



Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis

CARBONO BIOGÊNICO NA BIOENERGIA

Novembro de 2025



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



FICHA TÉCNICA | CARBONO BIOGÊNICO NA BIOENERGIA

Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis (SDB)
Diretoria de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (DPG)

Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

Coordenação Técnica

Angela Oliveira da Costa

Rachel Martins Henriques

Rafael Barros Araujo

Equipe Técnica

Guilherme Correa Naresse

Rachel Martins Henriques

Rafael Barros Araujo

Rafael Belém Lavrador

Apoio administrativo

Raquel Lopes Couto



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO DO
BRASIL
DO LADO DO POVO BRASILEIRO

Avisos

Esta publicação contém informações acerca da disponibilidade de CO₂ biogênico em diferentes processos relacionados à bioenergia, de acordo com estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), trazendo também perspectivas para seu uso em sistemas produtivos ou como ativo em operações de captura e armazenamento de carbono.

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) são de responsabilidade 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 divulgação de dados e informações que podem auxiliar o desenvolvimento de iniciativas visando uma transição energética justa, inclusiva e que se aproveite das vantagens competitivas do Brasil.

Neste caderno, a EPE analisa as oportunidades, desafios e o panorama internacional relativos às atividades de captura, utilização e armazenamento de carbono biogênico, além de disponibilizar dados georreferenciados de disponibilidade imediata e de potencial do recurso em todo o território nacional. A disseminação desses dados pode auxiliar a implementação de políticas públicas e empreendimentos privados que visem o desenvolvimento de negócios de baixo carbono no país, alinhando estratégias de descarbonização ao desenvolvimento nacional.



- Contextualização
- Oportunidades para aproveitamento do CO₂ biogênico
- Disponibilidade de CO₂ biogênico no território brasileiro
- Desafios para o aproveitamento do CO₂ biogênico
- Panorama internacional de captura, utilização e armazenamento de CO₂ biogênico
- Considerações finais



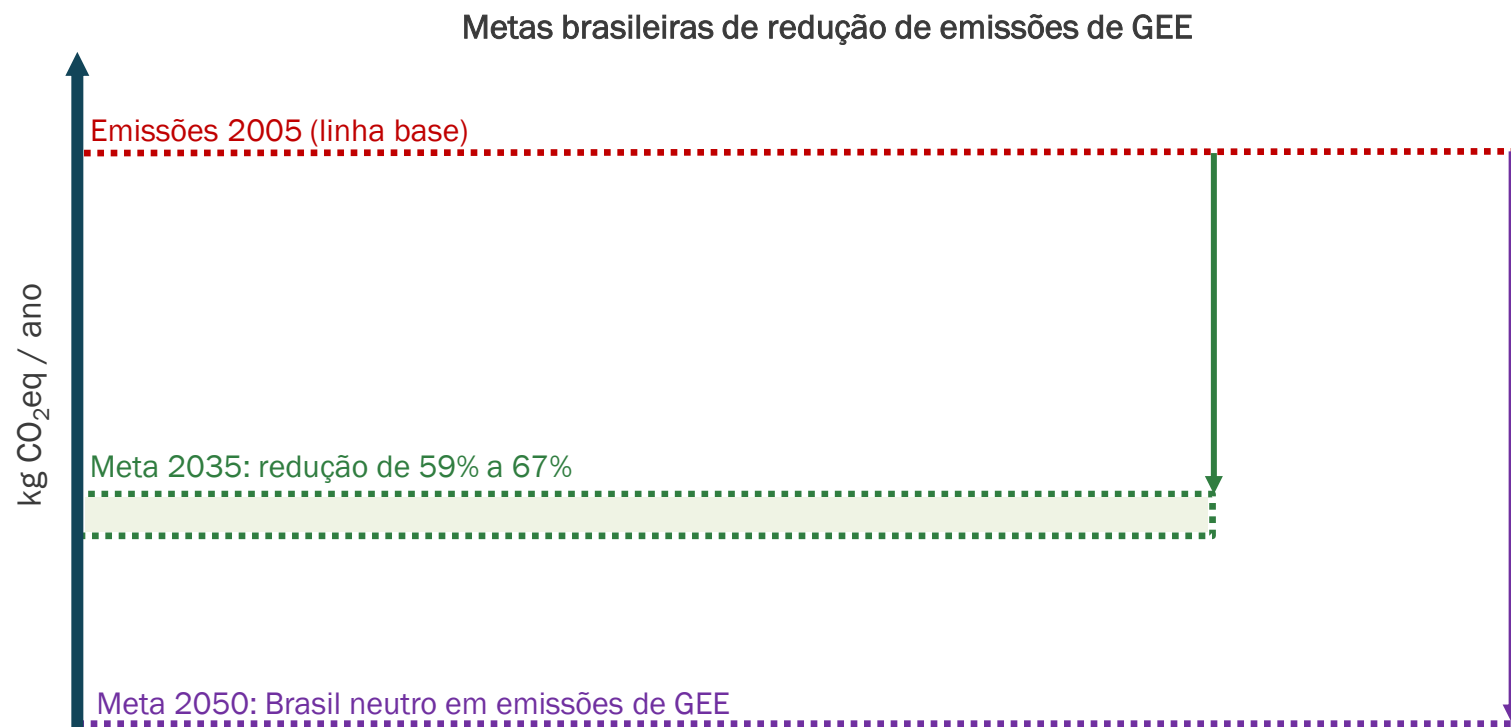


Contextualização

Contribuições Nacionalmente Determinadas

A redução das emissões antrópicas de Gases de Efeito Estufa (GEE)* é um tema central dos esforços internacionais que visam a mitigação global das mudanças climáticas. Nesse âmbito, diversos países se comprometeram, na última década, com Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), estabelecendo metas de redução de emissões.

A **NDC brasileira**, atualizada em 2024, determina uma redução de emissões entre 59% e 67% em 2035, com base nas emissões do país de 2005, e uma economia neutra em emissões de GEE até 2050. **A meta engloba todos os setores da economia.**



Setor de energia para redução das emissões

Apesar do setor de energia ser somente o terceiro maior emissor de GEE da economia brasileira, ele agrega diversas oportunidades e tecnologias para descarbonização com grau de maturidade elevado, podendo representar reduções significativas de emissões em curto e médio prazos e contribuir consideravelmente para o atingimento da NDC brasileira. O desenvolvimento de soluções para descarbonização da energia é amplificado pelo movimento internacional, já que o setor corresponde ao maior emissor global.

O uso e/ou armazenamento de CO₂ biogênico consiste em uma possibilidade estratégica altamente eficaz para reduzir as emissões de GEE da energia, podendo levar até a níveis de emissão negativos no setor (remoção líquida de carbono). Esse potencial pode ser fundamental para atingir a neutralidade até 2050, pois outros segmentos podem ter maior dificuldade para redução de emissões.

Participação setorial nas emissões líquidas no Brasil, em CO₂ equivalente



Fonte: EPE baseada em MCTI 2024



Oportunidades para aproveitamento do CO₂ biogênico

O que é o carbono biogênico?

O carbono é a base de grande parte dos produtos utilizados hoje em diversos ramos da economia:



Combustíveis sólidos,
líquidos e gasosos



Plásticos e polímeros



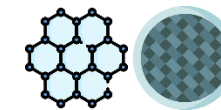
Indústria química



Papel e celulose



Farmacêuticos e
cosméticos



Materiais avançados

etc...

Independentemente da aplicação, o carbono só pode ser obtido a partir de três grandes fontes:



Matéria-prima biológica
(ex. biomassa vegetal ou animal)



Recursos fósseis e minerais
(ex. carvão, petróleo e gás natural)



Diretamente da atmosfera
(ex. CO₂ ou CH₄)

O **carbono biogênico** é definido como aquele que tenha **origem na matéria-prima biológica**.

O carbono biogênico é **renovável** e pode ser utilizado nas mais diversas aplicações, incluindo energia e materiais.

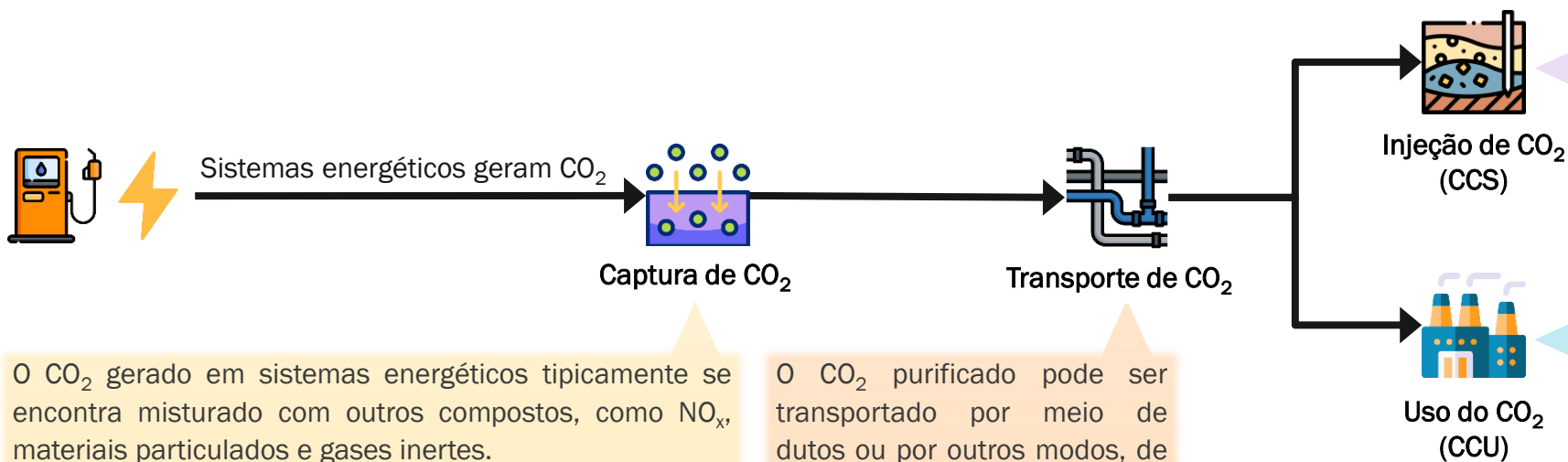
No contexto da **energia**, o carbono biogênico se encontra nos biocombustíveis líquidos e gasosos e na biomassa sólida utilizados na **bioenergia**.

