

Transformando o Dióxido de Carbono (CO₂) - Uma Estratégia para a Descarbonização

Rafael Pavão das Chagas*
Sérgio Granato de Araújo**

O dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás de efeito estufa (GEE) e o maior responsável pela intensificação das mudanças climáticas desde a era pré-industrial, marco de referência climático situado em meados do século XIX. Em 2024, o mundo emitiu ~**53 Gt** de CO₂e (excluindo o setor LULUCF¹), sendo ~**75%** apenas de CO₂ fóssil [EDG, 2025].

Trata-se de um gás essencial à fotossíntese, que sustenta a cadeia alimentar, e fonte de oxigênio. Contudo, seu acúmulo na atmosfera é a principal causa do aquecimento global. Em 2023, o Brasil emitiu **2,3 Gt** de CO₂e em valores brutos (ante 2,6 GT, 2022), ocupando a 5ª posição mundial (3,1% do total), atrás de China (26%), EUA (11%), Índia (7%) e Rússia (4%) [SEEG, 2024].

O CO₂ ocorre naturalmente como subproduto de processos biológicos, como a respiração celular e a decomposição da matéria orgânica, além de ser liberado pela combustão de combustíveis fósseis. Atualmente, está presente na atmosfera em cerca de **425 ppm** (~280 ppm na era pré-industrial), exercendo função essencial no ciclo do carbono. É incolor, inodoro e não inflamável, conferindo segurança no manuseio e ampla aplicação industrial e comercial.

Antes de ser utilizado, o CO₂ precisa ser capturado por diferentes rotas, como pós-combustão, pré-combustão, oxicomustão ou por tecnologias emergentes como **DAC** (Direct Air Capture) e **BECCS** (Bioenergy with Carbon Capture & Storage). O DAC retira o CO₂ diretamente da atmosfera, enquanto o BECCS combina bioenergia com captura e armazenamento de carbono. Classificadas como **CDR** (Carbon Dioxide Removal), tais tecnologias permitem emissões líquidas negativas.

O CO₂ capturado pode ser armazenado (CCS) ou convertido em produtos (CCU). Abundante, de baixo valor comercial e não tóxico (em baixas concentrações), apresenta ampla versatilidade industrial. Seu uso como insumo químico, sobretudo quando o carbono é fixado a longo prazo, configura uma alternativa relevante para a mitigação de GEE. As estratégias de uso do CO₂ na produção de bens constituem um pilar para a descarbonização e serão apresentadas no artigo.

1 – Gases de Efeito Estufa (GEE) e Cenários de Transição Energética

CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano) e N₂O (óxido nitroso) são os principais GEE de origem antropogênica. Com tempo de residência na atmosfera de cerca de 100 anos, o CO₂ é emitido principalmente por combustíveis fósseis e desmatamento; o CH₄, com permanência média de 12 anos e potencial de aquecimento 84–86 vezes maior que o do CO₂, tem como principais fontes a pecuária, setor de petróleo e gás e aterros sanitários; e o N₂O, com 100 anos de permanência e 298 vezes mais potente, é emitido pelo uso de fertilizantes nitrogenados, manejo de esterco e queima de biomassa. Incluem-se também os **gases fluorados** (HFCs, PFCs, SF₆ e NF₃) e o **vapor d'água** (H₂O), o GEE mais abundante, embora não contabilizado nos inventários.

A nível mundial, a produção de **eletricidade** e **calor** é a maior responsável pelas emissões totais, seguida pelos setores de transporte, indústria, construção (especialmente cimento e aço) e agricultura, embora a distribuição varie entre regiões. Nos EUA, o transporte supera a média mundial em participação, enquanto no Brasil predominam as emissões da **agropecuária** e das **mudanças no uso da terra**, como desmatamento e degradação do solo. Em geral, as emissões de CO₂ seguem de perto o perfil das emissões totais de GEE, com distribuição global semelhante. A Figura 1 mostra a distribuição setorial das emissões globais no período 1990-2021.

¹ Land Use, Land-Use Change and Forestry (Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas)

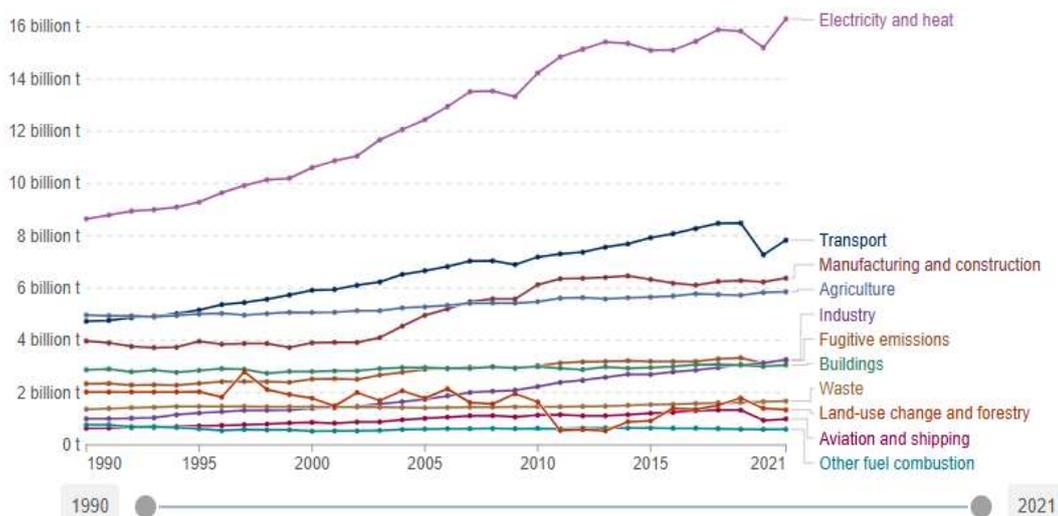


Figura 1: Emissões globais de GEE por setor (1990-2021) [OWD, 2024]

No Brasil, o setor **agropecuário** é o segundo maior emissor, com **30,5%** das emissões totais, atrás apenas do **LULUCF**, que inclui o desmatamento, grande parte destinado à criação de gado, e representa **39,5%** do total. A Figura 2 mostra as emissões líquidas no país no período 1990-2022.

