



ALTERNATIVAS PARA MITIGAÇÃO DO CO₂ ATMOSFÉRICO: CAPTURA, ARMAZENAMENTO E CONVERSÃO QUÍMICA SOB UMA PERSPECTIVA ENERGÉTICA

Denis Correa Meyer¹, João Guilherme Rocha Poço^{2,*}

¹Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil

²Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil

*jgrpoco@fei.edu.br

Este trabalho revisa alternativas para mitigar o CO₂ atmosférico, integrando a redução de emissões, a captura em fontes pontuais, a remoção direta do ar, os sumidouros biogênicos, o armazenamento geológico/mineral e o uso químico. Discute-se o papel da energia e do H₂ verde na conversão de CO₂ e propõe-se uma matriz de decisão para priorização tecnológica.

Palavras-chave: captura de carbono; remoção de CO₂; CCUS; hidrogênio verde; armazenamento geológico

INTRODUÇÃO

O aumento do teor de CO₂ na atmosfera é uma variável central na discussão sobre mudanças climáticas e sobre a transição energética. A série de Mauna Loa, iniciada em 1958, permanece a mais longa série instrumental direta de CO₂ atmosférico; em maio de 2026, o valor médio mensal divulgado pela NOAA foi de 432,34 ppm, mantendo a tendência histórica de crescimento (NOAA, 2026). Esse aumento decorre principalmente da conversão de carbono fóssil em CO₂, de processos industriais e de mudanças no uso da terra, embora os fluxos naturais entre a atmosfera, os oceanos e a biosfera continuem modulando a variabilidade sazonal e regional (Takahashi et al., 2009; IPCC, 2023).

A mitigação do CO₂ atmosférico não pode ser reduzida a uma única tecnologia. O raciocínio técnico mais robusto é hierárquico: em primeiro lugar, deve-se evitar ou reduzir as emissões; em seguida, capturar CO₂ em fontes concentradas, quando a eliminação direta das emissões não for imediata; por fim, remover CO₂ já presente no ar para compensar as emissões residuais e, eventualmente, diminuir o estoque acumulado na atmosfera. Essa visão é coerente com a apresentação didática adotada como ponto de partida, que organiza o tema em mudanças climáticas, captura, armazenamento e uso químico do CO₂ (Poço, 2024).

O IPCC ressalta que a estabilização da temperatura média global exige emissões líquidas nulas de CO₂, isto é, o balanço entre emissões antropogênicas e remoções por sumidouros deve se aproximar de zero (IPCC, 2022; IPCC, 2023). O relatório State of Carbon Dioxide Removal estima que, para trajetórias compatíveis com 1,5 °C, a remoção anual de CO₂ precisará atingir entre 7 e 9 GtCO₂ por ano em meados do século, sem substituir a redução acelerada das emissões (Smith et al., 2024). Essa ordem de grandeza

é próxima da discutida na apresentação-base, que destaca a necessidade de neutralidade de emissões e de remoção de CO₂ em escala de gigatoneladas até 2050 (Poço, 2024).

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo sistematizar alternativas de mitigação do CO₂ atmosférico, avaliando seus princípios, vantagens, limitações e requisitos energéticos. O foco recai sobre rotas de captura, armazenamento e uso do CO₂, com atenção especial ao papel do hidrogênio de baixo carbono e às limitações termodinâmicas associadas à conversão química de uma molécula altamente oxidada e estável.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi elaborado como revisão narrativa e como análise técnico-conceitual. A base inicial foi a apresentação “Captura de carbono (CO₂ - dióxido de carbono)”, que reúne conceitos de efeito estufa, variação natural e antropogênica do CO₂, captura, estocagem, usos químicos e alternativas, como a gaseificação de biomassa (Poço, 2024). A partir dessa base, foram selecionadas referências de avaliação internacional, incluindo relatórios do IPCC, da IEA e do State of Carbon Dioxide Removal, bem como artigos científicos sobre captura direta do ar, mineralização, fluxos oceânicos de CO₂ e conversões catalíticas.