O uso desses energéticos acarreta na geração residual de **CO₂ biogênico**, ou seja, CO₂ contendo carbono biogênico.

Neste caderno, as oportunidades e desafios para **uso econômico do CO₂ biogênico** serão destacadas, assim como a **disponibilidade do recurso** no Brasil.

Aproveitamento do CO₂ em sistemas energéticos

O CO₂ oriundo da produção de energia, tradicionalmente avaliado como resíduo do processo, pode ser melhor aproveitado economicamente:



O CO₂ gerado em sistemas energéticos tipicamente se encontra misturado com outros compostos, como NO_x, materiais particulados e gases inertes.

Portanto, para um melhor aproveitamento do recurso, é **necessário separá-lo e purificá-lo**, gerando correntes que podem ser melhor empregadas à jusante.

Tecnologias típicas de captura de CO₂ incluem absorção, adsorção, separação por membranas e separação criogênica.

A escolha tecnológica depende de aspectos como escala da operação, pureza requerida, concentração inicial de CO₂ e tipo de impureza.

O CO₂ purificado pode ser transportado por meio de dutos ou por outros modos, de forma comprimida.

As características ideais para o transporte **são altamente específicas em cada projeto de captura**, pois dependem fortemente da distância entre o ponto de coleta e o ponto de uso ou injeção, do volume de CO₂ capturado e da infraestrutura disponível.

O CCS* consiste na **injeção permanente do CO₂** capturado em reservatórios geológicos.

O CCS permite uma redução significativa das emissões de gases de efeito estufa dos sistemas energéticos, levando a um potencial ganho econômico dos agentes envolvidos através de mercados de carbono regulados ou voluntários.

O CCU* consiste no **uso do CO₂ como insumo** em processos produtivos.

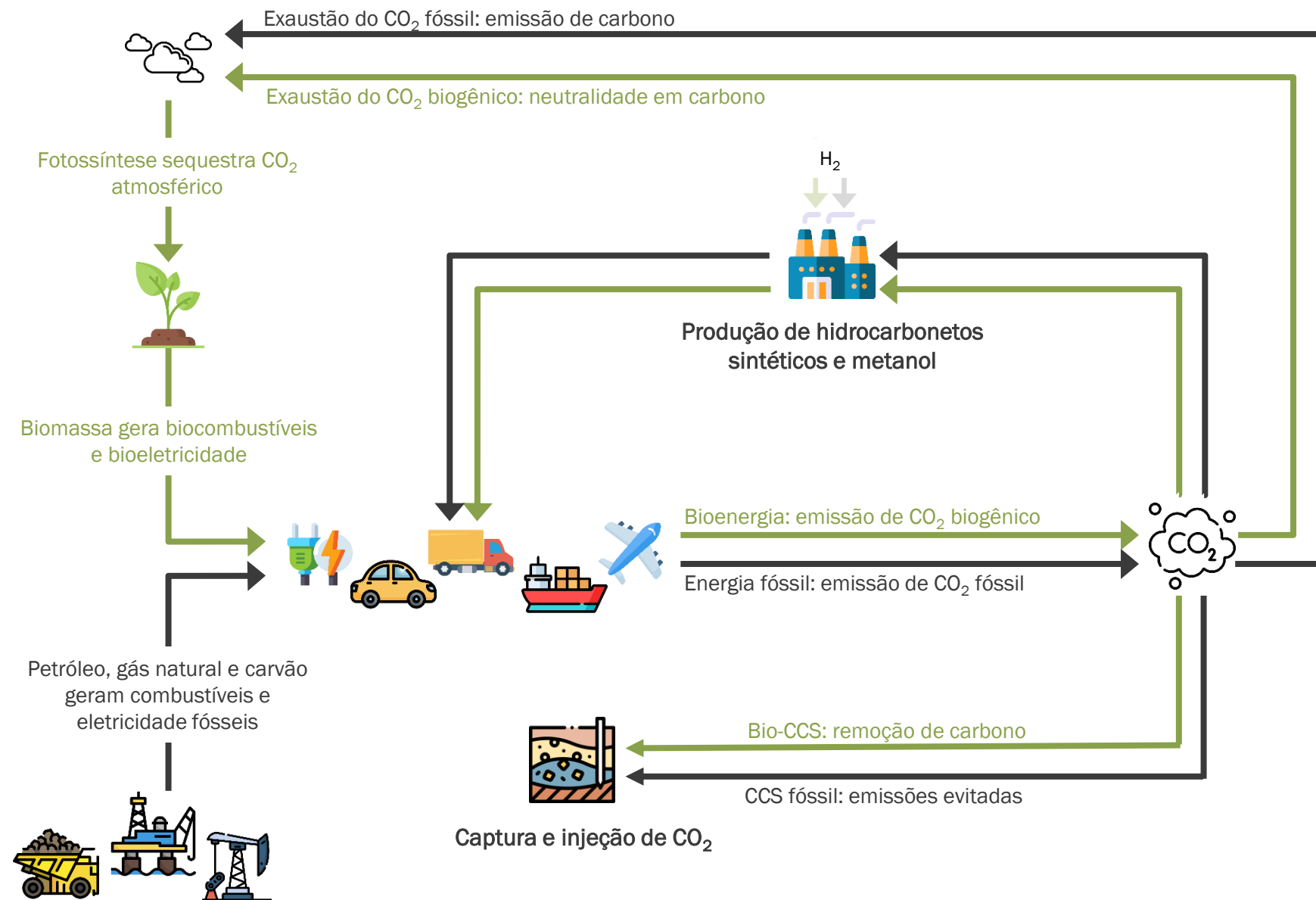
No segmento energético, se destacam reações catalíticas com hidrogênio para a produção de e-metanol ou hidrocarbonetos sintéticos, avaliados como promissores combustíveis avançados para a transição energética.

Pode-se mencionar também aplicações não-energéticas do CO₂, como a carbonatação de bebidas e a produção de ureia, entre outras.

Quando a captura envolve CO₂ biogênico, as operações são nomeadas bio-CCU e bio-CCS (ou BECCU e BECCS*).

Destaca-se também a possibilidade de estratégias mistas, denominadas (bio)-CCUS, nas quais o armazenamento de CO₂ se dá concomitantemente ao seu uso.

Ciclos do carbono em sistemas energéticos


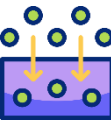



O CO₂ biogênico constitui uma **fonte de carbono renovável**, sequestrado da atmosfera pela fotossíntese. Assim, permite ciclos e processos ambientalmente vantajosos, quando comparado ao fóssil:

- Zero emissões de carbono líquidas, nos casos em que o CO₂ exaurido retorna para a atmosfera;
- Produção de **combustíveis 100% renováveis** em operações de captura e uso do CO₂ (bio-CCU), desde que associado a H₂ também renovável;
- Fluxos de **remoção de carbono com emissões líquidas negativas** em operações que realizem a captura e armazenamento do CO₂ (bio-CCS).

Origens do CO₂ biogênico na bioenergia

O CO₂ biogênico é gerado durante a combustão de biomassa ou biocombustíveis. Ademais, também é disponibilizado em outros elos da cadeia de bioenergia, em condições mais puras:

Fonte de CO ₂ biogênico	Aplicação	Característica da disponibilidade	Concentração típica de CO ₂
 Combustão de biomassa ou biocombustíveis	Cogeração a biomassa (termelétricas) Motores a combustão com biocombustíveis	Estacionária Móvel	Abaixo de 15% (vol/vol)
 Purificação de biogás*	Etapa-chave para produção de biometano	Estacionária	Acima de 85% (vol/vol)
 Fermentação alcoólica	Etapa-chave para produção de etanol, tanto de cana-de-açúcar quanto de milho	Estacionária	Acima de 95% (vol/vol)

A captura de CO₂ em fontes móveis se mostra mais desafiadora do que em fontes estacionárias, seja por desafios técnicos ou pela necessidade de desenvolvimento de modelos de negócio mais arrojados que envolvam outros atores como, por exemplo, postos de combustível.

Correntes de CO₂ mais concentradas constituem matérias-primas mais custo-efetivas para bio-CCU ou bio-CCS por **reduzirem consideravelmente os custos associados à etapa de captura**. A **bioenergia** se destaca por disponibilizar **correntes com altíssima pureza**.