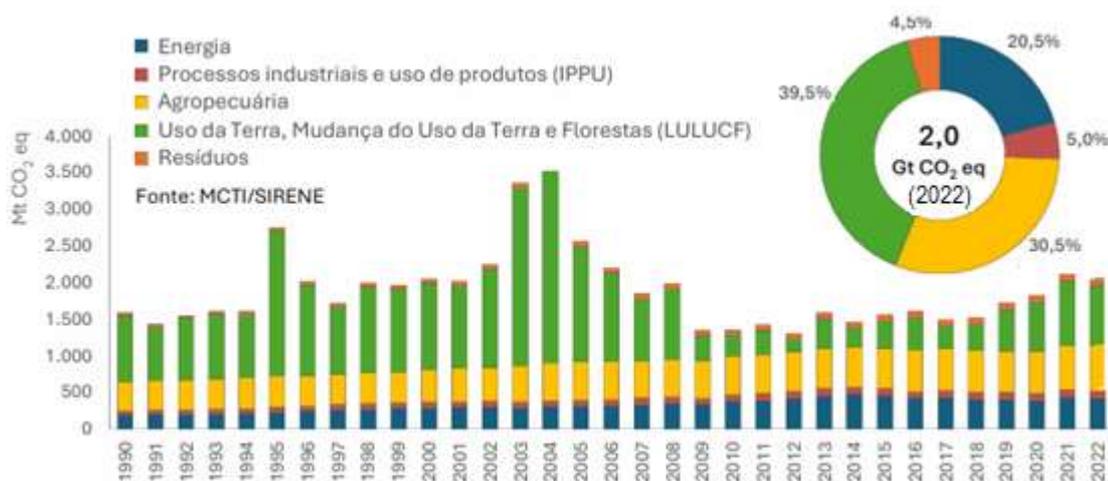


Figura 2: Emissões líquidas de GEE por setor no Brasil (1990-2022) [EPE, 2025]

A agropecuária é a principal fonte de emissão de **metano**, especialmente pela fermentação entérica na pecuária, com o cultivo de arroz também contribuindo. Quase todas as emissões de **N₂O** são agrícolas, resultantes de micro-organismos do solo que transformam o nitrogênio não absorvido pelas plantas em N₂O, principalmente após a aplicação de fertilizantes nitrogenados. Essas emissões ocorrem principalmente por meio da nitrificação e desnitrificação do solo.

1.1 – Cenários de Transição Energética

A primeira transição energética ocorreu durante a crise do petróleo nos anos 1970, estimulando a busca por alternativas como o etanol. A segunda, relacionada à mitigação das mudanças climáticas, ganhou força a partir da década de 1990. O **Protocolo de Quioto** (1997) definiu metas obrigatórias de redução de emissões e formalizou o conceito “créditos de carbono”, enquanto o **Acordo de Paris** (2015) consolidou compromissos globais para limitar o aquecimento do planeta. Desde então, a **IEA** tem elaborado cenários de transição energética, como:

- **STEPS** (Stated Policies Scenario): considera apenas as políticas atualmente implementadas.
- **APS** (Announced Pledges Scenario): incorpora compromissos anunciados pelos governos.
- **NZE** (Net Zero Emission): define um caminho para alcançar emissões líquidas zero até 2050.

O cenário STEPS, baseado nas políticas em vigor, prevê um aumento de **2,6–2,7 °C** até 2100; o APS projeta cerca de **2,1 °C** até 2100 caso todos os compromissos anunciados sejam cumpridos; e o NZE define um caminho para emissões líquidas zero até 2050, com limite de **1,5 °C** até 2100.

2 – Hard-to-Abate

Setores **hard-to-abate** enfrentam barreiras técnicas e econômicas para reduzir as emissões. Geralmente dependentes de processos que exigem altas temperaturas, usam insumos fósseis como matéria-prima ou operam em condições que dificultam a eletrificação. O frete rodoviário (9%), a indústria de ferro e aço (7-9%), cimento (7%), químicos (4%), transporte marítimo (3%), aviação (2,5%) e as indústrias de celulose e papel e de alumínio (2% cada) concentram grande parte das emissões por demandar alta densidade de energia e/ou calor intenso.

Muitos processos a montante e a jusante usam energia térmica de gás ou carvão, que pode ser descarbonizada com hidrogênio ou eletricidade. Para indústrias energointensivas, as tecnologias de baixo carbono encontram-se, em sua maioria, em estágios iniciais de desenvolvimento (TRL baixo), concentradas em **fases-piloto** ou de **demonstração**. Algumas, porém, serão essenciais para atingir as metas de redução de emissões de 2050, como o hidrogênio verde (**H2V**) e os **e-fuels** (com previsão de mercado de US\$ 66 bilhões até 2030) [M&M, 2025].

Nas indústrias de baixo e médio calor (≤ 400 °C), a eletrificação demonstra alto potencial para mitigar as emissões de CO₂ por meio de aquecimento elétrico direto, fornos resistivos (para processos de baixo calor) ou de indução (para metais) e geração elétrica de vapor, eliminando emissões e aumentando a eficiência energética e a integração com fontes renováveis [IEA, 2018].

3 – CCS, DAC e BECCS

CCS (Carbon Capture and Storage) engloba tecnologias capazes de remover CO₂ da atmosfera ou de emissões industriais, contribuindo para reduzir o impacto do aquecimento global. É uma ferramenta estratégica para a descarbonização, especialmente em setores **hard-to-abate**, e desempenha papel fundamental no cumprimento das metas climáticas.

O CCS é empregado em grandes usinas ou indústrias com altas emissões pontuais, onde o CO₂ corresponde a 10–15% dos gases de combustão (flue gases) em volume. O processo captura e separa o CO₂, comprimindo-o a alta pressão, de modo que sua densidade se aproxima à do líquido, para armazenamento, evitando sua emissão na atmosfera. As principais tecnologias para capturar CO₂ de combustíveis fósseis são [GCCS, 2024]:

- **Pós-combustão**: captura em gases de exaustão de usinas e indústrias.
- **Pré-combustão**: captura no gás de síntese (syngas) em usinas de gaseificação.
- **Oxi-combustão**: captura na combustão do combustível com oxigênio puro (O₂).

No Brasil, a Lei nº 14.993/2024 (**Marco do CCS**) atribui à ANP a autorização de projetos de armazenamento geológico de CO₂ e define diretrizes para transporte, injeção, monitoramento e pós-fechamento, garantindo segurança e integridade ambiental.

