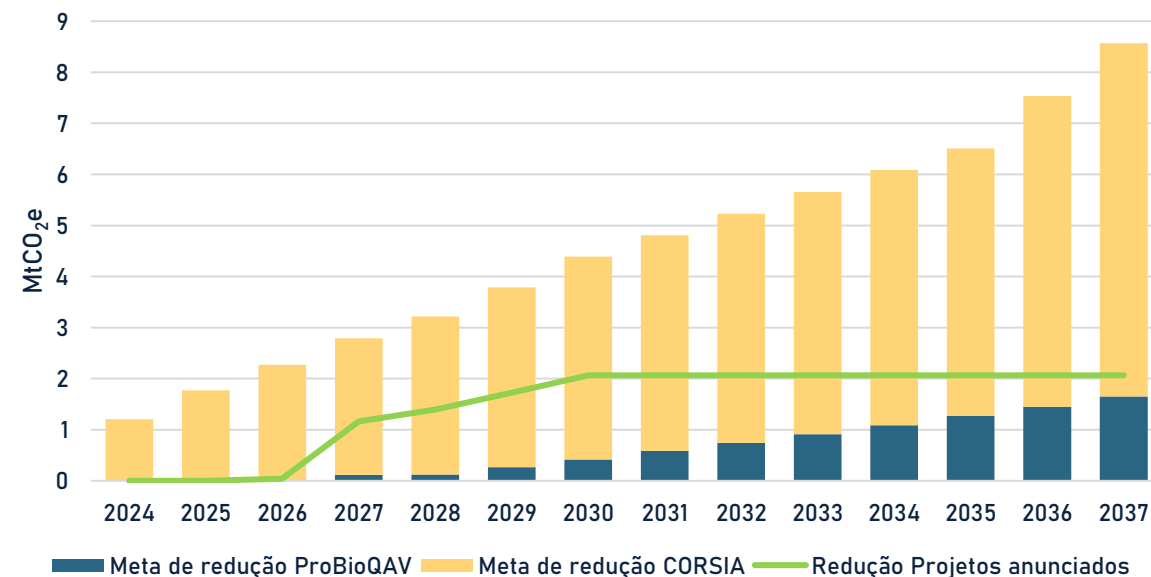
# Trajetória I | Projetos anunciados

## Atendem parcialmente as metas de redução de emissões

Participação na demanda



Atendimento às metas

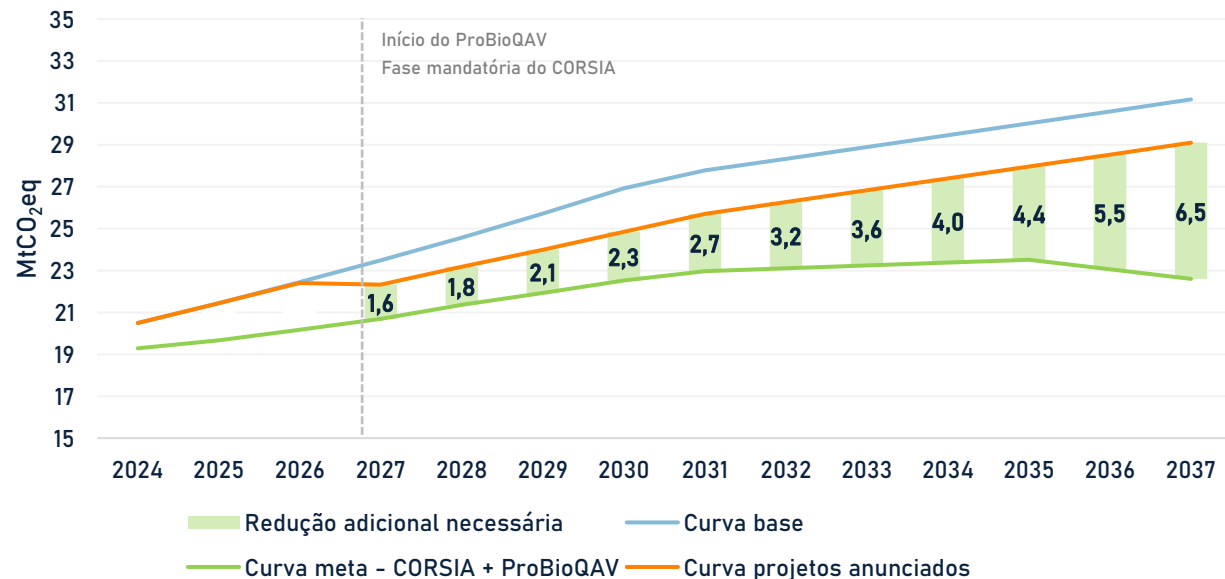


- Os projetos já anunciados representam 12% da demanda estimada de combustível de aviação entre 2030 e 2033, mas a participação decai à medida que a demanda cresce.