A análise foi organizada em quatro critérios: i) relação com a atmosfera, diferenciando a captura em fontes pontuais de remoção atmosférica; ii) permanência do armazenamento, considerando riscos de reversão; iii) intensidade energética e demanda de insumos, sobretudo de eletricidade, calor, água, área e H₂; e iv) maturidade e escalabilidade. Para o uso químico do CO₂, adotou-se uma leitura termodinâmica simples: como o CO₂ é o produto final da oxidação do carbono, sua conversão em produtos energéticos só

representa mitigação se forem empregadas fontes de energia renováveis ou hidrogênio de baixa emissão.

As alternativas foram comparadas em uma matriz qualitativa, distinguindo rotas de curto prazo, adequadas à redução de emissões de fontes concentradas, e rotas de médio e longo prazo, voltadas à remoção do CO₂ já presente no ar.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Taxonomia das rotas de mitigação

A Figura 1 resume a lógica de decisão proposta. A mitigação começa pela redução da entrada de CO₂ na atmosfera: eficiência energética, substituição de combustíveis fósseis, eletrificação, energias renováveis e mudanças nos processos industriais. Essa etapa é indispensável porque nenhuma tecnologia de remoção apresenta hoje escala, custo e governança suficientes para compensar as emissões globais crescentes. A captura de carbono deve ser entendida como um complemento para setores de difícil abatimento, como cimento, cal, aço, refino, fertilizantes, produção de hidrogênio e alguns segmentos da geração elétrica.

Mitigação de CO₂: rotas complementares

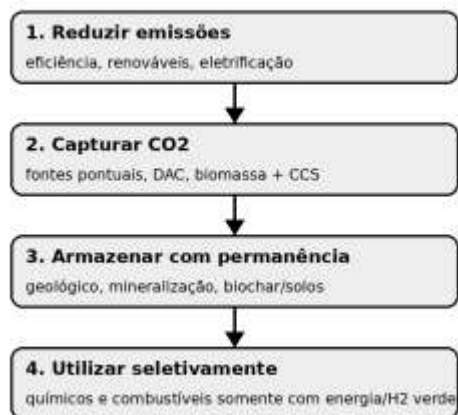


Figura 1. Taxonomia simplificada para a seleção de rotas de mitigação do CO₂ atmosférico.

A captura em fonte pontual evita que uma corrente concentrada de CO₂ alcance a atmosfera; por isso, é uma estratégia de redução de emissões, mas não necessariamente de remoção atmosférica. A remoção de CO₂, por definição, exige que o carbono seja retirado do ar e armazenado de forma duradoura. Reflorestamento, restauração de ecossistemas, manejo de solos, uso de “biochar” no solo, intemperismo acelerado, bioenergia com captura e armazenamento

de carbono (BECCS) e captura direta do ar com armazenamento (DACCS) são exemplos de rotas de CDR, desde que atendam aos critérios de adicionalidade, monitoramento, permanência e baixa emissão ao longo do ciclo de vida.

A distinção entre CCS, CCU, CCUS e CDR é essencial. CCS refere-se à captura e ao armazenamento de CO₂, usualmente proveniente de fontes industriais ou energéticas. CCU transforma ou incorpora CO₂ em produtos, mas a permanência pode ser curta, como nos combustíveis sintéticos, que devolvem CO₂ ao ar durante a combustão. CCUS inclui captura, uso e armazenamento; é uma sigla ampla. CDR é mais restrita: requer a remoção líquida do CO₂ atmosférico e seu armazenamento de forma duradoura. Assim, uma planta de captura de gás natural reduz as emissões, mas não remove CO₂ do ar; já DACCS e BECCS podem remover CO₂ do ar, se o balanço de ciclo de vida for negativo.

Captura em fontes pontuais e captura direta do ar

A captura em fontes pontuais é favorecida por correntes com maior pressão parcial de CO₂, como gás de reforma, gás natural ácido, fermentações industriais, cimento, cal e algumas correntes de combustão. Tecnologias usuais incluem absorção química com aminas, absorventes físicos, adsorventes sólidos, membranas, processos criogênicos e oxidação. O custo energético depende da concentração de CO₂, da presença de impurezas, da integração térmica e do destino do CO₂ capturado. Em fontes diluídas, como gases de combustão atmosféricos, a regeneração do solvente pode dominar o consumo de energia.