3.1 – Direct Air Capture - DAC

O DAC captura CO₂ diretamente do ar atmosférico por meio de processos físico-químicos, destinando-o posteriormente ao armazenamento ou uso industrial. Sua principal vantagem é não depender de uma fonte específica de emissão, permitindo que as unidades de captura sejam instaladas próximas a pontos de armazenamento ou de uso do CO₂. Um dos principais desafios da DAC é o elevado custo, pois a captura de CO₂ diretamente do ar (~425 ppm) é muito mais dispendiosa do que a realizada a partir de gases de combustão (100.000–150.000 ppm). As tecnologias de DAC se dividem em duas abordagens: sistemas com solventes (líquidos) e sistemas com sorventes (sólidos).

Nos sistemas com **solventes**, o ar circula por soluções químicas (ex.: alcalinas) que absorvem ou reagem com o CO₂; em seguida, o CO₂ é concentrado e separado da solução, que é regenerada para reutilização. Já os sistemas com **sorventes** usam filtros sólidos que se ligam quimicamente às moléculas de CO₂ presentes no ar; posteriormente, os filtros são aquecidos ou submetidos a vácuo para liberar o CO₂ concentrado, destinado ao armazenamento ou uso industrial.

3.2 – Bioenergy with Carbon Capture & Storage - BECCS

O BECCS viabiliza emissões negativas ao capturar e armazenar CO₂ de processos de conversão de biomassa em combustíveis ou de queima direta para gerar energia. Destilarias de **etanol** nos EUA e Reino Unido, onde o CO₂ é capturado durante a fermentação, têm investido na solução. Outro caso é o upgrade do **biogás** para a obtenção de **biometano**, que remove CO₂ e pode ser integrada ao BECCS, prática já observada na Europa. Alguns desafios do BECCS são [EPE, 2023]:

- Demanda energética na compressão e captura.
- Escala e custo de projetos individuais.
- Sazonalidade na produção de biomassa e potencial ociosidade da infraestrutura.
- Contabilização de emissões de cadeias da biomassa e CCS para efetivar emissões negativas.
- Garantia de remuneração direta via mercados de carbono ou programas direcionados (a Lei nº 15.042/2024 ajuda a reduzir esse desafio).

A tecnologia BECCS é um dos focos de pesquisa do CEHTES, considerando o potencial de CO₂ no Estado de Goiás, especialmente nas indústrias **sucrialcooleiras** e em processos agropecuários que produzem **biogás** e **biometano**, bem como a crescente demanda pelo insumo na indústria alimentícia regional.

O potencial de BECCS varia significativamente entre **destilarias de etanol** e **biodigestores**. Nas primeiras, o CO₂ é gerado pela fermentação alcoólica (C₆H₁₂O₆ → Etanol+CO₂) com elevada pureza (≥ 99,9%), tornando sua separação e captura simples, com compressão e secagem básicas, resultando em baixos custos (US\$ 15–25/tCO₂) e ampla aplicação em indústrias estabelecidas nos EUA e no Brasil [IEA, 2021].

Em contraste, **biodigestores** produzem uma mistura de 50–60% CH₄ e **40–50% CO₂**, com H₂S, NH₃ e vapor, exigindo separação complexa (membranas, PSA, lavagem), o que encarece a captura. O upgrade para biometano (CH₄ puro) reduz o custo líquido, pois a venda do metano gera receita. Outra rota BECCS é a **queima de biomassa** (bagaço de cana, madeira, palha), que produz CO₂ diluído em flue gases (**10–15%**), tornando a captura cara e tecnicamente desafiadora.

Recentemente, a **FS Bioenergia** realizou a primeira venda futura de créditos de remoção BECCS no país, com valor médio de US\$ 150/tCO₂e, com CO₂ residual da produção de etanol de milho para injeção geológica em Lucas do Rio Verde (MT). Com autorização da ANP e licença ambiental provisória, o projeto prevê o armazenamento de até **12 MtCO₂e** ao longo de 30 anos, equivalente às emissões da usina. Os contratos foram estruturados em parceria com a Pinheiro Neto, SLB e Rubicon Carbon & YvY Capital, seguindo a metodologia Gold Standard [EIXOS, 2025].

4 – Aplicações do CO₂

Atualmente, o CO₂ é utilizado em aplicações do cotidiano como agente extintor de incêndios, para carbonatar bebidas (como refrigerantes, cervejas e água), em processos de soldagem (como gás de proteção) e para manter alimentos resfriados (com gelo seco) durante o transporte. Além disso, o CO₂ é amplamente empregado na produção industrial de **ureia** e na recuperação avançada de petróleo (**EOR: Enhanced Oil Recovery**), na qual o CO₂ é injetado em poços para aumentar a extração e a eficiência da produção.

Diversos produtos químicos podem ser obtidos a partir do CO₂, como o ácido fórmico e o **metanol**, base para a produção do formaldeído, ácido acético e biodiesel. As novas aplicações do CO₂ envolvem a sua transformação em combustíveis, como os **e-fuels**, e em materiais que

permitem o armazenamento de carbono a longo prazo, como **policarbonatos** e materiais de **construção** (ex.: carbonato de cálcio). Observa-se que a construção civil é responsável por cerca de 37% das emissões globais de CO₂, relacionadas à energia e processos, em grande parte devido à fabricação do cimento Portland (que por si só gera 7% das emissões globais).

Dependendo do fluxo de entrada de CO₂ e da aplicação desejada, pode ser necessária uma sequência de etapas de **purificação** antes do transporte e uso, o que aumenta o custo do fornecimento: requisitos de pureza para carbonatação de bebidas ($\geq 99,9\%$) elevam os custos operacionais, enquanto processos de carbonatação mineral industrial toleram CO₂ de menor pureza ($\geq 90\%$). Etapas de purificação e logística do CO₂ incluem resfriamento, compressão, secagem e adsorção, com o objetivo de remover impurezas associadas, como H₂S e água.

Contudo, o uso do CO₂ como matéria-prima para commodities químicas em escala industrial ainda é limitado, dada sua alta estabilidade termodinâmica e baixa reatividade, já que se encontra no estado mais **oxidado**. Processos de transformação do CO₂ exigem alta demanda energética e o uso de catalisadores, elevando custos e restringindo aplicações potenciais. Além disso, muitas rotas demandam grandes quantidades de hidrogênio, preferencialmente H₂V ou HBC, para assegurar processos sustentáveis com emissões líquidas nulas ou negativas.