O custo nivelado da captura de uma tonelada de CO₂ pode ser estimado como¹:

- US\$ 25 – 35 para fermentação alcoólica (corrente concentrada);
- US\$ 50 – 100 para termelétricas (corrente diluída);
- US\$ 134 – 342 para captura direta da atmosfera (corrente altamente diluída, ~400 ppm de CO₂).

¹ IEA 2021

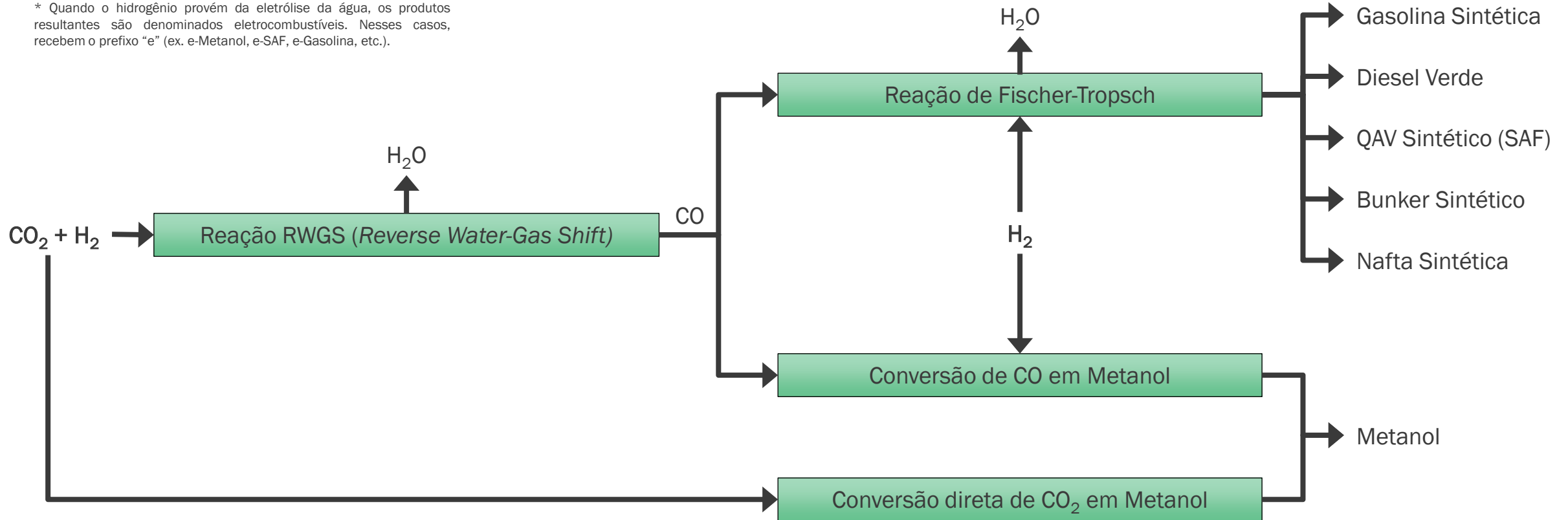
* O biogás é uma mistura gasosa contendo tipicamente metano (35% - 70%), CO₂ (15% - 50%) e outras impurezas (Gupta et al. 2023). Após o processo de purificação, o biogás dá origem a uma corrente de biometano especificada, intercambiável com gás natural, e uma corrente residual rica em CO₂.

Usos energéticos do CO₂



Algumas das operações mais promissoras de bio-CCU envolvem a produção de combustíveis sintéticos. Esses processos se dão por meio de reações químicas catalíticas com hidrogênio*. O produto final obtido depende do catalisador utilizado e das condições de temperatura e pressão do reator:

* Quando o hidrogênio provém da eletrólise da água, os produtos resultantes são denominados eletrocombustíveis. Nesses casos, recebem o prefixo “e” (ex. e-Metanol, e-SAF, e-Gasolina, etc.).



O CO₂ também pode ser injetado em reservatórios de petróleo para aumentar a produtividade dos poços, processo nomeado de recuperação avançada de petróleo (*Enhanced Oil Recovery* – EOR). Se trata de um exemplo de (bio)-CCUS.

Usos não energéticos do CO₂

O CO₂ também possui usos em segmentos não-energéticos, dentre os quais se destacam:



Produção de ureia

A ureia é obtida a partir da reação química do CO₂ com NH₃, se tratando do principal processo industrial consumidor de CO₂ atualmente.



Carbonatação de bebidas

O CO₂ é dissolvido para produção de bebidas gaseificadas, operação consolidada e comum na indústria alimentícia.



Produção de concreto com carbonatos

O CO₂ pode ser usado para a produção de novos concretos contendo carbonatos, de uso ainda incipiente, mas com alto potencial.



Usos na indústria química

Diversos processos que utilizem CO₂ como insumo na indústria química têm sido desenvolvidos, incluindo na produção de polímeros.

Políticas Públicas

Uma série de políticas públicas recentes têm fomentado o desenvolvimento de bio-CCU e bio-CCS no Brasil:



Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio) – Lei nº 13.575/2017

A política nacional dos biocombustíveis prevê um **bônus de até 20% à nota de eficiência energético-ambiental (NEEA) do produtor ou importador de biocombustível que comprove emissões negativas de gases de efeito estufa**, estimulando a adoção de sistemas de bio-CCS.

Lei do Combustível do Futuro – Lei nº 14.993/2024

A Lei do Combustível do Futuro **introduziu oficialmente a captura, utilização e estocagem geológica de dióxido de carbono ao arcabouço legal brasileiro**. Atualmente, a Consulta Pública nº 205 de 17/11/2025 do Ministério de Minas e Energia propõe um decreto adicional para detalhamento da lei em aspectos relacionados às atividades de CCS. Até o momento, os principais avanços da lei incluem:

- Definição legal das atividades de “captura de dióxido de carbono”, “estocagem geológica de dióxido de carbono” e “combustíveis sintéticos”;
- Inclusão dos combustíveis sintéticos e reconhecimento da captura e estocagem de dióxido de carbono como estratégia de mitigação de emissões de gases de efeito estufa na Política Energética Nacional;
- **Indicação da Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) como o agente autorizador e regulador para as atividades de captura, utilização e estocagem de dióxido de carbono;**
 - A Resolução ANP nº 859/2024 autoriza que, em caráter transitório, a análise de projetos relacionados à atividade de captura e estocagem de carbono seja feita através de mecanismo de regulação experimental por projeto-piloto, conforme as regras estabelecidas em relatório de 2024. Esse mecanismo prevê segurança jurídica aos empreendimentos que têm se estabelecido ou se estabelecerão enquanto as definições regulatórias definitivas são construídas e permite a participação ativa dos empreendedores no desenho regulatório.

COMBUSTÍVEL DO FUTURO

Programa de aceleração da transição energética (Patén) – Lei nº 15.103/2025

O PATEN incluiu os combustíveis sintéticos de baixa emissão de carbono e as atividades de captura e armazenamento de carbono como setores prioritários aderentes ao programa, permitindo aos projetos acessar **financiamento do Fundo Verde (BNDES) e mecanismos de transação tributária condicionada ao investimento em desenvolvimento sustentável**.



Plano Clima Mitigação – Plano Setorial Energia

As operações de bio-CCS aparecem como muito relevantes para o atingimento das metas do Plano Clima Mitigação para energia.

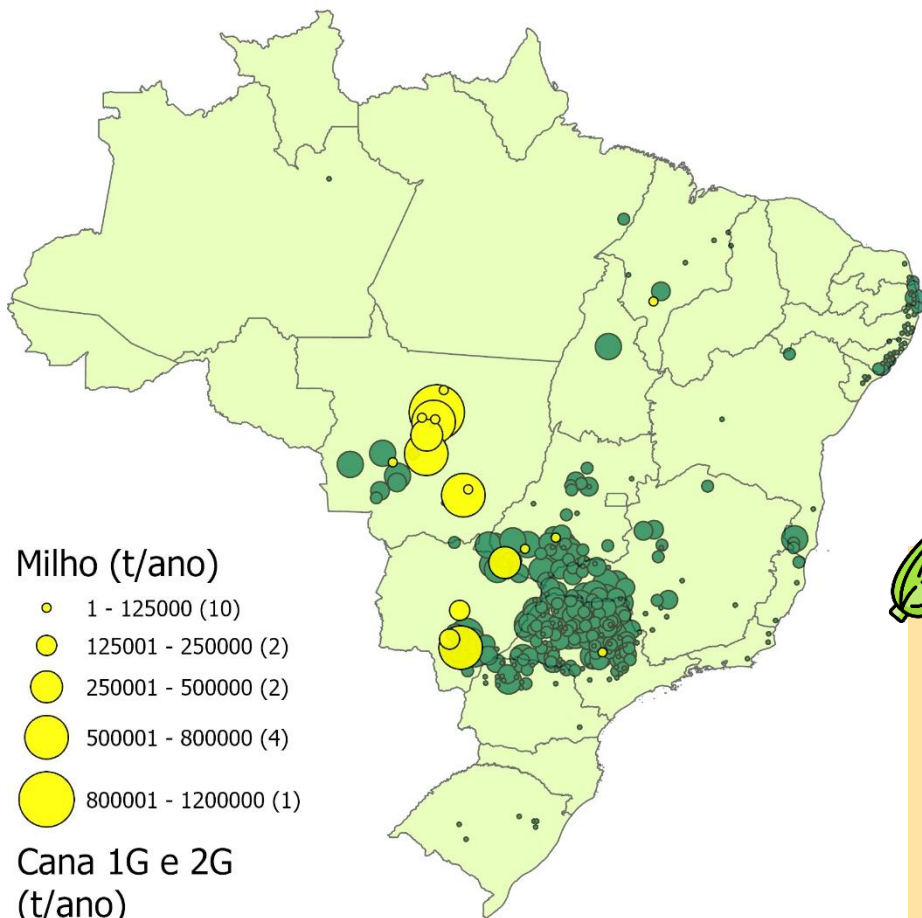
O plano menciona como resultados esperados, por exemplo, a implementação de plantas-piloto de bio-CCS até 2030 e a expansão de dutos de CO₂ com identificação de sítios de armazenamento para CCS até 2035. O aumento da produção de combustíveis sintéticos é também mencionado como objetivo do plano.