A captura direta do ar é tecnicamente mais desafiadora porque o CO₂ atmosférico está muito diluído. Adsorventes alcalinos, hidróxidos, carbonatos e materiais amínicos suportados são alternativas investigadas para DAC. A vantagem é a flexibilidade locacional: a instalação pode ser posicionada próxima a fontes de energia renovável, a sistemas de armazenamento geológico ou a cadeias de suprimento de CO₂. A desvantagem é a maior demanda energética por tonelada capturada. Portanto, DACCS tende a ser mais apropriado para compensar emissões residuais difíceis de eliminar, não para substituir a descarbonização direta de grandes fontes fósseis (Sanz-Pérez et al., 2016; Keith et al., 2018).

O acompanhamento recente da IEA indica que o CCUS ainda está fora da trajetória necessária para cenários de zero líquido, embora a carteira de projetos tenha crescido. Em 2024, a IEA registrava cerca de 45

instalações comerciais em operação e mais de 700 projetos em diferentes estágios de desenvolvimento, com capacidade anunciada de captura para 2030 de cerca de 435 MtCO₂ por ano (IEA, 2024). Esses valores são relevantes, mas permanecem abaixo do limite de gigatoneladas discutido para a neutralidade climática.

Armazenamento geológico, mineralização e permanência

A etapa de armazenamento determina se a captura terá um efeito climático duradouro. Reservatórios salinos profundos, campos de petróleo e gás depletados, formações basálticas e carvão não mineralizável são opções geológicas. A injeção em aquíferos salinos e em formações depletadas é a alternativa de maior escala potencial, exigindo caracterização geológica, modelagem de pluma, controle de pressão, integridade dos poços, monitoramento sísmico e verificação de vazamentos. O uso em recuperação avançada de petróleo (EOR) tem experiência operacional, mas sua contribuição climática depende do balanço entre o CO₂ armazenado e as emissões associadas ao petróleo adicional produzido.

A mineralização converte CO₂ em carbonatos sólidos, o que proporciona elevada permanência. Pode ocorrer *in situ*, em rochas reativas como basaltos, ou *ex situ*, em resíduos alcalinos, escórias e minerais ricos em Ca e Mg. O caso CarbFix demonstrou rápida mineralização em formações basálticas, com uma grande fração do CO₂ injetado convertida em carbonatos em poucos anos (Matter et al., 2016). A limitação é a disponibilidade de rochas adequadas, de água, de capacidade para a preparação de minerais e de logística. Ainda assim, a mineralização é atrativa para aplicações regionais e para materiais de construção.

Soluções baseadas na natureza, como o reflorestamento, a restauração de manguezais e o manejo de solos, são indispensáveis por sua sinergia com a biodiversidade, a água e a adaptação climática. Entretanto, têm risco de reversão devido a incêndios, mudanças no uso da terra, pragas e eventos climáticos extremos. Por isso, não devem ser usadas como compensação irrestrita das emissões permanentes de gases de efeito estufa. O uso de “biochar” amplia a permanência do carbono biogênico no solo e pode gerar benefícios agrônômicos, mas depende de biomassa sustentável, controle de pirólise, logística e medição confiável do carbono estável.

Uso químico do CO₂ e requisito de energia verde

O uso químico do CO₂ é conceitualmente atraente porque transforma um passivo ambiental em matéria-prima. Contudo, é necessário evitar interpretações equivocadas. O CO₂ possui carbono no estado de oxidação +4 e baixa energia química; para transformá-lo em CO, metanol, metano, olefinas, hidrocarbonetos ou álcoois superiores, é necessário fornecer energia e/ou H₂. Logo, a conversão só reduz as emissões se o H₂ for obtido de fontes renováveis ou de muito baixa emissão, e se a energia consumida não implicar emissões equivalentes maiores do que as do CO₂ convertido.

Três rotas ilustram a discussão. Na reação reversa de deslocamento gás-água, CO₂ + H₂ -> CO + H₂O, obtém-se CO para síntese posterior via Fischer-Tropsch ou outros processos. Na hidrogenação a metanol, CO₂ + 3H₂ -> CH₃OH + H₂O, forma-se uma plataforma química e energética que pode ser convertida em dimetil éter, olefinas ou gasolina sintética em zeólitas. Na metanação, CO₂ + 4H₂ -> CH₄ + 2H₂O, produz-se um gás sintético compatível com a infraestrutura existente. Em todos os casos, a origem do H₂ determina o resultado ambiental (Olah et al., 2011; Vogt et al., 2019).