5 – Mercado Mundial de CO₂

Cerca de **230 Mt** de CO₂ são utilizadas globalmente. O maior consumidor é a indústria de fertilizantes, com 130 Mt destinadas à produção de **ureia** ($\text{CO}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow (\text{NH}_2)_2\text{CO}$), seguida pela indústria de petróleo e gás, que consome 70–80 Mt para a recuperação avançada de petróleo, por meio da reinjeção de CO₂ em poços.

Atualmente, os maiores entraves à expansão do uso do CO₂ são comerciais e regulatórios, e não tecnológicos. Contudo, há potencial de curto prazo para aumentar o mercado para pelo menos **10 Mt** por ano em cada uma das cinco categorias de produtos e serviços derivados de CO₂: combustíveis, produtos químicos, materiais de construção a partir de minerais, materiais de construção a partir de resíduos, e uso de CO₂ para promover o crescimento de plantas (atmosfera enriquecida com CO₂). Esse uso equivale à demanda do setor de alimentos e bebidas [IEA, 2019].

6 – Produção de CO₂

Os principais fornecedores de CO₂ obtêm o gás de 03 (três) fontes:

1. Indústria de Amônia e Ureia (fertilizantes)

- Durante a produção de ureia a partir de gás natural e nitrogênio, o CO₂ é gerado como subproduto em estado puro: o gás é capturado, purificado e vendido para uso alimentar, como refrigerantes e alimentos industrializados.
- No Brasil, esta é a principal fonte de CO₂, devido à operação em grande escala das plantas de fertilizantes e à alta pureza do gás fornecido.

2. Indústria de Etanol e Fermentação

- CO₂ da fermentação de açúcares (cana-de-açúcar ou milho) é capturado e purificado.
- Essa fonte tem ganhado relevância, principalmente por estar associada à produção de etanol combustível, fornecendo CO₂ biogênico de forma confiável e contínua.

3. Outras Indústrias Químicas

- Processos como a produção de álcool industrial, ácido cítrico, amônia e soda cáustica podem gerar CO₂ como subproduto.
- O gás é purificado antes de ser incorporado à cadeia alimentar, quando aplicável.

O CO₂ destinado a alimentos e bebidas deve atender ao padrão de pureza alimentar (**food-grade**, $\geq 99,9\%$), independentemente de sua origem. Grande parte provém de fontes não fósseis, como

fermentação ou processos biogênicos, embora ainda haja CO₂ gerado a partir de processos fósseis, como a produção de amônia a partir do gás natural. No Brasil, o CO₂ usado em extintores de incêndio geralmente é obtido de fontes industriais que produzem o gás como subproduto, atendendo ao padrão técnico (**industrial-grade**). Os destinos do CO₂ consumido no país incluem:

- Extintores de incêndio.
- Indústria de alimentos (embalagens, atm modificada) e bebidas (refrigerantes e cervejas).
- Processos industriais (soldagem, processos químicos).
- Exploração de petróleo (injeção em poços como técnica de recuperação avançada - EOR).

7 – Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões - SBCE

Os **créditos de carbono** são certificados que representam a remoção de uma tonelada de CO₂ da atmosfera para compensar emissões de GEE. Empresas, governos ou indivíduos podem adquiri-los para compensar suas próprias emissões. Cada tonelada de CO₂ evitada ou removida gera 01 (um) crédito, que pode ser:

- **Vendido** a empresas que precisam compensar suas emissões, podendo o comprador usá-lo imediatamente ou mantê-lo em carteira.
- **Aposentado**, ou seja, retirado de circulação para garantir que a redução de carbono seja contabilizada e não reutilizada.

Existem dois tipos de mercado de carbono:

- **Mercado Regulado** ou **Regulamentado** (Compliance Market): exigido por lei. Empresas da União Europeia (valor atual médio do crédito de carbono na UE: **€ 74**), Califórnia (US\$ 26) e China (US\$ 15) compram créditos se excederem limites de emissões.
- **Mercado Voluntário** (Voluntary Market): sem obrigação legal. Empresas adquirem créditos por iniciativa própria, para marketing verde ou responsabilidade ambiental.

Exemplos de projetos que geram créditos de carbono incluem:

- Reflorestamento e conservação florestal.
- Geração de energia renovável, como solar e eólica.
- Tratamento de resíduos, com captura de metano.
- Práticas de agricultura regenerativa².

7.1 – GHG Protocol

O GHG Protocol é o padrão internacional mais adotado para contabilizar e reportar emissões de GEE, exigindo um **inventário de carbono** como base. Diversas empresas oferecem ferramentas para criar inventários consistentes, além de soluções de aprendizado sobre os principais padrões de contabilização. O GHG Protocol organiza suas emissões em três escopos:

- **Escopo 1** (emissões diretas): provenientes de fontes controladas pela empresa, como queima de combustíveis em caldeiras, veículos da frota própria ou processos industriais.
- **Escopo 2** (emissões indiretas de energia): geradas na produção de eletricidade, calor ou vapor que a empresa consome, mas que é produzida por terceiros.
- **Escopo 3** (outras emissões indiretas): Incluem as demais emissões da cadeia de valor, como transporte e uso de produtos, viagens de negócios e descarte de resíduos.

7.2 – Princípio da Adicionalidade e Inventário de Carbono

O princípio da adicionalidade determina que um projeto de carbono só gera créditos se reduzir ou remover emissões de GEE além do que ocorreria em um **cenário de referência**, garantindo

² Práticas agrícolas que restauram a fertilidade do solo, aumentam a biodiversidade e capturam carbono, promovendo produção de alimentos de forma sustentável e com menor impacto ambiental

que as reduções sejam reais e mensuráveis, evitando créditos fictícios. Trata-se do princípio central no processo de certificação de créditos de carbono.

O inventário de carbono, base técnica do mercado de carbono, levanta sistematicamente todas as emissões e remoções de GEE de uma organização, setor ou país em determinado período, estabelecendo a **baseline** contra a qual as reduções de emissões são medidas e permitindo o monitoramento e a verificação das reduções ao longo do projeto.