Disponibilidade de CO₂ biogênico no território brasileiro

Disponibilidade imediata de CO₂ – Fermentação Alcólica

Disponibilidade Imediata de CO₂ (Fermentação)



Milho (t/ano)

- 1 - 125000 (10)
- 125001 - 250000 (2)
- 250001 - 500000 (2)
- 500001 - 800000 (4)
- 800001 - 1200000 (1)

Cana 1G e 2G (t/ano)

- 1 - 35000 (132)
- 35001 - 70000 (94)
- 70001 - 125000 (76)
- 125001 - 250000 (40)
- 250001 - 500000 (5)

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, apresentando um grande e distribuído parque de usinas. O processo de fermentação alcólica produz cerca de 0,7 a 0,75 kg de CO₂ / l de Etanol.

Por se tratar de CO₂ de alta pureza, pode-se considerar que essas correntes constituem uma disponibilidade imediatamente aproveitável de carbono biogênico, sem a necessidade de grandes investimentos para captura.

De acordo com a produção de 2024, a disponibilidade de CO₂ biogênico de fermentação é de:



Milho (6,4 Mt / ano)*

Usinas de milho operam de forma contínua ao longo do ano, garantindo o fornecimento de CO₂ e facilitando seu aproveitamento.

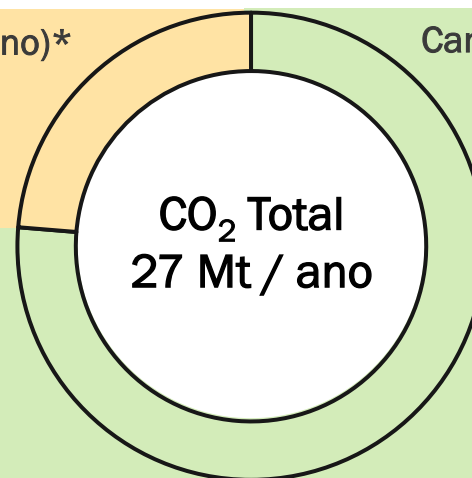
Muitas usinas de milho possuem escalas de operação elevadas, o que pode facilitar a implementação de projetos próprios.



Cana de Açúcar (20,6 Mt / ano)

A grande concentração geográfica de usinas de cana entre os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Goiás pode facilitar a implementação de *hubs* de captura.

Entretanto, a sazonalidade da disponibilidade de CO₂, atrelada à safra de cana, pode representar desafios para seu aproveitamento.



* Usinas que processam cana e milho (*flex*) foram incluídas na categoria “milho” por também possuírem a vantagem de não estar restritas à sazonalidade para disponibilidade de CO₂.

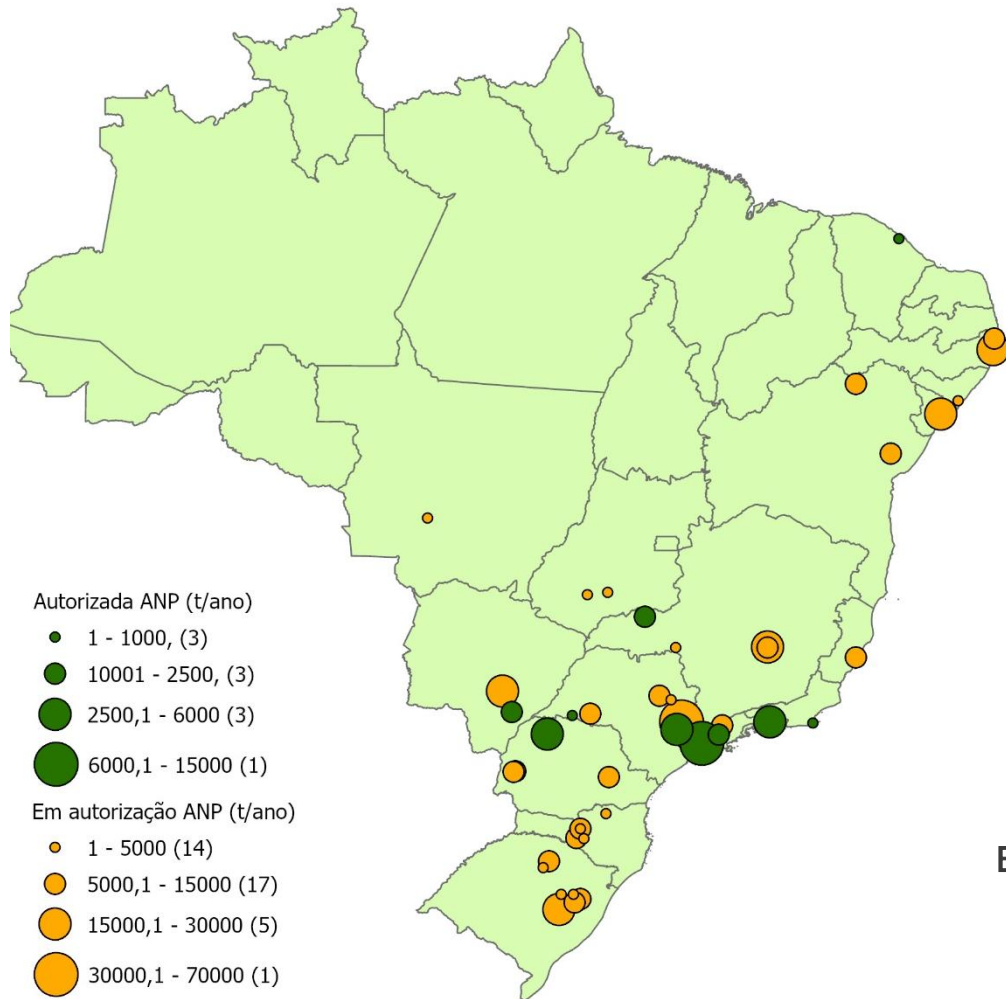
Disponibilidade imediata de CO₂ – Purificação de Biogás

Disponibilidade Imediata de CO₂ (Biometano)

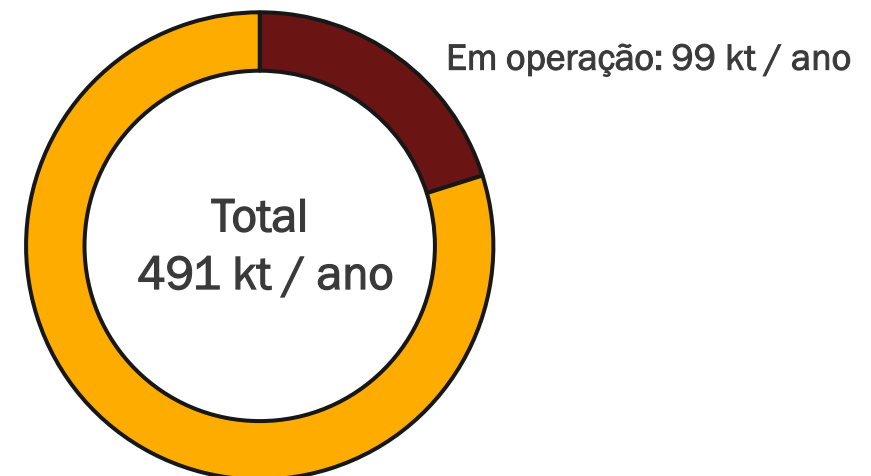
O biometano tem ganhado cada vez mais escala como bioenergético emergente para a transição energética brasileira. O biometano é diretamente intercambiável com o gás natural e pode ser usado nas mesmas aplicações, sendo um energético altamente versátil.

O biometano é obtido da purificação de biogás, mistura de metano e CO₂. Assim, o gás residual da purificação é altamente concentrado em dióxido de carbono, representando também uma disponibilidade imediatamente aproveitável de carbono biogênico.