- Entre 2027 e 2037, os projetos atendem, em média, 38% das metas de redução de emissões definidas pelo CORSIA e ProBioQAV.
- Considerando apenas o ProBioQAV, os projetos anunciados são suficientes para atender as metas estabelecidas até 2037.

# Trajetória II | Matérias-primas consolidadas e alternativas

## Atendimento às metas



### Matérias-primas consolidadas

HEFA

ATJ

Soja

Cana

Milho

### Matérias-primas alternativas

HEFA

ATJ

Macaúba

Agave

E2G

- Outros empreendimentos precisarão entrar em operação a partir de 2027, quando o CORSIA e ProBioQAV se tornam obrigatórios.
- Matérias-primas consolidadas na produção de biocombustíveis → escala e experiência.
- Matérias-primas alternativas → diversificação da cesta de insumos, desenvolvimento regional e integração de políticas públicas.
- Essas matérias-primas podem “impulsionar o fortalecimento e o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar e das suas organizações como contribuição para a diversificação produtiva, para a redução das desigualdades, para a mitigação de impactos climáticos e para a promoção da segurança energética e da segurança alimentar”, convergentes aos objetivos do Selo Biocombustível Social.
- Esta trajetória indica o volume de SAF necessário para atingir as metas de redução de emissões a partir de rotas e matérias-primas selecionadas e analisadas separadamente.

⚠ Nota: As análises são mutuamente excludentes.

# Trajetória II | Matérias-primas consolidadas e alternativas

Capacidade de produção varia de acordo com a rota e matéria-prima

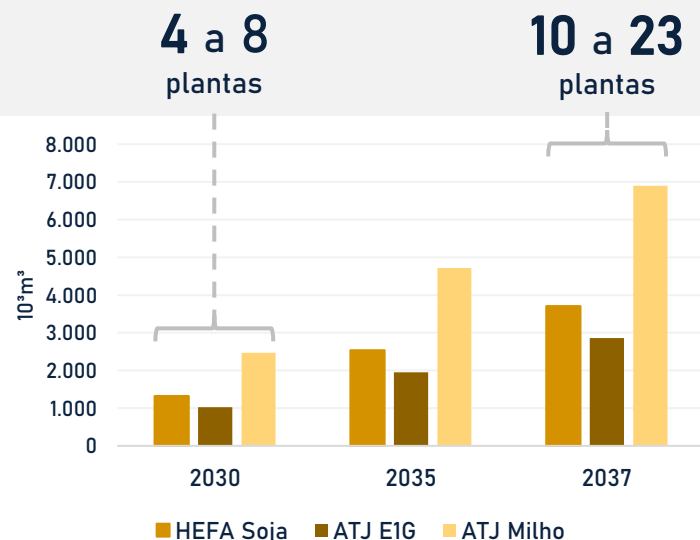


## Consolidadas

Equivalência em plantas de 300 mil m<sup>3</sup>/ano <sup>1</sup>

Capacidade adicionada de produção de SAF <sup>2</sup>

Valores se somam aos projetos anunciados



## Alternativas



- O mix de rotas e matérias-primas dependerá da avaliação de diversos fatores.
  - Ex: disponibilidade de insumos, logística, custos, aspectos ambientais etc.
- Em 2037, a produção de SAF deve chegar na faixa de **3,7 a 8 milhões de m<sup>3</sup>/ano**, a depender das rotas escolhidas. Essa faixa de produção inclui os projetos anunciados.
- O SAF poderá representar entre **36% a 78%** da demanda volumétrica de QAV<sup>3</sup>.



**Nota:** As análises são mutuamente excludentes.

<sup>1</sup> Capacidade específica média com base em projetos anunciados e relatórios de mercado (29).

<sup>2</sup> Os cálculos utilizaram a redução adicional de emissões necessária em cada ano e valores de IC indicados [nesta página do Caderno](#).