7.3 – SBCE (Lei nº 15.042/2024)

A Lei nº 15.042 de 2024 instituiu o **Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE)**, um ETS (emissions trading system) que opera pelo mecanismo **cap-and-trade**, estabelecendo um limite máximo de emissões de GEE para determinado setor (como energia, transporte ou indústria) ou conjunto de fontes emissoras. As empresas que ultrapassarem este limite devem adquirir **CBEs**, **CRVEs** ou **créditos de carbono** de empresas que reduziram suas emissões abaixo do limite estabelecido, garantindo flexibilidade econômica para cumprir metas ambientais [ADE, 2025].

No SBCE, estão sujeitas ao teto de emissões as atividades que liberam mais de **10 ktCO₂e/ano**. O Plano Nacional de Alocação (**PNA**) fixa a quantidade de CBEs por setor regulado e o limite de uso de CRVEs no SBCE. Esses instrumentos são detalhados a seguir.

- **CBE**: ativo fungível e transacionável, concedido pelo órgão gestor do SBCE, que confere o **direito de emitir** 1 tCO₂e. As CBEs são emitidas exclusivamente pelo poder público e não representam reduções efetivas de emissões, mas o direito de emitir dentro de um limite previamente definido. Podem ser distribuídas gratuitamente ou adquiridas onerosamente na alocação inicial e, uma vez emitidas pelo governo, podem ser negociadas no **mercado secundário**³ para equilibrar excedentes e déficits de emissões.
- **CRVE**: título que representa a **efetiva redução** ou **remoção** de 1 tCO₂e, decorrente de projetos que seguem metodologias reconhecidas pelo órgão gestor do SBCE e verificadas por entidades independentes. Diferentemente das CBEs, os CRVEs não são emitidos pelo poder público, mas sim pelos projetos habilitados, e podem ser negociados no mercado. Embora tenham natureza voluntária, podem ser usados parcialmente para cumprimento de metas no SBCE, conforme os limites definidos pelo PNA.
- **PNA**: define, em cada período de cumprimento, a quantidade de CBEs a distribuir entre os setores regulados (energia, indústria etc.) e o limite de CRVEs aceitos para conformidade.

Créditos de carbono podem ser convertidos em CRVEs quando seguem metodologias aprovadas pelo órgão regulador. Quando negociados no mercado financeiro, CBEs, CRVEs e créditos de carbono são supervisionados pela Comissão de Valores Mobiliários (CVM). Para operar no mercado de carbono, as empresas devem apresentar:

- **Plano de Monitoramento e Relato de Emissões e Remoções de GEE** (para emissões > 10 ktCO₂e/ano): define metodologia e métricas para medir emissões, constituindo a etapa de monitoramento do MRV.
- **Relato de Conciliação Periódica de Obrigações** (para emissões > 25 ktCO₂e/ano): verifica o cumprimento das metas de emissões, conciliando dados de emissões (verificadas), CBEs, CRVEs e créditos utilizados, indicando o saldo final; pode gerar penalidades.
- Observações:
 - **Relato de Emissões e Remoções de GEE**: documento anual que registra emissões e remoções com base no inventário e no plano de monitoramento do MRV.
 - **Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE)**: emitido após auditoria independente e registro no SBCE.

³ Ambiente onde empresas reguladas negociam entre si os ativos já emitidos pelo poder público

O SBCE estabelece mecanismos de controle e incentivo à redução de GEE ao longo de toda a cadeia produtiva das atividades reguladas, seguindo o conceito **cradle-to-grave** (berço ao túmulo), monitorando e quantificando as emissões desde a extração ou produção inicial de insumos, passando pela transformação e uso de bens e serviços, até a disposição final ou descarte, garantindo que cada etapa do ciclo de vida seja contabilizada.

No SBCE, o **MRV** (Monitoramento, Relato e Verificação) atua como o mecanismo que assegura a transparência e a confiabilidade dos dados sobre as emissões de GEE. As empresas reguladas devem monitorar sistematicamente suas emissões, relatar periodicamente os resultados em relatórios padronizados e submetê-los à verificação por entidades independentes, assegurando o cumprimento preciso e auditável dos limites ou da compensação com CBEs e CRVEs.

Fatores de emissões são coeficientes que relacionam a quantidade de gases emitidos a uma unidade de atividade ou consumo de insumo, como energia, combustível ou matéria-prima. São fundamentais para os cálculos do MRV, ajudando a gerar relatórios consistentes, comparáveis e baseados em padrões reconhecidos nacional ou internacionalmente.

Com base nesses fatores, as **calculadoras de emissões** permitem estimar os GEEs de forma padronizada, facilitando o levantamento inicial, apoiando a elaboração dos relatórios de MRV e assegurando consistência e comparabilidade dos dados. Empregam metodologias reconhecidas internacionalmente, como as do **IPCC** e **VCS** (Verified Carbon Standard), adaptadas à legislação e às especificidades do Brasil, garantindo que os resultados reflitam as condições locais de clima, solo, tecnologia e práticas produtivas. Permitem estimar os GEEs por origem (**escopos 1 a 3**) e nível de detalhamento (**Tier**), ajustando a precisão aos dados disponíveis.

Embora o SBCE tenha aplicação em todo o território nacional, ele prevê **interoperabilidade** com sistemas internacionais de comércio de emissões que sejam compatíveis em termos de regras e metodologias. Logo, créditos de carbono gerados ou negociados no SBCE poderão, em princípio, ser reconhecidos ou integrados a mercados externos, como o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (**EU-ETS**), que hoje concentra grande parte das transações globais de carbono. Essa compatibilidade amplia as oportunidades de negociação e fortalece a inserção do Brasil no mercado internacional de créditos de carbono.

A implementação do SBCE ocorrerá em **cinco fases**: regulamentação inicial, estabelecimento do sistema MRV, elaboração de planos de alocação (PNA), distribuição de CBEs e operacionalização do mercado secundário; o início das operações está previsto para 2027 [PUCRS, 2025] [CI, 2025].

7.4 – Certificação

Para gerar um crédito de carbono é necessário demonstrar que uma atividade, como o plantio de árvores, captura de CO₂ ou substituição de tecnologia, **evitou** ou **removeu** emissões em relação a um **cenário de referência**. Isso envolve o uso de modelos complexos, elaboração de inventários de emissões, medições em campo e a produção de relatórios periódicos, incluindo a avaliação de **incertezas** para garantir a confiabilidade dos créditos.