Outro uso é a produção de carbonatos, bicarbonatos, ureia, carbonatos orgânicos e materiais cimentícios carbonatados. Essas rotas podem apresentar maior permanência quando o CO₂ é incorporado a sólidos ou materiais de longa vida útil. Em contrapartida, combustíveis sintéticos obtidos a partir de CO₂ funcionam mais como reciclagem de carbono do que como remoção permanente, pois o carbono retorna à atmosfera no uso final. Mesmo assim, podem ser relevantes para a aviação, o transporte marítimo e a química de base quando combinados com a eletricidade renovável e a captura de CO₂ na atmosfera.

Tabela 1. Matriz qualitativa para comparação de alternativas de mitigação de CO₂.

Alternativa	Contribuição principal	Ponto crítico
Redução na fonte	Evita novas emissões por meio da eficiência, da eletrificação e dos renováveis.	Maior prioridade: depende de investimento e de mudanças nos processos.
Captura pontual + CCS	Reduz as emissões de cimento, cal, aço, H ₂ , fertilizantes e de energia.	Exige corrente adequada, energia, transporte, reservatório e MRV.
DACCS	Remove CO ₂ diretamente do ar e o armazena em um reservatório durável.	Alta demanda energética; usar para emissões residuais e de baixo teor de carbono.
BECCS/gaseificação	Combina carbono biogênico, energia/produtos e captura de CO ₂ .	Depende de biomassa sustentável e de logística de baixa emissão.
Natureza/solos	Remove CO ₂ com co-benefícios ecológicos e sociais.	Risco de reversão e de saturação; requer governança territorial.
Mineralização	Converte CO ₂ em carbonatos sólidos de alta permanência.	Limitada por rochas/resíduos reativos, água, moagem e cinética.
Uso químico	Gera metanol, CO, carbonatos, polímeros ou combustíveis sintéticos.	A mitigação depende de H ₂ e de energia verde, bem como da vida útil do produto.

Biomassa, gaseificação e emissões negativas

A biomassa ocupa uma posição estratégica porque retira CO₂ da atmosfera por meio da fotossíntese. Se a biomassa for convertida em energia, combustíveis ou produtos e o carbono concentrado no processo for capturado e armazenado, a rota pode gerar emissões negativas. A gaseificação de biomassa produz gás de síntese, que pode ser ajustado por meio de uma reação de deslocamento gás-água, purificado e convertido em combustíveis líquidos, metanol, hidrogênio ou eletricidade. A captura do CO₂ gerado no condicionamento do gás, especialmente após a etapa de shift, pode ser mais simples do que a DAC, pois a corrente é mais concentrada.

A vantagem de BECCS e de rotas biomassa-to-liquid com captura é a combinação entre a produção de energia e a remoção de CO₂ da atmosfera. As restrições são igualmente importantes: disponibilidade sustentável de biomassa, competição com alimentos, água e uso do solo, impactos sobre a biodiversidade, transporte de baixa densidade energética e controle das emissões associadas à cadeia agrícola. No Brasil, resíduos agroindustriais, bagaço, palha, biogás, vinhaça, resíduos florestais e efluentes orgânicos podem criar nichos tecnológicos promissores, sobretudo quando integrados às biorrefinarias e às plantas já existentes.

Integração e priorização tecnológica

A matriz indica que a questão central não é escolher uma única tecnologia, mas compor portfólios. Emissões de alta concentração e de difícil substituição podem ser tratadas com CCS; emissões dispersas e residuais podem ser compensadas por CDR; produtos químicos podem utilizar CO₂ quando houver energia renovável excedente, H₂ verde e mercado para produtos de maior valor. O armazenamento durável deve ser priorizado quando o objetivo for a remoção climática permanente. O uso químico deve ser priorizado quando houver ganho em circularidade, substituição de carbono fóssil e um balanço de ciclo de vida claramente favorável.