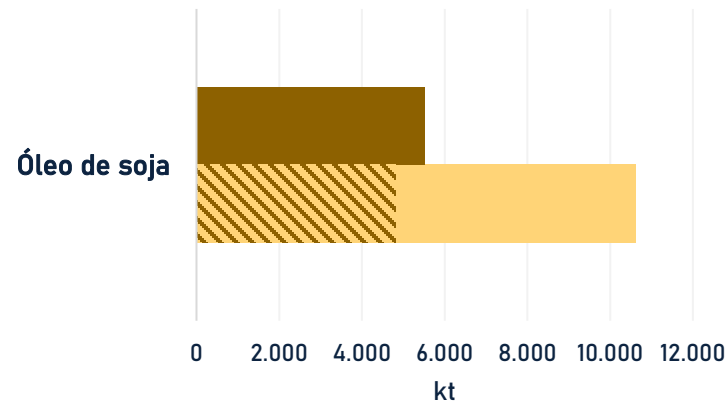
<sup>3</sup> Atualmente, o limite máximo de mistura de SAF no QAV fóssil é de 50%.

Fonte: elaboração própria, com base em 2, 8, 16, 20, 25, 34, 35, 36, 37



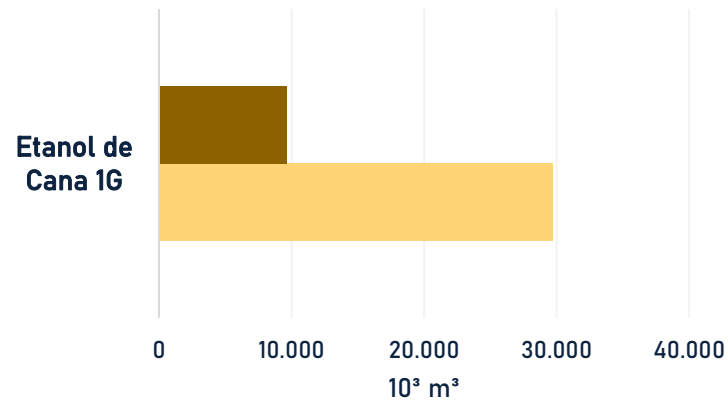
# Trajetória II | Matérias-primas consolidadas e alternativas

Disponibilidade de matéria-prima é um critério chave ...



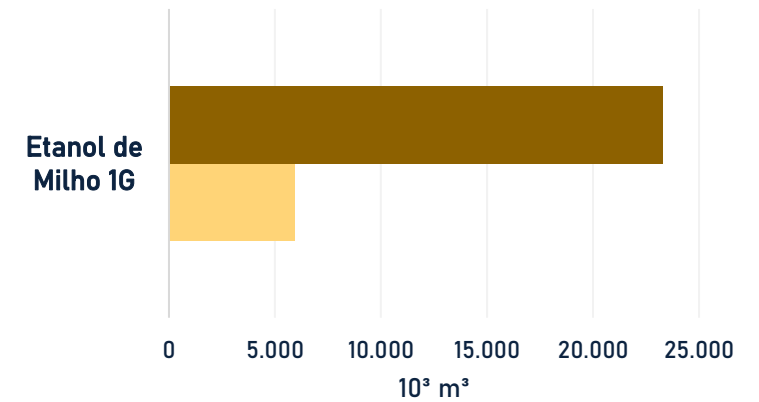
■ Demanda para SAF em 2037  
■ Produção 2023  
▨ Destinado à produção do biodiesel em 2023

- A demanda de óleo de soja para SAF em 2037 supera o que foi utilizado para produção de biodiesel em 2023.
- Considerando a taxa de ocupação da capacidade de extração de óleo de soja no Brasil (78%), haverá a necessidade de investimentos ao longo do período.



■ Demanda para SAF em 2037  
■ Produção 2023

- A produção de SAF a partir de E1G de cana abre uma nova possibilidade de mercado para esse biocombustível, especialmente em face ao maior valor agregado do SAF.
- Oportunidade de consolidar as usinas de etanol como biorrefinarias que produzem uma gama de produtos.