O primeiro passo para comercializar CBEs ou CRVEs (créditos de carbono) é **registrar** o projeto no SBCE, garantindo que esses ativos sejam legais e transacionáveis. Em seguida, a empresa responsável pelo projeto elabora o **inventário de emissões** e aplica os mecanismos de **MRV** para assegurar a confiabilidade dos dados. Esse inventário é, então, validado e verificado por uma entidade acreditada pelo **Inmetro** como OVV, a qual emite o **certificado de conformidade**. A partir dele, os créditos (CBE/CRVE) são gerados e podem ser negociados no mercado financeiro.

A **certificação**⁴ envolve auditorias independentes, metodologias aprovadas e taxas, dificultando que pequenos produtores assumam os custos. Mercados fragmentados, com diferentes padrões e certificadoras (como Verra, Gold Standard e ART-TREES) e metodologias próprias, podem gerar

⁴ Processo que garante a legitimidade de créditos de carbono e os direitos de emissão (CBEs e CRVEs)

confusão, já que um crédito certificado por determinado padrão pode ser mais valorizado que outro. Em síntese, a dificuldade do processo de certificação está em provar com **rigor científico** e **credibilidade** de mercado que 1 tCO₂e foi de fato evitada ou removida, e que esse resultado é adicional, permanente e verificável.

7.5 – Preço do Crédito de Carbono

No mercado voluntário, o preço do crédito de carbono varia entre **US\$ 1** e **US\$ 50**, conforme o tipo e a credibilidade do projeto. Em países ou setores onde ainda não há mercado regulado, os valores médios têm se mantido em torno de **US\$ 5**. Em mercados regulados internacionais, como o europeu, os preços podem superar **€ 70**, evidenciando o potencial econômico desses ativos. O valor do crédito de carbono também depende do tipo de projeto (florestal, energias renováveis etc.), da metodologia adotada e da robustez da certificação obtida [SDP, 2024].

7.6 – Emissões Alocadas por Estados

Em 2023, **Pará** e **Mato Grosso** lideraram as emissões brutas no Brasil, com 13,6% e 13,0% do total, respectivamente, principalmente devido às **mudanças de uso da terra**. São Paulo, 5º maior emissor bruto (6,7%), liderou as emissões do setor de **energia**, sobretudo nas atividades relacionadas ao transporte, seguido por Rio de Janeiro e Minas Gerais.

Naquele ano, **Goiás** ocupou a 8ª posição (4,0%, 92,83 MtCO₂e) e o 2º lugar no setor **agropecuário (61,8 MtCO₂e)**, sobretudo em razão do uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados. Ficou atrás apenas de **Mato Grosso**, que possui o maior rebanho bovino do país (com 34,2 milhões de cabeças) e liderou em emissões líquidas, com **14,9%** do total nacional [SEEG, 2024].

7.7 – Desafios do Mercado de Carbono

Entre os desafios estruturais do mercado de carbono, destacam-se:

- **Greenwashing**: uso de créditos para simular redução de emissões sem efeito real.
- **Transparência e padronização**: informações inconsistentes e critérios variados dificultam avaliar a qualidade dos projetos.
- **Efetividade dos projetos**: desafios para comprovar reduções reais de emissões.

7.8 – Considerações Finais (SBCE)

O SBCE incentiva a implementação de **projetos sustentáveis** que promovam a redução ou remoção de emissões de GEE, incluindo iniciativas de reflorestamento, geração de energia limpa e captura de carbono. Empresas que desenvolverem esses projetos podem gerar **créditos de carbono**, passíveis de comercialização no **mercado regulado**, criando uma nova fonte de receita e estimulando a adoção de práticas mais sustentáveis [ADE, 2025].

O **CBIO** (Crédito de Descarbonização), criado pelo RenovaBio, foi o primeiro programa de crédito de carbono efetivo no Brasil. Cada CBIO, emitido por produtores de biocombustíveis certificados, representa 1 tCO₂e evitada e pode ser integrado ao SBCE como ativo regulatório, servindo de referência para a certificação e negociação de outros créditos de carbono no mercado regulado. De modo similar, projetos **REDD+**, voltados à redução do desmatamento e conservação florestal, também podem ser certificados e negociados no SBCE, desde que sigam as normas nacionais, conectando o mecanismo brasileiro ao contexto internacional de preservação florestal.

A norma **ABNT NBR ISO 14064** dá suporte ao SBCE ao estabelecer padrões para contabilização, monitoramento e verificação de emissões e remoções de GEE, garantindo a integridade dos créditos de carbono. Ela orienta organizações a quantificar e relatar suas emissões e remoções, desenvolver e monitorar projetos de GEE e submeter inventários e projetos à verificação por terceiros. Suas três partes definem funções específicas: a **Parte 1** aborda o relato organizacional, a **Parte 2**, a quantificação e monitoramento de projetos, e a **Parte 3**, a verificação independente, assegurando créditos confiáveis para o mercado regulado.

A Lei nº 15.042 isenta da regulação obrigatória no SBCE a **produção agropecuária primária** e as **instalações de gestão de resíduos** que comprovem neutralização efetiva de suas emissões. A regulamentação também gerou debates sobre o **H2V**, especialmente quanto à definição dos limites de emissões que qualificam o hidrogênio de baixo carbono (**HBC**), passando de 4 para **7 kgCO₂e/kgH₂**.

8 – Linha 2: Combustíveis Avançados e Captura de Carbono

O CEHTES transforma desafios ambientais em oportunidades tecnológicas. A missão na Linha 2 é desenvolver soluções inovadoras que contribuam para a descarbonização da indústria química, utilizando o dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases do efeito estufa, como matéria-prima para a síntese de substâncias de interesse comercial. Essa estratégia insere-se no escopo do que se denomina *Carbon Capture and Utilization* (CCU), ou Captura e Utilização de Carbono, uma abordagem essencial para reduzir emissões e, ao mesmo tempo, gerar valor a partir de resíduos gasosos.