De acordo com a produção de 2024, a disponibilidade imediata de CO₂ biogênico oriundo de usinas de biometano e a disponibilidade futura em usinas em processo de autorização na ANP é de*:



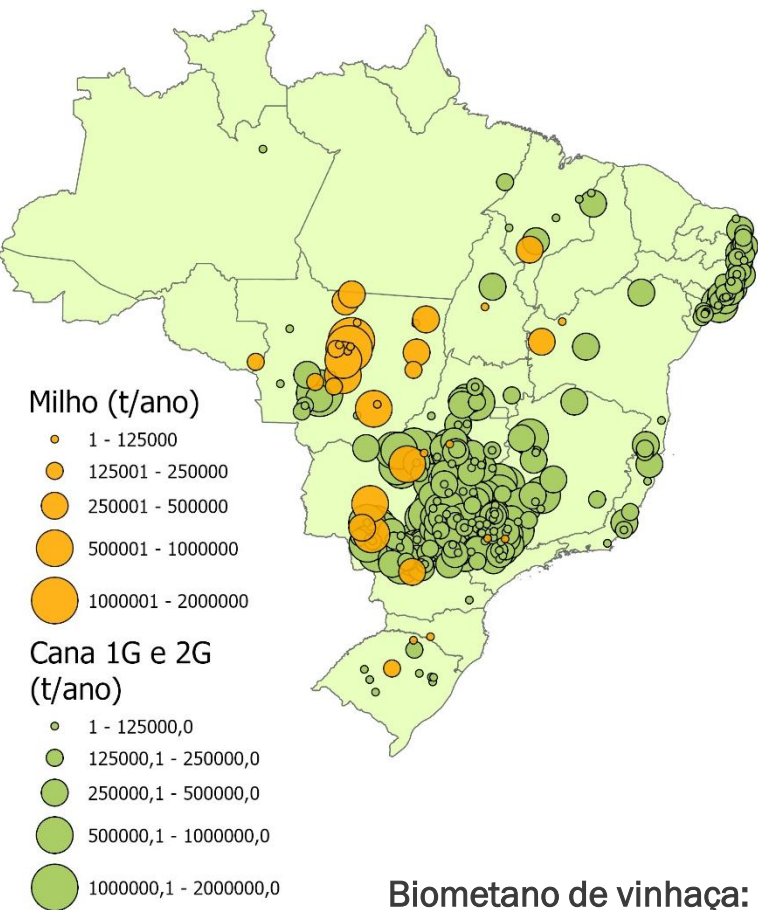
Em autorização: 392 kt / ano



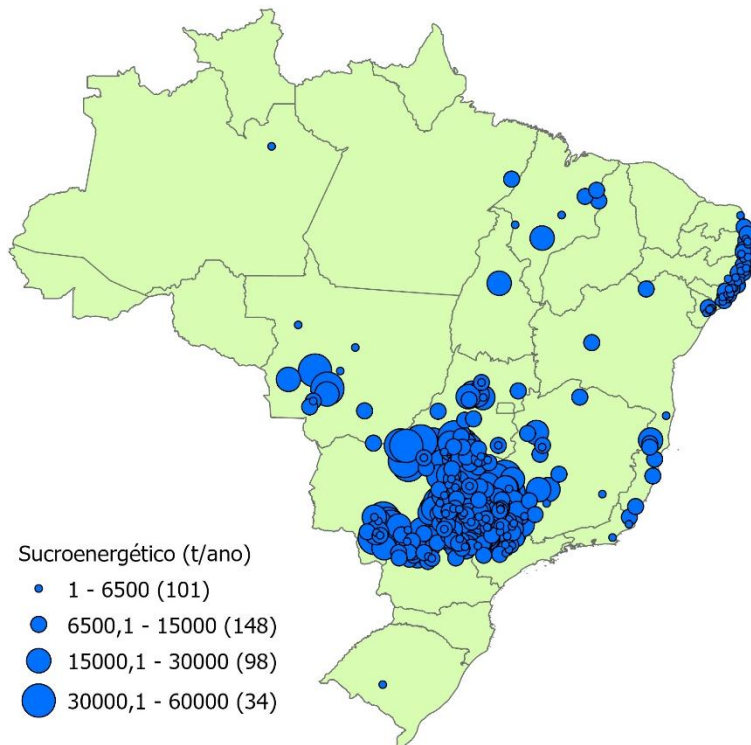
* Os valores se baseiam em dados de produtividade fornecidos pela ANP que desconsideram consumo próprio. Assim, podem estar subestimados.

Disponibilidade potencial adicional de CO₂ no setor de etanol

Disponibilidade adicional de CO₂:
cogeração em usinas de etanol

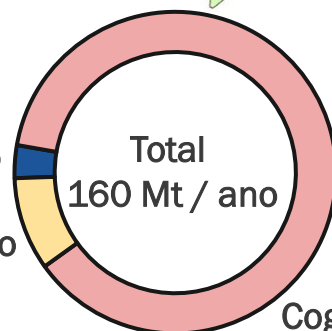


Disponibilidade adicional de CO₂:
biometano de vinhaça e torta de filtro



Biometano de vinhaça: 5,3 Mt / ano

Cogeração cavaco: 15 Mt / ano



Cogeração bagaço: 140 Mt / ano*

Para além da disponibilidade imediata, usinas de etanol possuem o potencial de fornecer quantidades significativamente maiores de CO₂ biogênico a partir de:

- Captura em operações de cogeração a biomassa, que consistem no uso de biomassa em caldeiras para geração de energia elétrica e térmica. Usinas de cana utilizam bagaço como biomassa, enquanto usinas de milho utilizam, tipicamente, cavacos de madeira;
- Produção de biometano a partir de biogás de vinhaça e torta de filtro, em usinas de cana.

A disponibilização dessas correntes adicionais de CO₂ exige um investimento mais expressivo por parte das usinas, seja por meio da implementação de sistemas de captura pós-combustão, mais robustos, ou pela instalação de unidades de produção de biometano.

Outros setores que produzem bioeletricidade também apresentam potencial, como o de papel e celulose.

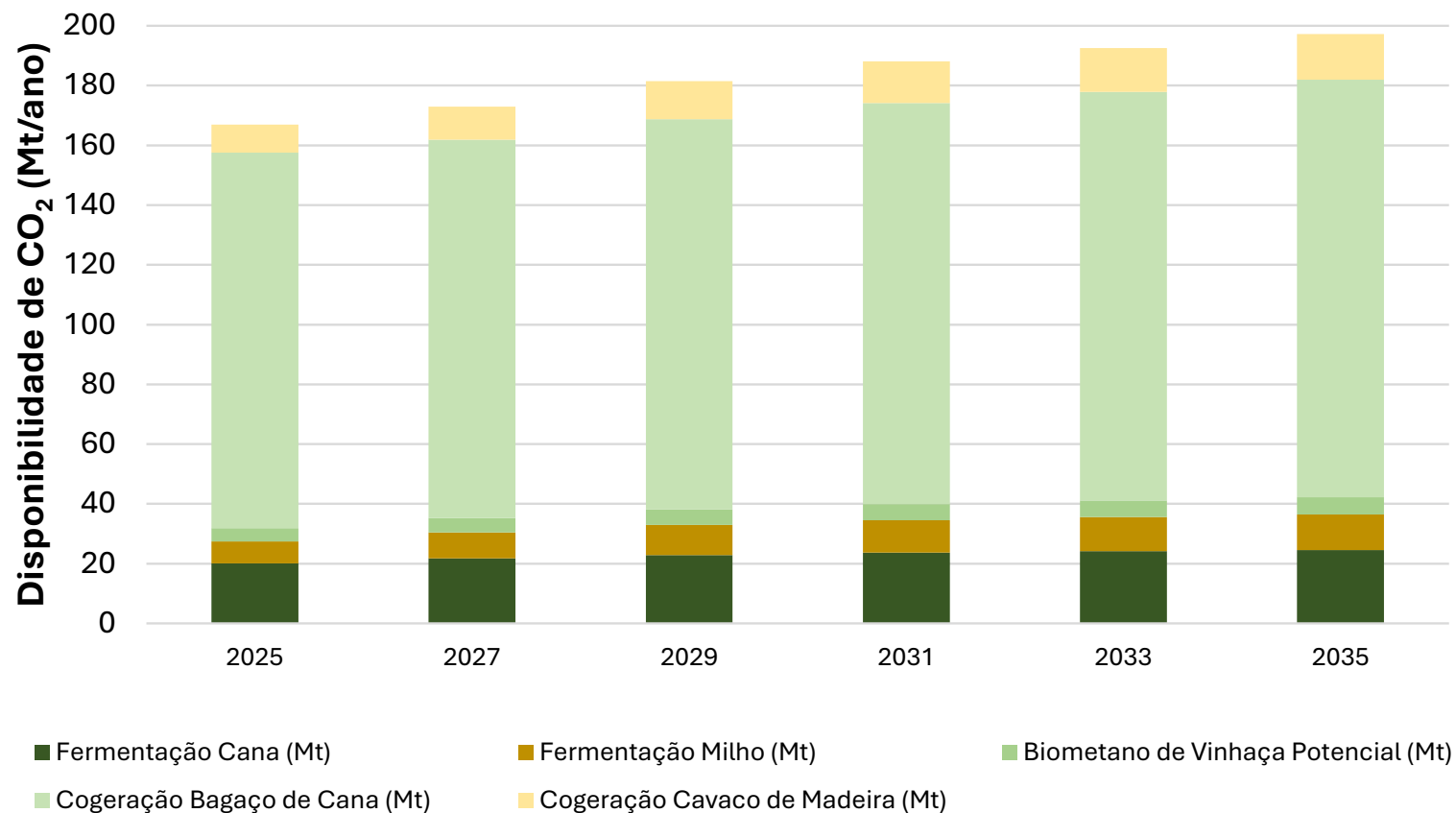
* A cogeração de bagaço inclui também a fração de cana destinada à produção de açúcar, o que justifica seu volume elevado.