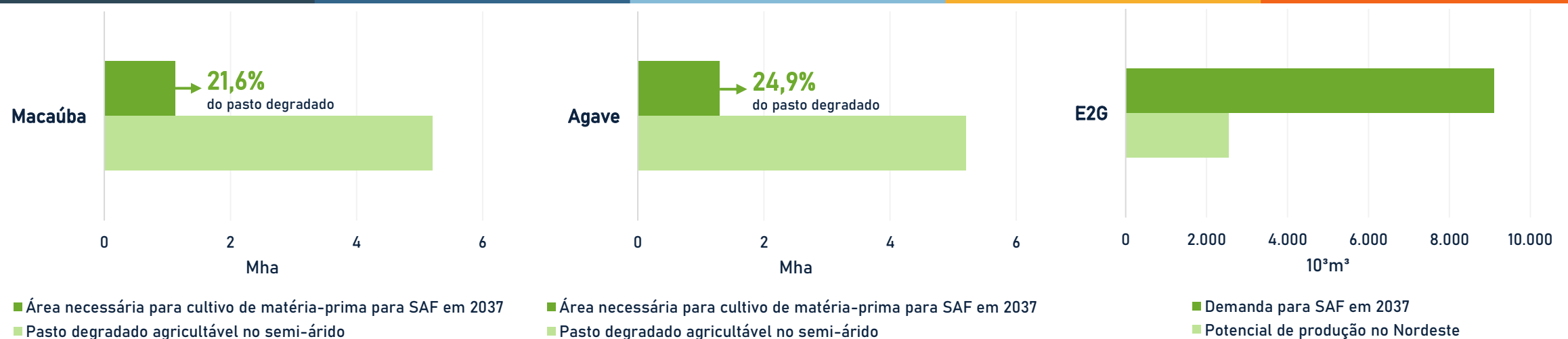


■ Demanda para SAF em 2037  
■ Produção 2023

- A expansão da oferta de etanol de milho no Brasil pode ser impulsionada ainda mais pela demanda crescente de SAF nos próximos anos.

# Trajetória II | Matérias-primas consolidadas e alternativas

## ... e também pode ser um impulsionador da diversificação no NE



- Macaúba e agave são biomassas promissoras para produção de biocombustíveis no Brasil<sup>1</sup>.
- Apesar de ainda não estarem disponíveis em escala, essas matérias-primas podem ser vetores de:

- Integração de políticas públicas;
- Diversificação de biomassas na produção de biocombustíveis;
- Fortalecimento da agricultura familiar;
- Promoção de segurança alimentar e energética;
- Desenvolvimento regional;
- Redução das desigualdades;
- Recuperação de áreas degradadas;
- Desenvolvimento tecnológico;
- Geração de emprego e renda.

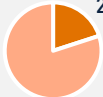
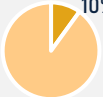
- A demanda crescente de SAF pode incentivar a produção de E2G de cana na região Nordeste<sup>2</sup>.
- Por ser um biocombustível com alto valor agregado, tem o potencial de impulsionar a modernização e ampliação da gama de produtos das usinas da região, aumentando também a geração de emprego qualificado e renda.

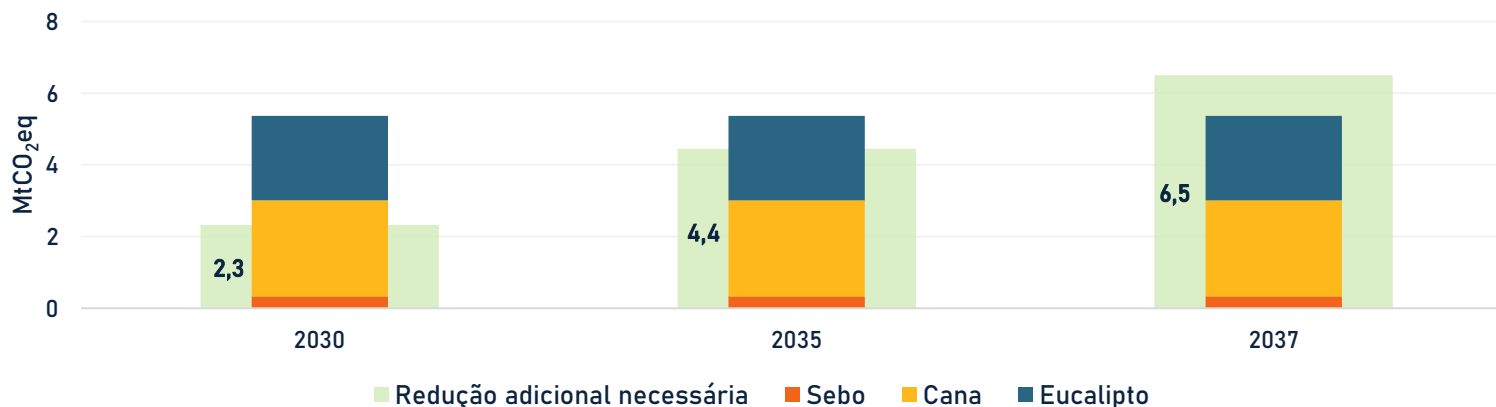
<sup>1</sup> A implantação em grande escala desses plantios demandaria análises socioambientais para avaliação dos impactos na região.