Com esse propósito, estão sendo desenvolvidos catalisadores voltados à conversão química do CO₂ em produtos com potencial industrial, com destaque para os *e-combustíveis* e outras commodities químicas. Entre as rotas investigadas estão a produção de ácido fórmico, metanol e outros álcoois, carbonatos orgânicos (como o carbonato de glicerol), ureias cíclicas e quinazolinodionas. Tais substâncias apresentam demanda significativa na cadeia da indústria química global, e algumas delas despontam como plataformas promissoras para novas aplicações, incluindo a produção de materiais avançados e compostos bioativos.

Além disso, busca-se o desenvolvimento de abordagens catalíticas mais eficientes, capazes de reduzir o número de etapas sintéticas, minimizar a geração de resíduos tóxicos e diminuir o custo energético dos processos. Esses avanços são fundamentais para viabilizar uma produção química mais sustentável, alinhada aos princípios da economia circular e de baixo carbono.

Entre as rotas estudadas, destaca-se a conversão do CO₂ em carbonatos cíclicos, moléculas versáteis com aplicações nas indústrias de plásticos, solventes, cosméticos e fármacos. Essa transformação ocorre por meio da reação do CO₂ com epóxidos, em processos catalíticos que são otimizados para torná-los mais eficientes e sustentáveis. Um avanço expressivo nesse contexto foi o início da produção de policarbonato por copolimerização de CO₂ com epóxidos, utilizando como catalisador a celulose nanocristalina, um material derivado de fontes renováveis. Este tópico de pesquisa exemplifica de forma promissora como o CO₂ pode ser integrado à cadeia de valor de materiais poliméricos (plásticos) por meio de tecnologias limpas.

Complementando essa frente, têm-se obtido resultados positivos na conversão de CO₂ em ácido fórmico, substância de grande potencial como transportador de hidrogênio e reagente em diversas reações industriais. Essa rota vem sendo estudada com ênfase no uso de hidrogênio como agente redutor e na busca por catalisadores que funcionem sob condições mais brandas e com maior seletividade. Embora os experimentos para a produção de metanol ainda estejam em fase muito inicial, esse é um dos objetivos futuros do grupo visto que o metanol é uma substância-chave na economia de combustíveis limpos. Nesse sentido, foram investigados catalisadores heterogêneos à base de metais de transição, como cobre, zinco, níquel e ferro, suportados em materiais porosos ou óxidos mistos, com o propósito de viabilizar a hidrogenação do CO₂ em condições próximas às industriais, com alta eficiência e estabilidade catalítica.

Além de combustíveis e intermediários químicos, busca-se rotas para síntese de moléculas com propriedades biológicas relevantes. Um exemplo é o estudo da formação de quinazolinodionas a partir de CO₂, compostos nitrogenados com potencial farmacológico. Essa linha de pesquisa amplia as aplicações do carbono capturado, conectando as estratégias de CCU à inovação em saúde e materiais funcionais.

Paralelamente ao uso do CO₂, tem-se investigado o dissulfeto de carbono (CS₂) como uma fonte alternativa de carbono do tipo C1, capaz de participar de reações análogas e gerar produtos com diferentes perfis estruturais e aplicações. A exploração do CS₂ amplia a compreensão dos mecanismos de ativação de pequenas moléculas e contribui para o desenvolvimento de novas plataformas sintéticas baseadas em substratos de baixo custo e alta disponibilidade.

Diante desses avanços, é fundamental reforçar que o estudo de tecnologias baseadas em CCU representa uma das frentes mais promissoras para unir mitigação das mudanças climáticas e desenvolvimento industrial. No CEHTES, tem-se consciência de que cada molécula de CO₂ reaproveitada representa um passo em direção a uma química mais sustentável, sendo, portanto, o empenho voltado não apenas para consolidar as rotas já estudadas, mas também para projetar e investigar novas formas de utilizar o CO₂ em sínteses químicas inovadoras, limpas e economicamente viáveis.

Produtos químicos obtidos a partir da conversão de CO₂ incluem (i) ácido fórmico (HCOOH), usado nas indústrias de ração animal, tecidos e couro; (ii) metanol (CH₃OH), base para a produção de formaldeído, biodiesel e diversas aplicações industriais; (iii) monóxido de carbono (CO), empregado em processos gas-to-liquid (Fischer-Tropsch), que constituem uma das principais rotas para a produção de combustíveis sintéticos; e (iv) etileno (C₂H₄), bloco de construção para polímeros como polietileno, PVC e PET, além de etanol sintético.

9 – Conclusão, Perspectivas e Observações

Globalmente, as emissões de CO₂ seguem de perto o perfil das emissões totais de GEE, apresentando distribuição setorial semelhante. No Brasil, porém, a forte contribuição dos setores **agropecuário** e **LULUCF** (em especial, as **mudanças no uso da terra**) faz com que o perfil de CO₂ fóssil não reflita fielmente as emissões totais, destacando-se o CH₄ e o N₂O associados a atividades agropecuárias.

Reduzir as emissões de **metano** é crucial para mitigar as mudanças climáticas, especialmente no Brasil, onde esse gás representou **26,3%** das emissões totais de GEE em 2022 (acima da média global de ~17%), principalmente devido à fermentação entérica de ruminantes. Por ter ciclo de vida mais curto que o CO₂ (~12 anos), sua redução gera respostas climáticas mais rápidas [FGV, 2022].

Em 2023, a maioria dos biomas brasileiros registrou aumento expressivo das emissões por **desmatamento** (o maior responsável pelo total nacional), com destaque para o Pantanal (+86%) e o Cerrado (+23%), enquanto Amazônia e Pampa apresentaram queda de 15%. **As mudanças no uso da terra** (onde se enquadra o desmatamento) foram novamente responsáveis pela maior parte das emissões brutas de GEE do Brasil em 2023, com ~1 GtCO₂e (**46%**), seguidas pela agropecuária, com ~0,6 GtCO₂e (**28%**) [SEEG, 2024].

No contexto das emissões, é importante destacar que o Observatório do Clima, por meio do **SEEG**, reporta tanto as emissões brutas quanto as líquidas de GEE, incluindo nestas últimas as remoções de CO₂ por florestas e unidades de conservação. Enquanto o SEEG dá destaque às emissões brutas, o governo reporta à UNFCCC⁵, via **SIRENE** (plataforma oficial do país), apenas as emissões líquidas, o que pode gerar confusão na interpretação dos dados [SEEG, 2024].