Potencial atual e futuro de CO₂ no setor de etanol

A disponibilidade anual de CO₂ biogênico proveniente do setor de etanol pode chegar a 197 Mt em 2035:

- 36 Mt de CO₂ de fermentação, sendo 67% de usinas de etanol de cana e 33% de usinas de etanol de milho;
- 6 Mt de CO₂ oriundo da purificação de biometano de vinhaça e torta de filtro em usinas de etanol de cana, considerando a hipótese de conversão total desses resíduos;
- 155 Mt de CO₂ de cogeração, sendo 90% oriundo do uso de bagaço de cana e 10% oriundo do uso de cavaco de madeira em usinas de etanol de milho.

Projeção de disponibilidade imediata e potencial de CO₂ biogênico em usinas de etanol de cana e de milho até 2035

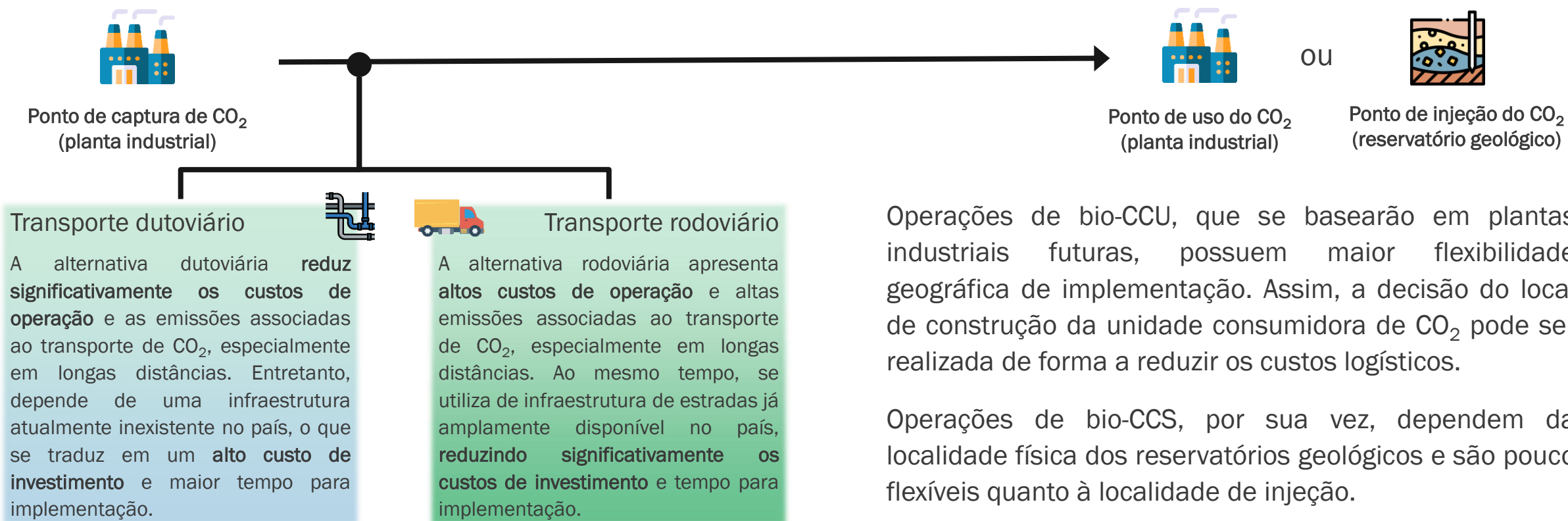




Desafios para o aproveitamento do CO₂ biogênico

Desafios logísticos

Em função das grandes distâncias geográficas características do Brasil, o transporte de CO₂ entre seu ponto de coleta e seu local de uso e/ou injeção pode representar um gargalo logístico para implementação de operações de bio-CCU e bio-CCS.



Transporte dutoviário

A alternativa dutoviária **reduz significativamente os custos de operação** e as emissões associadas ao transporte de CO₂, especialmente em longas distâncias. Entretanto, depende de uma infraestrutura atualmente inexistente no país, o que se traduz em um **alto custo de investimento** e maior tempo para implementação.

Transporte rodoviário

A alternativa rodoviária apresenta **altos custos de operação** e altas emissões associadas ao transporte de CO₂, especialmente em longas distâncias. Ao mesmo tempo, se utiliza de infraestrutura de estradas já amplamente disponível no país, **reduzindo significativamente os custos de investimento** e tempo para implementação.

Operações de bio-CCU, que se basearão em plantas industriais futuras, possuem maior flexibilidade geográfica de implementação. Assim, a decisão do local de construção da unidade consumidora de CO₂ pode ser realizada de forma a reduzir os custos logísticos.

Operações de bio-CCS, por sua vez, dependem da localidade física dos reservatórios geológicos e são pouco flexíveis quanto à localidade de injeção.

Desafio Informacional



O conhecimento geológico das localidades potenciais para injeção de CO₂ é limitado, especialmente nas regiões interiorizadas do Brasil.

O desenvolvimento de atividades de prospecção geológica continental acrescenta custos e riscos para a implementação de operações de bio-CCS.

Saiba mais:



O Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás, publicado a cada 2 anos pela EPE, traz o mapeamento do potencial brasileiro de injeção de CO₂.

Desafios tecnológicos

Aprimoramentos tecnológicos são essenciais para redução dos custos de todas as etapas das cadeias de bio-CCU e bio-CCS.

Destacadamente, a captura consiste usualmente na etapa mais custosa em operações que utilizem CO₂ oriundo de cogeração, diluído em gases de exaustão. Diferentes tecnologias podem ser aplicadas a essa etapa do processo, cada uma com desafios específicos para melhoria tecnológica e redução de custos:

Tecnologia	Descrição simplificada do processo	Principal desafio tecnológico para uso em correntes pós-cogeração
Absorção química	É a tecnologia mais comumente aplicada para captura de CO₂ em gases de exaustão na escala típica de termelétricas. O CO ₂ é quimicamente absorvido por um solvente, tipicamente um líquido aminado. Na sequência, o solvente é regenerado através do aumento da temperatura para recuperação do gás e reciclo do solvente.	Uma grande quantidade de energia é requerida para regeneração do solvente, o que representa o principal fator de custo do processo.
Absorção física	É uma tecnologia que possui representatividade industrial, mas principalmente em operações de captura pré-combustão. Se baseia em um ciclo similar ao da absorção química, mas que ocorre em temperaturas menores e pressões maiores.	A absorção física exige pressurização e resfriamento das correntes pós-combustão, representando alto consumo energético, custo e dificuldade para otimização térmica.
Adsorção	É uma tecnologia utilizada industrialmente, mas tipicamente em escalas de operação menores que as exigidas em sistemas pós-combustão. O CO ₂ é capturado por um adsorvente sólido, que na sequência é regenerado por aumento de temperatura ou redução de pressão.	Processo enfrenta dificuldades para escalonamento em escalas típicas de termelétricas.
Separação por membranas	É uma tecnologia com nível de maturidade menos elevado, mas existem exemplos de fornecedores com membranas operacionais para captura de CO ₂ . Esses materiais só permitem a passagem dessa molécula, separando-a, assim, do gás de exaustão.	Processo enfrenta dificuldades para escalonamento em escalas típicas de termelétricas. Membranas comuns possuem temperaturas de operação mais baixas que as requeridas para gases pós-combustão.

Fonte: EPE baseada em [Hekmatmehr et al. \(2024\)](#).

Para bio-CCU energético, destaca-se também a necessidade de aprimoramento tecnológico dos processos de conversão de CO₂ e H₂, especialmente no que diz respeito à síntese de Fischer-Tropsch (SAF, Diesel Verde, etc.) e à conversão direta dos insumos em metanol.

Desafios regulatórios e de mercado

O desenvolvimento amplo de atividades de captura, transporte, uso e/ou injeção de CO₂ no Brasil ainda depende de uma série de definições regulatórias e incentivos para formação de mercados consolidados.



Apesar da Lei do Combustível do Futuro representar um avanço importante ao definir a ANP como agente regulador para a captura, uso e injeção de CO₂, ainda são necessárias especificações técnicas para **garantir segurança regulatória a essas atividades**.

Por exemplo, ainda precisam ser desenvolvidos detalhes sobre os critérios amplos para permissão de operação, incluindo etapas de captura, injeção, monitoramento e responsabilização (curto e longo prazos), licenciamento ambiental, etc.



A formação de mercados consolidados e com escala para o CO₂ biogênico depende da justa valoração do ganho ambiental proporcionado pelas atividades de uso e/ou armazenamento do gás carbônico. Para tanto, são necessários avanços que garantam a demanda efetiva pelo produto, de forma a justificar investimentos nestas atividades.

Pode haver uma competição pelo CO₂ biogênico para uso ou injeção. O destino do insumo dependerá dos mecanismos de mercado desenvolvidos em cada caso.

A regulação dos mercados para o CO₂ biogênico ainda é uma questão em aberto, em muitos casos, e possui papel crucial para a formação de demanda competitiva e firme pelo produto.

No Brasil, a Lei 15.042/2024 instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), que pode ser um mecanismo decisivo no desenvolvimento de mercados de carbono regulados e consolidados no país. Entretanto, ainda é necessário definir as regulações específicas para início de operação desse mercado.