<sup>2</sup> O potencial de produção E2G na região Nordeste foi definido considerando o direcionamento de bagaço para a produção de etanol.

Fonte: elaboração própria, com base em 39, 40, 41

# Trajетória III – Aproveitamento de resíduos

|                                     |  <b>Sebo bovino</b> |  <b>Resíduos da cana</b> |  <b>Resíduos do eucalipto</b> |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Taxa de aproveitamento <sup>1</sup> |  20%                |  10%                   |  40%                          |
| Estimativa de resíduos disponíveis  | <b>215</b><br>mil toneladas/ano                                                                      | <b>26,5</b><br>milhões toneladas/ano                                                                      | <b>16,6</b><br>milhões toneladas/ano                                                                             |
| Potencial de produção de SAF        | <b>~140</b> mil m³/ano<br>pela rota HEFA                                                             | <b>~915</b> mil m³/ano<br>pela rota FT                                                                    | <b>~790</b> mil m³/ano<br>pela rota FT                                                                           |
| Equivalência em plantas             | <b>1</b> planta<br>de 140 mil m³/ano                                                                 | <b>3</b> plantas<br>de 300 mil m³/ano                                                                     | <b>3</b> plantas<br>de 300 mil m³/ano                                                                            |



- A utilização de resíduos orgânicos é atrativa em função do baixo custo de aquisição da matéria-prima e baixa intensidade de carbono.
- Esta trajetória considera o nível de aproveitamento dos resíduos disponíveis e indica o potencial de produção de SAF a partir deles.
- Caso o potencial de aproveitamento fosse integralmente desenvolvido, seria possível atender **82%** das metas de redução de emissões até 2037 utilizando apenas resíduos.

<sup>1</sup> As taxas de aproveitamento foram definidas considerando parcelas desses resíduos que já são utilizadas para outros fins. No gráfico, o nível de redução de emissões a partir dos resíduos se mantém constante, pois utilizou-se a disponibilidade em 2022/2023 como referência.

Fonte: elaboração própria, com base em 16, 18, 38, 42, 43

# Resumo 2037

|                                    | Trajetória I                                                                                          | Trajetória II                                                                                    |                                                                                                  | Trajetória III                                                                                                 |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    | Projetos anunciados  | Consolidadas  | Alternativas  | Aproveitamento de resíduos  |
| Capacidade adicionada <sup>1</sup> | 1.100 mil m³/ano                                                                                      | 3.000 a 6.900 mil m³/ano                                                                         | ~2.700 mil m³/ano                                                                                | ~1.940 mil m³/ano                                                                                              |
| Equivalência em nº de plantas      | 3 plantas<br>500, 250, 350 mil m³/ano                                                                 | 10 a 23 plantas<br>de 300 mil m³/ano                                                             | 9 plantas<br>de 300 mil m³/ano                                                                   | 7 plantas<br>6 de 300 mil m³/ano<br>+ 1 de 140 mil m³/ano                                                      |
| Investimento estimado <sup>2</sup> | R\$ 8,7 bilhões                                                                                       | R\$ 21 a 48 bilhões                                                                              | R\$ 19 bilhões                                                                                   | R\$ 13,6 bilhões                                                                                               |