No contexto da captura de carbono, tecnologias como **BECCS** mostram que é possível alinhar metas ambientais e oportunidades econômicas, especialmente em países com matriz renovável e forte vocação agroindustrial, como o Brasil. Seus créditos de carbono, por possibilitar emissões **negativas**, podem alcançar preços mais elevados no mercado.

⁵ Adotada na Rio-92, é o tratado central sobre mudanças climáticas, base dos acordos de Quioto e Paris, e das COPs que definem sua implementação

Além da mitigação direta das emissões, a valorização do CO₂ (dióxido de carbono) por meio de sua **transformação** em produtos químicos, combustíveis e materiais surge como uma estratégia promissora para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, enquanto impulsiona a transição para uma economia de baixo carbono.

Apesar das barreiras técnicas, econômicas e regulatórias, observa-se avanço significativo nas rotas de conversão de CO₂, impulsionado por programas de **PD&I**. A expansão da oferta de **H2V** e **HBC**, aliada ao amadurecimento de **catalisadores** mais seletivos e eficientes, indica a viabilidade industrial dessas rotas, com destaque para a produção de **metanol**, ácido fórmico, carbonatos orgânicos e **policarbonatos**, entre outros.

No âmbito das políticas de mitigação de emissões, a Lei nº 15.042 que institui o **SBCE** estabelece faixas de obrigatoriedade de reporte conforme o nível de emissões. Organizações que emitem mais de **10 ktCO₂e/ano** devem cumprir obrigações de reporte, isto é: aquelas com emissões entre **10 e 25 ktCO₂e/ano** precisam submeter um *plano de monitoramento* (uma das etapas do MRV) ao órgão gestor do SBCE e apresentar *relatório anual de emissões e remoções* de GEE; as que emitem mais de **25 ktCO₂e/ano** devem, de forma complementar, apresentar *relatório de reconciliação de obrigações*, incluindo o saldo final.

O SBCE oferece às empresas uma ferramenta concreta para contabilizar custos de carbono, gerar ou negociar créditos de carbono e integrar a sustentabilidade às estratégias **ESG** por meio de ativos específicos, como **CBEs** e **CRVEs**. Ao participar do programa, as organizações reforçam o compromisso ambiental, aumentam a transparência de seus inventários, fortalecem a governança corporativa e aproveitam oportunidades de mercado sustentáveis.

A possibilidade de que créditos de carbono do mercado voluntário sejam reconhecidos e negociados no mercado regulado representa um **avanço** significativo na regulação, pois aumenta a liquidez desses ativos, estimula investimentos em projetos de redução de emissões e promove maior integração entre os mercados voluntário e regulado.

Fontes de energia renovável em operação podem, **em princípio**, gerar créditos de carbono e solicitar a emissão de CRVEs no âmbito do SBCE. A emissão retroativa depende da comprovação das reduções de emissões desde o início da operação: com documentação consistente e aprovação regulatória, o CO₂ evitado pela usina pode ser convertido em CRVEs, integrando-se ao cálculo das emissões líquidas.

O SBCE ganha relevância adicional com a realização da **COP 30** (Conference of the Parties 30), de 10 a 21 de novembro de 2025, em Belém (PA), que posiciona o Brasil no centro das negociações climáticas globais. A conferência reforça a importância do sistema para a credibilidade internacional do país e amplia as oportunidades de cooperação técnica, atração de investimentos e financiamento de projetos de baixo carbono em diferentes setores da economia.

Durante a COP 30, os países deverão apresentar a atualização de suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (**NDCs**), alinhadas à meta de limitar o aquecimento global a 1,5 °C, conforme o Acordo de Paris. Espera-se que a conferência avance em temas cruciais, como o **financiamento climático** e a **regulação** dos mercados de carbono, previstos no Artigo 6, bem como a adaptação de comunidades vulneráveis e a proteção das florestas tropicais.

Por fim, centros de pesquisa como o **CEHTES**, situado no coração do Cerrado, um dos biomas com maiores emissões do país, desempenham papel crucial na construção de uma agenda inovadora de descarbonização, aproveitando o CO₂ como insumo para os setores químico e energético. A colaboração entre academia, indústria e governo é decisiva para transformar o CO₂ de resíduo em recurso valioso, acelerando a transição para uma economia circular e de baixo carbono.

10 – Referências

- [EDG, 2025] https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025
- [SEEG, 2024] https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/FINAL_SEEG_emissoes_2024_v7.pdf
- [OWD, 2024] <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- [EPE, 2025] https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf
- [M&M, 2025] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/e-fuels-market-7297145.html>
- [IEA, 2018] <https://www.iea.org/commentaries/clean-and-efficient-heat-for-industry>
- [GCCS, 2024] <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/29701/co2-capture-technologies.pdf>
- [EPE, 2023] <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-767/FS-EPE-DPG-SDB-2023-05-BioCCS.pdf>
- [IEA, 2021] <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>
- [EIXOS, 2025] <https://eixos.com.br/newsletters/dialogos-da-transicao/etanol-com-ccs-estreia-no-mercado-de-carbono-brasileiro/>
- [IEA, 2019] https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- [ADE, 2025] <https://www.alemnaenergia.engie.com.br/conheca-a-lei-do-mercado-de-carbono-no-brasil/>
- [PUCRS, 2025] Cimadon, P., Zynich, S., Albano, F., “Sistemática para Elaboração de Inventários de Gases de Efeito Estufa em um Instituto de Pesquisa”, *Produto & Produção*, vol.26, n.1, p.1-20. PUCRS, 2025
- [CI, 2025] https://climainfo.org.br/2025/07/01/regras-do-novo-mercado-de-carbono-brasileiro-devem-sair-em-julho/?utm_source=chatgpt.com
- [SDP, 2024] <https://solarospomares.com.br/qual-valor-do-credito-de-carbono-como-vendo/>
- [FGV, 2022] https://agro.fgv.br/sites/default/files/2023-02/boletim_informativo_ndeg_4_2022.pdf

* Prof. IQ/UFG - Líder da linha de pesquisa 2 do CEHTES - rpchagas@ufg.br

** Prof. EMC/UFG - Coord. técnico-científico do CEHTES - sergiogranato@ufg.br

Centro de Excelência em Hidrogênio e Tecnologias Energéticas Sustentáveis (<https://cehtes.ufg.br/>)