Em âmbito internacional, uma série de programas têm sido desenvolvidos para criação de mercados para produtos que usem CO₂ biogênico ou que armazenem o gás durante o processo produtivo. No caso de aplicações energéticas, como a produção de metanol ou SAF, a competitividade dos combustíveis em tais programas passa pela definição das premissas usadas no cálculo de suas intensidades de carbono (IC), atualmente em definição para diversas rotas.

A definição das premissas para cálculo da IC e bonificação de operações de bio-CCS também está atualmente em aberto na Política Nacional dos Biocombustíveis (Renovabio).



Panorama internacional de captura, utilização e armazenamento de CO₂ biogênico

Panorama global de bio-CCS/bio-CCUS

Hoje, há **6 plantas de bio-CCS/bio-CCUS operacionais** no mundo, com uma capacidade total de captura de **2,03 Mt CO₂ / ano** (4,1% da capacidade operacional de CCS/CCUS)

Projeto	País	Capacidade (tCO ₂ /ano)	Fonte do CO ₂	Destinação do CO ₂
Illinois Industrial	EUA	1.000.000	Fermentação (milho)	CCS
Arkalon Ethanol	EUA	310.000	Fermentação (milho)	CCUS (EOR)
Blue Flint Ethanol	EUA	200.000	Fermentação (milho)	CCS
GEVO	EUA	180.000	Fermentação (milho)	CCS
Mikasa Power Plant	Japão	180.000	Cogeração (resíduos de palma)	CCS ¹
Bonanza Bioenergy	EUA	160.000	Fermentação (milho)	CCUS (EOR)

¹ Projeto em fase de demonstração, ainda sem envio para destinação final do CO₂

De acordo com os projetos anunciados, a capacidade esperada até 2032 é de:

- **Em construção: 4,35 Mt CO₂ / ano** (4,4% da capacidade total em obras de CCS/CCUS)
- **Total planejada: 80,72 Mt CO₂ / ano** (14,2% da capacidade anunciada de CCS/CCUS)

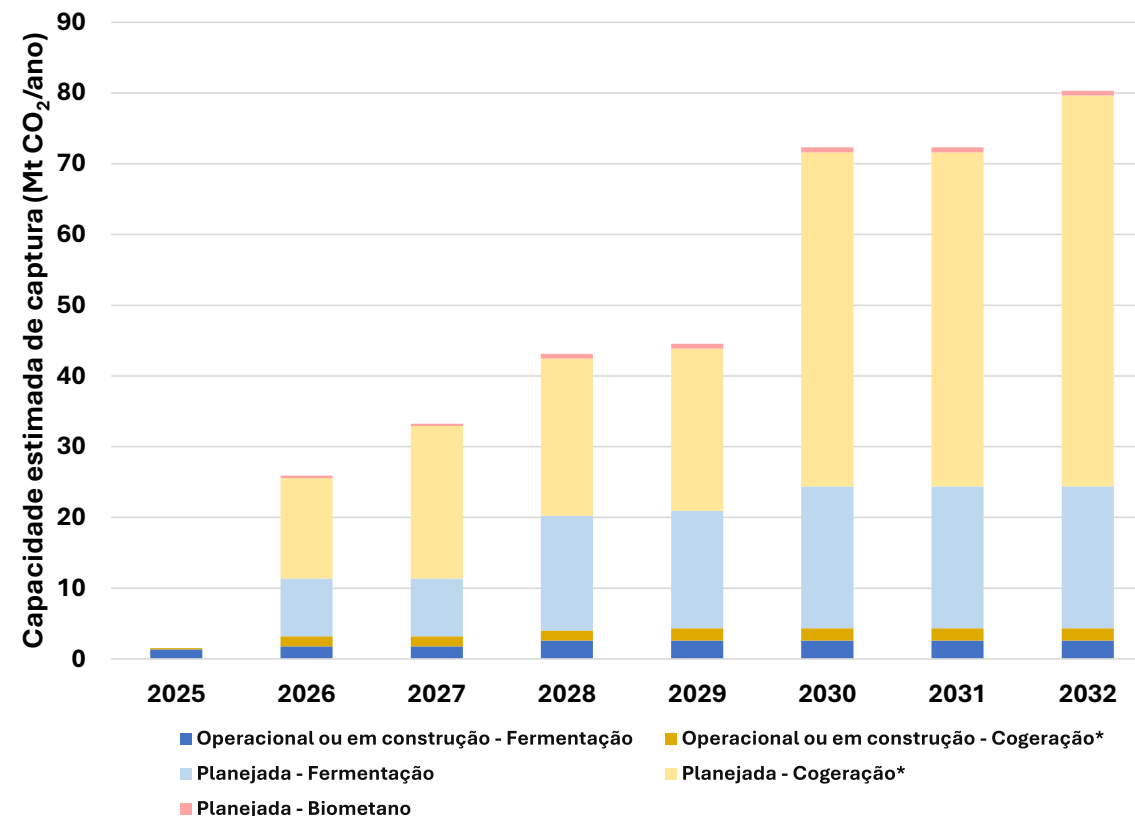
Estados Unidos
 40,7 Mt CO₂ / ano
 51% Cogeração (8 projetos)
 49% Fermentação (46 projetos)
 Sem projetos de biometano



Europa
 36,6 Mt CO₂ / ano
 95% Cogeração (32 projetos)
 3% Fermentação (2 projetos)
 2% Biometano (3 projetos)

Brasil
 1,8 Mt CO₂ / ano
 100% fermentação (milho)

Capacidade de bio-CCS/bio-CCUS operacional e anunciada no mundo



* Inclui projetos de resíduos para energia (*waste-to-energy*), que podem, em alguns casos, misturar frações de carbono não-biogênico ao CO₂ capturado.

Fonte: EPE baseada em IEA e comunicações pessoais.

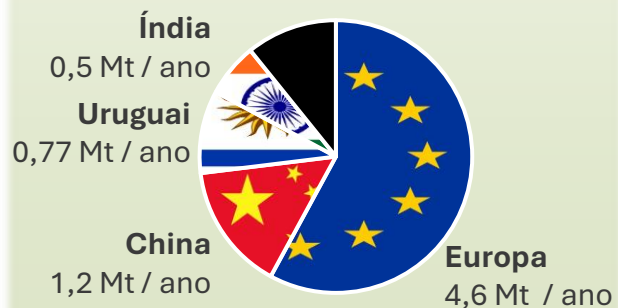
A capacidade média de projetos de cogeração é de 1.335 tCO₂ / ano, ante 435 tCO₂ / ano para fermentação. A maior escala, típica de projetos de bioeletricidade, **pode compensar o maior custo de captura** associado à menor concentração das correntes de exaustão.

Panorama global de bio-CCU no setor energético

A produção de e-metanol e e-SAF com uso de CO₂ biogênico ainda é incipiente no mundo, com somente quatro projetos operacionais reportados, todos em **escala piloto**.

A capacidade esperada até 2031 de bio-CCU para **e-metanol** é de:

- **Em construção: 0,29 Mt Metanol / ano** (cerca de 0,40 Mt CO₂ consumido / ano)
- **Total planejada: 8,1 Mt Metanol / ano** (cerca de 11,1 Mt CO₂ consumido / ano)



A capacidade esperada até 2031 de bio-CCU para **e-SAF** é de:

- **Em construção: 0,014 Mt SAF / ano** (cerca de 0,04 Mt CO₂ consumido / ano)
- **Total planejada: 2,3 Mt SAF / ano** (cerca de 7,3 Mt CO₂ consumido / ano)



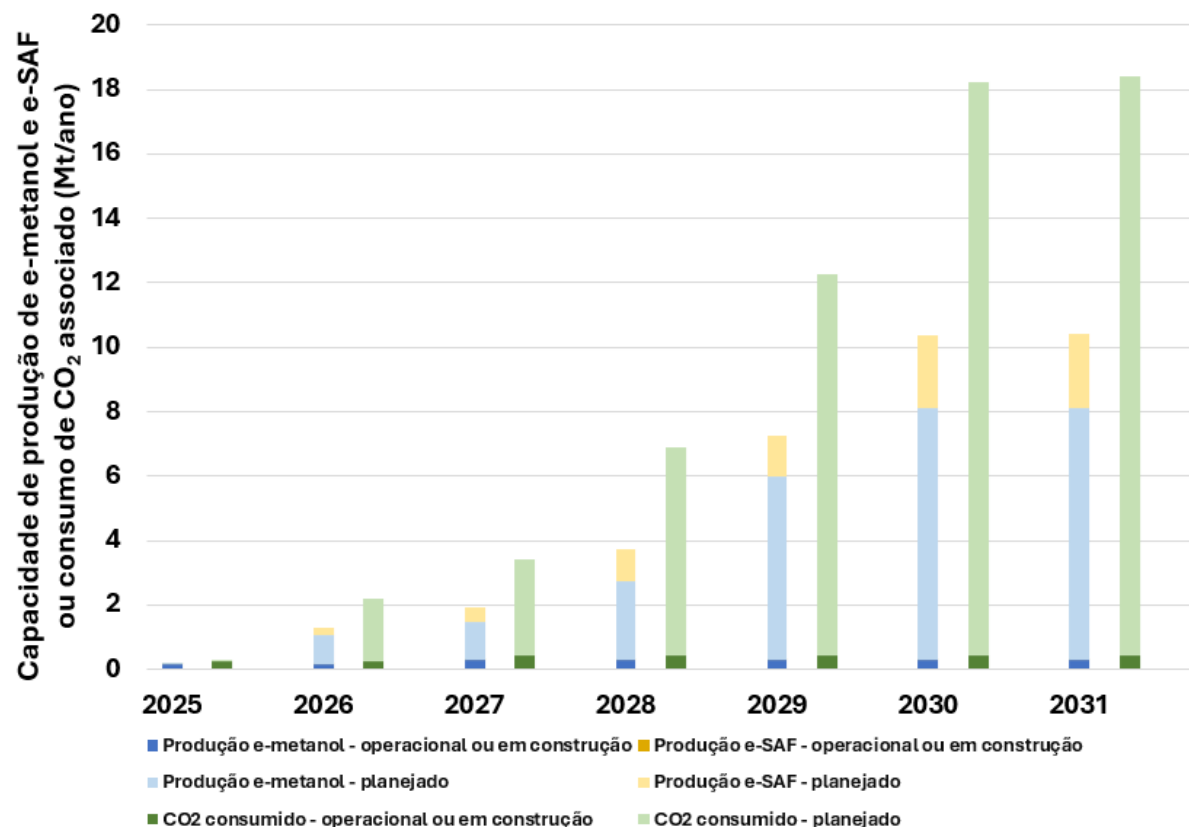
No Brasil, a chamada pública BNDES/FINEP “Planos de Negócios para investimentos em combustíveis de aviação e navegação de baixo carbono”, de 2024, **recebeu 11 projetos envolvendo bio-CCU para e-metanol, com capacidade total de aproximadamente 0,79 Mt Metanol / ano**. Esta chamada capta intenção em projetos ainda não oficialmente anunciados.