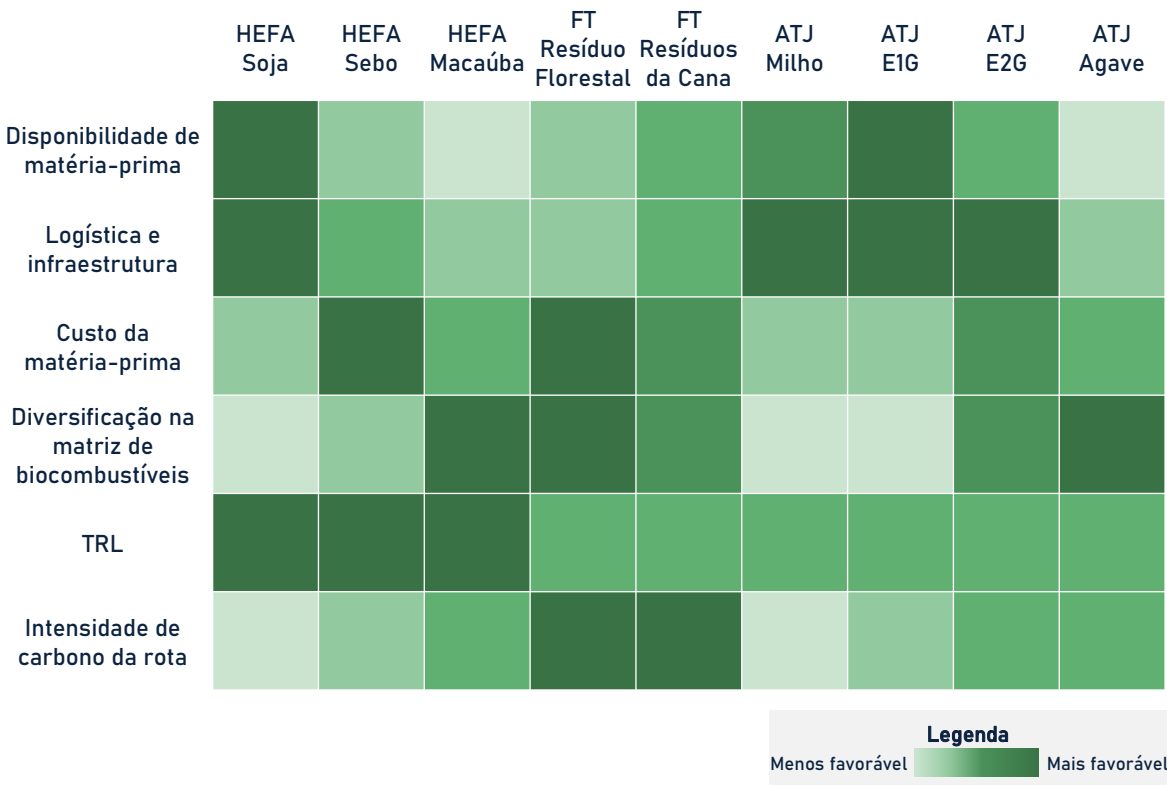
<sup>1</sup> A capacidade adicionada de produção de SAF nas Trajetórias II e III se baseia nas metas de redução de emissões do CORSIA e ProBioQAV e na IC de cada rota/matéria-prima.

<sup>2</sup> A estimativa de investimento se baseou no custo médio dos projetos anunciados no Brasil. Nota-se, contudo, que o CAPEX irá variar para as diferentes rotas. Há também a possibilidade de ganhos de escala e escopo que não foram considerados nesse cálculo.

# Avaliação multicritério

O mix de rotas e matérias-primas dependerá da avaliação de diversos fatores e restrições

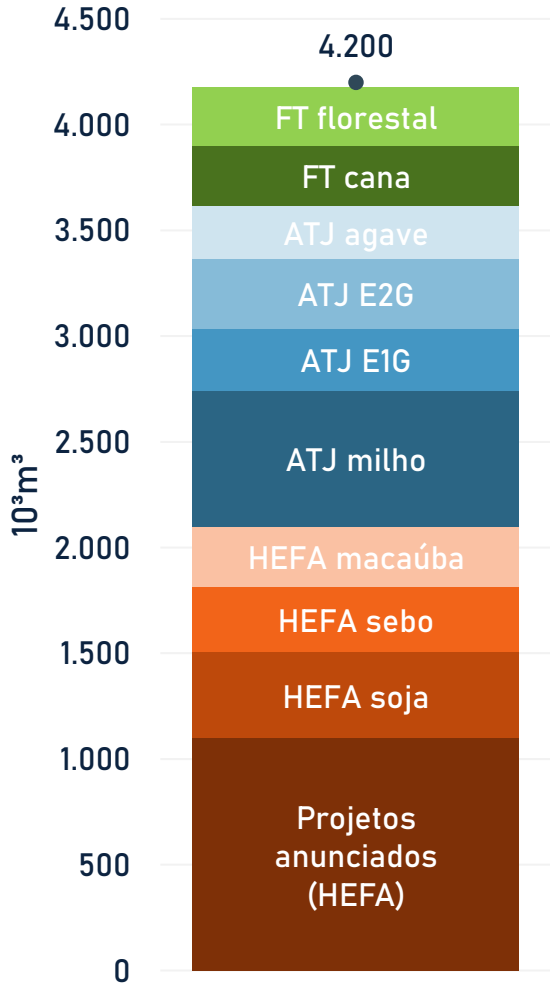
- O mix de rotas e matérias-primas dependerá da avaliação de diversos fatores e restrições, tais como:



- Outros fatores também poderão influenciar a composição do mix, tais como financiamento, aspectos geopolíticos, estratégia nacional, etc.

- A ponderação de diferentes critérios indica uma **possível composição** de rotas de produção de SAF com foco em atingir as metas de redução de emissões do setor e diversificar matérias-primas.
- A diversificação de matérias-primas para produção de biocombustíveis ainda requer investimentos para alcançar escala.
- Contudo, este pode ser um importante vetor de desenvolvimento regional, recuperação de pastagens degradadas e geração de emprego e renda.

Produção de SAF por rota em 2037



# Considerações Finais





# Principais mensagens



A produção de SAF no Brasil pode ter uma intensidade de carbono menor em comparação com os mesmos processos de conversão em outros países devido às plantas integradas.



**Iniciativas existentes** para a construção de biorrefinarias **podem atender a uma parte da redução de emissões** exigida pela CORSIA e ProBioQAV.

Mas, no longo prazo, é necessário **diversificar as matérias-primas utilizadas na produção de biocombustíveis**, o que poderia catalisar a **geração de emprego e a distribuição de renda** para as áreas rurais no Brasil.



Os cenários descritos neste estudo indicam uma gama de soluções. No entanto, **uma perspectiva integrada é necessária para otimizar os esforços de descarbonização**, dada a competição com outras indústrias por recursos como terras, matérias-primas, financiamento, etc.



É importante **alocar recursos em PD&I** para estabelecer uma **indústria forte e alinhada com a transição energética justa** para uma economia de baixo carbono.

# Referências



# Referências

1. EPE, 2023. Aplicação Fact Sheet sobre Combustíveis Sustentáveis de Aviação. Disponível em: [Link](#)
2. Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO). CORSIA Brochure 2023 Edition. ICAO, Montreal, 2023. Disponível em: [Link](#)
3. REN21. Global Status Report. Disponível em: [Link](#)
4. GOVERNMENT OF THE UNITED KINGDOM. Pathway to Net Zero Aviation: Developing the UK Sustainable Aviation Fuel Mandate. Disponível em: [Link](#).
5. White House. Clean Energy: Inflation Reduction Act Guidebook. Disponível em: [Link](#)
6. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Combustível do Futuro: Documentos do Subcomitê 1. Apresentação do Projeto de Lei. [Brasília], 28 mar. 2022. Disponível em: [Link](#)
7. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Combustível do Futuro. Disponível em: [Link](#).
8. BRASIL. Câmara dos Deputados. Projeto de Lei nº 4516/2023. Disponível em: [Link](#)
9. ANP, 2021. Resolução nº 856, de 2021. Disponível em: [Link](#).
10. ASTM INTERNATIONAL. ASTM D7566-21: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. West Conshohocken, PA, 2021.
11. SHAHRIAR, Md Fahim; KHANAL, Aaditya. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). Fuel, v. 325, p. 124905, 2022.
12. ICS, 2021. Sinergias entre as Metas de Descarbonização dos Setores de Aviação e de Transporte Marítimo. Disponível em: [Link](#)
13. WEI, Hongjian et al. Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. Fuel, v. 254, p. 115599, 2019.
14. NG, Kok Siew; FAROOQ, Danial; YANG, Aidong. Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 150, p. 111502, 2021.
15. CARVALHO, Francielle et al. Potential for biojet production from different biomass feedstocks and consolidated technological routes: a georeferencing and spatial analysis in Brazil. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 13, n. 6, p. 1454-1475, 2019.
16. CAPAZ, Rafael S. et al. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 15, n. 2, p. 502-524, 2021.
17. ZECH, Konstantin M. et al. Techno-economic assessment of a renewable bio-jet-fuel production using power-to-gas. Applied energy, v. 231, p. 997-1006, 2018.
18. AGROICONE; ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS (RSB). Feedstock Availability for Sustainable Aviation Fuel. São Paulo: Agroicone, 2021. Disponível em: [Link](#)
19. GELEYNSE, Scott et al. The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-in biofuels: techno-economic evaluation. ChemSusChem, v. 11, n. 21, p. 3728-3741, 2018.
20. ICAO, 2022. CORSIA Default Life Cycle Emissions Values For CORSIA Eligible Fuels. Disponível em: [Link](#).
21. YOUSUF, Abu; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, Cristina (Eds.). Alternativas sustentáveis para combustíveis de aviação. 1ª ed. São Paulo: Elsevier, 2022. Disponível em: [Link](#)
22. MCTI, 2022. Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação. ProQR – Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos Cooperação Técnica Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável.
23. BAUEN, Ausilio et al. Sustainable Aviation Fuels: Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. Johnson Matthey Technology Review, v. 64, n. 3, p. 263-278, 2020.
24. ARGUS, Global Sustainable Aviation Fuel Capacity. Disponível em: [Link](#)