No caso brasileiro, a disponibilidade de biomassa, biogás, etanol, resíduos agroindustriais e energia renovável sugere oportunidades distintas das observadas em países com maior dependência de carvão. O país pode combinar biorrefinaria, fermentações, gaseificação de resíduos, captura em correntes de CO₂ biogênico e mineralização em resíduos alcalinos. A integração de hidrogênio de baixo carbono, catalisadores para RWGS, metanol e hidrocarbonetos sintéticos, bem como de sistemas de monitoramento, pode transformar a mitigação em uma plataforma tecnológica para a engenharia química.

CONCLUSÃO

As alternativas de mitigação do CO₂ atmosférico devem ser avaliadas quanto à hierarquia, à permanência e ao balanço energético. Reduzir as emissões continua sendo a ação prioritária; a captura, o armazenamento e a remoção de CO₂ são complementos necessários para setores de difícil abatimento e para compensar as emissões residuais. A remoção atmosférica em escala de gigatoneladas ainda exige desenvolvimento tecnológico, infraestrutura, verificação e governança.

O armazenamento geológico e a mineralização oferecem maior permanência, enquanto rotas biogênicas e soluções baseadas na natureza agregam co-benefícios, mas demandam controle de reversão e de sustentabilidade. O uso químico do CO₂ é promissor para produtos e combustíveis sintéticos, porém, deve ser tratado com rigor termodinâmico: sem H₂ ou energia de baixa emissão, a conversão de CO₂ pode apenas deslocar emissões. Assim, a melhor estratégia é um portfólio integrado que combine redução na fonte, CCUS em setores estratégicos, CDR durável e aproveitamento químico seletivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário FEI pelo ambiente acadêmico e de pesquisa que motivou a organização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- FUSS, S. et al. Negative emissions - Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 6, 063002, 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aabf9f.
- HASZELDINE, R. S. Carbon capture and storage: how green can black be? *Science*, v. 325, n. 5948, p. 1647-1652, 2009. DOI: 10.1126/science.1172246.
- IEA. Carbon Capture, Utilisation and Storage. Paris: International Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>. Acesso em: 18 jun. 2026.
- IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926.
- IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- KEITH, D. W.; HOLMES, G.; ST. ANGELO, D.; HEIDEL, K. A process for capturing CO₂ from the atmosphere. *Joule*, v. 2, n. 8, p. 1573-1594, 2018. DOI: 10.1016/j.joule.2018.05.006.

- MATTER, J. M. et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, v. 352, n. 6291, p. 1312-1314, 2016. DOI: 10.1126/science.aad8132.
- MINX, J. C. et al. Negative emissions - Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 6, 063001, 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aabf9b.
- NOAA. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide: Mauna Loa CO₂. Boulder: Global Monitoring Laboratory, 2026. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Acesso em: 18 jun. 2026.
- OLAH, G. A.; PRAKASH, G. K. S.; GOEPPERT, A. Anthropogenic chemical carbon cycle for a sustainable future. *Journal of the American Chemical Society*, v. 133, n. 33, p. 12881-12898, 2011. DOI: 10.1021/ja202642y.
- POÇO, J. G. R. Captura de carbono (CO₂ - dióxido de carbono). Centro Universitário FEI, 2024. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/368301334_Captura_d_e_carbono_-_CO2_Carbon_capture_storage_and_use.
- SANZ-PÉREZ, E. S.; MURDOCK, C. R.; DIDAS, S. A.; JONES, C. W. Direct capture of CO₂ from ambient air. *Chemical Reviews*, v. 116, n. 19, p. 11840-11876, 2016. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00173.
- SMITH, S. M. et al. The State of Carbon Dioxide Removal 2024. 2. ed. Oxford: University of Oxford, 2024. Disponível em: <https://www.stateofcdr.org>. Acesso em: 18 jun. 2026.
- TAKAHASHI, T. et al. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research Part II*, v. 56, n. 8-10, p. 554-577, 2009. DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
- VOGT, C.; MONAI, M.; KRAMER, G. J.; WECKHUYSEN, B. M. The renaissance of the Sabatier reaction and its applications on Earth and in space. *Nature Catalysis*, v. 2, p. 188-197, 2019. DOI: 10.1038/s41929-019-0244-4.