O CO₂ dos projetos se origina de operações de:

- Fermentação: 0,53 Mt CO₂ consumido / ano
- Biometano: 0,48 Mt CO₂ consumido / ano
- Cogeração: 0,39 Mt CO₂ consumido / ano

Para SAF, os principais projetos da chamada focam em outras rotas produtivas que não envolvem o uso de CO₂ biogênico.

Capacidade de bio-CCU para e-metanol e e-SAF operacional e anunciada no mundo*



* Incluídos somente projetos para os quais foram identificados anúncios públicos de intenção de uso de CO₂ biogênico, ao menos parcialmente. Há outros projetos de e-metanol renovável e e-SAF divulgados para os quais a fonte de CO₂ não foi especificada, somando uma capacidade anual adicional potencial de bio-CCU de 13 Mt de e-metanol e 1,6 Mt de e-SAF.

Fonte: EPE baseada em [Methanol Institute](#), [ICAO](#), [eFuel Alliance](#) e [T&E](#)

Exemplo de implementação: *Summit Carbon Solutions*

Um exemplo proeminente de implementação de um *hub* de captura e armazenamento de CO₂ biogênico é o projeto operado pela empresa Summit Carbon Solutions, dos Estados Unidos.

Está sendo realizada a construção de mais de 4.000 km de dutos para coleta e transporte de CO₂ em 57 plantas ao longo de 5 estados norte-americanos, a grande maioria constituindo CO₂ biogênico oriundo da produção de etanol de milho. A injeção ocorrerá em reservatórios geológicos no estado da Dakota do Norte.

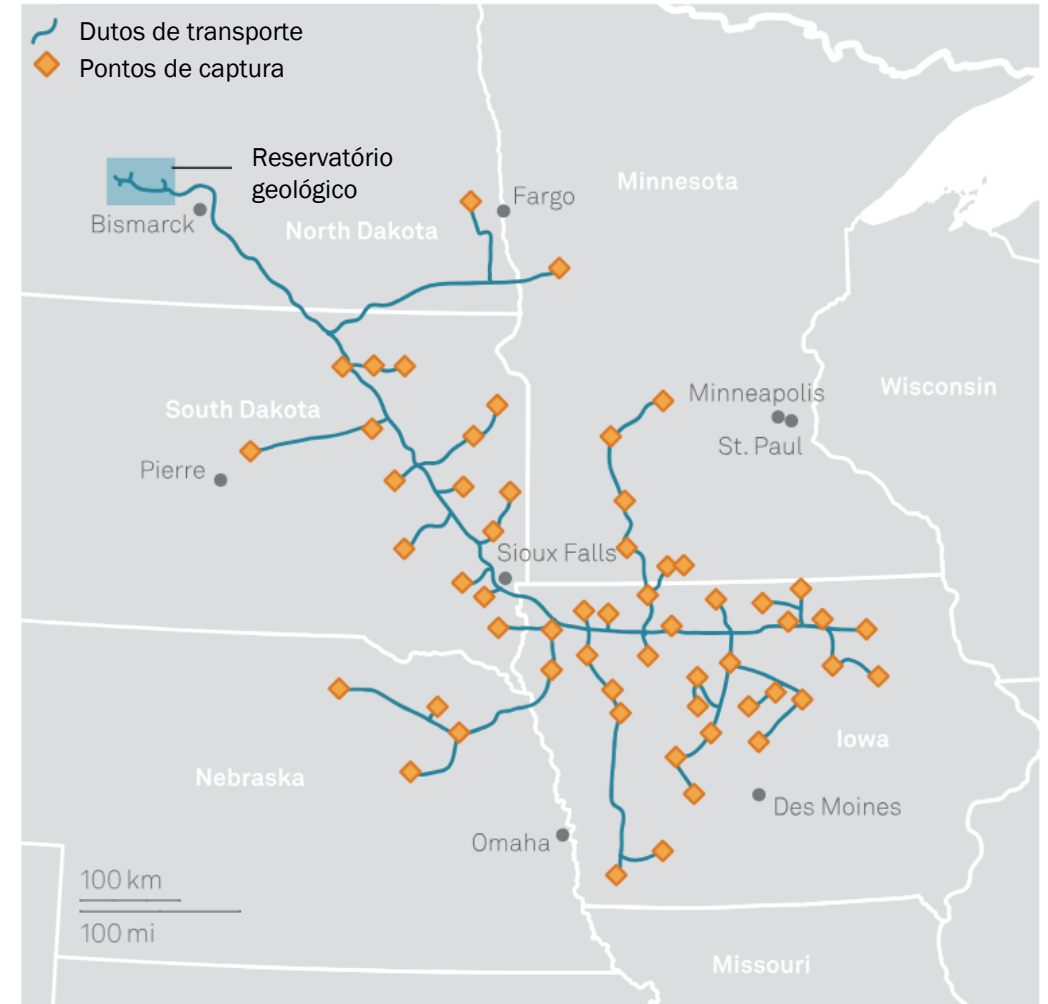
O sistema, com previsão de finalização de obras em 2027, é projetado para operar com capacidade de até 18,5 Mt CO₂ / ano.

A empresa se aproveita dos significativos avanços regulatórios recentes da atividade de CCS no estado da Dakota do Norte, da proximidade geográfica das plantas de etanol de milho e dos incentivos fiscais à atividade nos Estados Unidos (ex. créditos 45Q) para viabilizar a operação.

O modelo de negócios baseado em *hubs* de captura, com um operador responsável pela coleta de CO₂ em diferentes pontos de disponibilidade, permite considerável ganho de escala e compartilhamento de risco.

Modelos similares poderiam ser implementados no Brasil, dada a concentração geográfica das usinas fornecedoras de CO₂ biogênico.

A viabilidade dessas operações, entretanto, ainda depende da estruturação de arcabouços regulatórios mais avançados e desenvolvimento de mercados sólidos, uma vez que projetos similares exigem investimentos robustos.



Fonte da imagem: adaptado de [S&P Global \(2024\)](#)



Considerações finais



O desafio de diminuir as emissões antrópicas de GEE é o motivador para a busca de novas estratégias de mitigação dos países signatários dos Acordos Climáticos, como o Brasil.

O aproveitamento econômico do CO₂ biogênico pode contribuir para que o Brasil atinja esse objetivo. Esse recurso pode ser injetado em reservatórios geológicos ou utilizado em processos produtivos, para usos energéticos ou não energéticos.



O Brasil tem avançado na construção de um arcabouço legal que suporte essa estratégia. Políticas públicas recentes, como o RenovaBio e o Combustível do Futuro, além do PATEN e Plano Clima, abordam esse tema.

Há um grande potencial nacional de disponibilização de CO₂ biogênico. As principais oportunidades envolvem a fermentação alcoólica e a purificação do biogás (em termos de facilidade de captura) e a cogeração a biomassa (em termos de volume).



Alguns desafios ainda precisam ser suplantados para desenvolvimento efetivo dessas oportunidades no Brasil, como os entraves logísticos, melhorias tecnológicas para redução de custo, definições regulatórias e consolidação de mercados.

O consumo de CO₂ biogênico para armazenamento ou uso tem perspectiva de crescimento acelerado no âmbito internacional. Experiências externas podem ser inspiradoras para implementação de soluções adaptadas à realidade nacional.





BIOS



Agradecimentos

Agradecemos às instituições BNDES, Ministério de Minas e Energia e FS Bioenergia pelo fornecimento de informações, dados e contribuições técnicas, fundamentais para a elaboração deste estudo. Agradecemos também os colegas da SPG, com quem realizamos trabalhos sobre o tema.

Siga a EPE nas redes sociais e mídias digitais:



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