# Referências

25. KLEIN, Bruno Colling et al. Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. *Applied Energy*, v. 209, p. 290-305, 2018.
26. CHEN, Peter Hua et al. Life-cycle analysis of sustainable aviation fuel production through catalytic hydrothermolysis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 18, n. 1, p. 42-54, 2024.
27. VIBRA ENERGIA. Release VIBRA - BBF SAF. Disponível em: [Link](#)
28. PETROBRAS. Plano estratégico 2024-2028. Disponível em: [Link](#)
29. S&P GLOBAL, Data manager — Renewable diesel and jet capacities: Biofuels Value Chain Service. S&P Global – Commodity Insights-2024
30. ATAG, Sustainable Aviation Fuel. Acesso em 03/05/2024. Disponível em: [Link](#)
31. YANG, Jie et al. An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. *Fuel*, v. 237, p. 916-936, 2019.
32. ESWARAN, Sudha et al. Techno-economic analysis of catalytic hydrothermolysis pathway for jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 151, p. 111516, 2021
33. SIMPLIFYING, 2023. Sustainable Aviation Fuels- Powerlist 2023. Issuu. Disponível em: [Link](#).
34. EPE, Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Disponível em: [Link](#)
35. EPE, Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2022. Disponível em: [Link](#)
36. ACELEN, Acelen inova em combustíveis renováveis e investirá mais de R\$ 12 bi. Disponível em: [Link](#)
37. YAN, Xiaoyu et al., Life cycle energy and greenhouse gas analysis for agave-derived bioethanol. *Energy & Environmental Science*, 2011,4, 3110-3121. Disponível em: [Link](#)
38. ANP, Painel Dinâmico de Produtores de Biodiesel. Disponível em: [Link](#)
39. CONAB, Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar – Safra 2023/2024. Disponível em: [Link](#)
40. YAN, Xiaoyu et al. Agave: A promising feedstock for biofuels in the water-energy-food-environment (WEFE) nexus. *Journal of Cleaner Production*, 2020. Disponível em: [Link](#)
41. MAPBIOMAS, Destaques do mapeamento anual da cobertura e uso da terra no Brasil de 1985 a 2021 – Pastagens. Disponível em: [Link](#)
42. IBGE, Pesquisa Trimestral do Abate de Animais. Disponível em: [Link](#)
43. IBÁ, Relatório anual 2023. Disponível em: [Link](#)
44. BRASIL, 2024 – Decreto 11.902/2024 [link](#)
45. EPE, Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020. Disponível em: [link](#)
46. INVEST NEWS, 2024. Acelen, do Mubadala, apresenta em NY sua biorrefinaria para combustível de aviação. Disponível em: [Link](#)

## Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

## Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

## Coordenação Técnica

Angela Oliveira da Costa

## Equipe Técnica

Ana Paula Oliveira Castro  
Anderson Luiz Silva Pelluso  
Arthur Cortez P. de Campos  
Danielle Borher de Andrade  
Euler João Geraldo da Silva

Juliana Rangel do Nascimento  
Leonidas Bially O. dos Santos  
Letícia Gonçalves Lorentz  
Rachel Martins Henriques  
Rafael Barros Araujo

## Agradecimentos

SMA/DEA/EPE

Siga a EPE nas redes sociais:



**EPE - Empresa de Pesquisa Energética**

Praça Pio X, n. 54, 5º andar - Centro

20091-040

Rio de Janeiro - Brasil



[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)

MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA

