

MERCADO DE CARBONO E TECNOLOGIA BIOLÓGICA PARA REMOÇÃO DE CO₂ DA ATMOSFERA

MARIA CAROLINA GOMES SILVA E SILVA¹; RUBIANE BUCHWEITZ FICK²;
ALLANA REBEKA DE SANTANA³; KELIAN RAMIRE WASKOW GRELLERT⁴;
MARCOS ANTÔNIO DA SILVA⁵; MAURÍZIO SILVEIRA QUADROS⁶

¹Universidade Federal de Pelotas – mariacarolinagssilva@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – rubianebfick1@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – 007.santanaallana@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – keliangufpel@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – marcos_silvap1@hotmail.com

⁶Universidade Federal de Pelotas – mausq@hotmail.com

1. DESCRIÇÃO DA INOVAÇÃO

O enfrentamento das mudanças climáticas tem ampliado a necessidade de mecanismos capazes de promover não apenas a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), mas também a remoção do dióxido de carbono (CO₂) já presente na atmosfera. O mercado de carbono constitui um instrumento econômico capaz de atribuir valor financeiro à redução de emissões e à remoção de GEE, criando incentivos para investimentos em tecnologias, processos produtivos e soluções ambientais de baixo carbono. Segundo o Banco Mundial (2026), aproximadamente 29% das emissões globais de GEE já estão abrangidas por instrumentos de precificação direta de carbono.

Nesse contexto, destaca-se a instituição do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) no Brasil, por meio da Lei nº 15.042 de 2024. Esse sistema estabelece as bases para a regulamentação das emissões de GEE, bem como para a comercialização de ativos relacionados à redução/remoção de emissões GEE no Brasil. Devido as regulamentações e limitações às emissões e comercialização de ativos associados à emissão, impostas pelo sistema, ele é considerado um marco para o mercado de carbono brasileiro (Brasil, 2024).

Dessa forma, a inovação abordada neste trabalho consiste na análise do potencial de integração entre o mercado de carbono e tecnologias biológicas destinadas à captura e utilização de CO₂, com destaque para as microalgas como alternativa tecnológica para a captura e fixação de carbono lançado ou disponível na atmosfera. Para tal, a inovação consistirá na integração entre a captura biológica de CO₂ por microalgas e um módulo de contração do gás acoplado ao sistema de cultivo. O módulo utiliza um processo de adsorção por oscilação de pressão e temperatura para concentrar o CO₂ antes de sua disponibilização para o tanque de cultivo de microalgas. Essa configuração buscar elevar a pressão parcial do CO₂ e aumentar sua disponibilidade no meio de cultivo, favorecendo sua utilização pelas células das microalgas.

As microalgas apresentam características que despertam interesse para esse contexto devido a capacidade fotossintética ao utilizar CO₂ para produção de biomassa. Alguns estudos apontam que sistemas baseados nesses organismos podem associar captura de carbono à geração de biomassa e à possibilidade de aproveitamento de produtos de interesse econômico, aproximando a captura e utilização de CO₂ de conceitos relacionados à economia circular e à valorização de recursos (Daneshvar et al., 2022).

Entretanto, a capacidade de capturar o CO₂ não é suficiente, isoladamente para determinar a elegibilidade de uma tecnologia para a geração de créditos de carbono. Requisitos, como monitoramento, mensuração, quantificação, e permanência são essenciais para que haja integridade ambiental para comercializar os créditos gerados (ICVCM, 2024).

Assim, a proposta desse trabalho consiste em apresentar uma tecnologia de concentração e captura biológica de CO₂ e analisar seu potencial de inserção no contexto do mercado de carbono, considerando os requisitos necessários para a eventual geração de créditos de carbono.

2. ANÁLISE DE MERCADO

O mercado em potencial relacionado à inovação é composto principalmente por empresas com elevadas emissões de GEE, organizações submetidas a mecanismos regulatórios de precificação de carbono, empresas que possuem compromissos voluntários de redução de emissões, desenvolvedores de projetos ambientais, instituições financeiras, investidores em tecnologias climáticas e organizações interessadas em soluções de remoção de carbono. No Brasil, a tendência é que quando o SBCE esteja regulamentado e implementado, o mercado em potencial aumente, segundo o Ministério da Fazenda (2024).

As principais alternativas que concorrem pelo mesmo fluxo de investimentos climáticos incluem projetos de restauração e conservação florestal, recuperação de solos, bioenergia com captura e armazenamento de carbono, captura direta de CO₂ do ar, captura e armazenamento de carbono em processos industriais e outras tecnologias de remoção ou redução de emissões.

Nesse cenário, a tecnologia proposta apresenta como diferencial a integração entre um módulo de concentração de CO₂ e um sistema de captura biológica baseado no cultivo de microalgas. Em comparação com sistemas que utilizam diretamente o CO₂ disponível no ar, o módulo de concentração busca aumentar a disponibilidade do gás antes de sua introdução no tanque de cultivo das microalgas. A etapa biológica posterior permite a incorporação do carbono à biomassa da microalga, que pode ser direcionada a diferentes formas de aproveitamento. Daneshvar *et al.* (2022) destacam que a biofixação de CO₂ por microalgas pode ser associada à valorização da biomassa produzida, contribuindo para estratégias de utilização do carbono capturado.

Entretanto, existem limitações importantes. Ighalo *et al.* (2022) identificaram que a eficiência de captura e sequestro de CO₂ relatada na literatura pode variar significativamente, enquanto a viabilidade econômica e a avaliação do desempenho em escala ampliada ainda demandam estudos adicionais. Fatores como intensidade luminosa, temperatura, disponibilidade de carbono e condições fisiológicas das microalgas influenciam diretamente o desempenho dos sistemas de cultivo (Zhu *et al.*, 2023).

Nesse contexto, pode-se considerar como *Total Addressable Market* (TAM) o amplo mercado global de precificação e créditos de carbono; como *Serviceable Available Market* (SAM), o segmento relacionado a projetos de mitigação e remoção de carbono aplicáveis ao contexto brasileiro; e como *Serviceable Obtainable Market* (SOM), a parcela associada a tecnologias emergentes de captura biológica que consigam demonstrar adicionalidade, mensuração confiável, permanência e viabilidade econômica.

3. ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

O modelo de negócio está fundamentado na geração de valor a partir da redução ou remoção mensurável de GEE, associada à possibilidade de comercialização de créditos de carbono quando atendidos os critérios estabelecidos pelas metodologias e pelos sistemas de certificação aplicáveis.

Além das potenciais receitas, associada à eventual geração de créditos, Daneshvar et al. (2022) destacam justamente a possibilidade de utilização da biomassa microalgal em diferentes cadeias produtivas, ampliando o potencial econômico da tecnologia para além da captura de carbono.

Dessa forma, o modelo de negócio proposto pode combinar três fontes potenciais de valor: a redução ou remoção de CO₂, a comercialização de produtos derivados da biomassa e a prestação de serviços ambientais ou tecnológicos relacionados à gestão de carbono.

A implementação do sistema integrado de concentração de CO₂ e captura biológica pode ser estruturada em etapas sequenciais: levantamento bibliográfico e regulatório; definição de requisitos técnicos; desenvolvimento e avaliação experimental; quantificação da captura líquida de CO₂; avaliação do ciclo de vida; análise técnico-econômica; definição de metodologia de monitoramento, relato e verificação; avaliação da possibilidade de certificação; e, posteriormente, validação em escala piloto ou operacional.

A sequência torna-se relevante porque a simples quantificação da assimilação de CO₂ pela biomassa não representa, isoladamente, a remoção líquida do sistema. Estudos recentes apontam que os custos energéticos e operacionais podem reduzir significativamente os benefícios climáticos de sistemas microalgais quando não são adequadamente considerados (Zhang *et al.*, 2023).

Dentre os principais desafios estão a eficiência e o consumo energético da etapa de concentração de CO₂, os custos de operação, a necessidade de energia e nutrientes; a estabilidade dos sistemas microalgais, a variabilidade das condições cultivo, como pH e temperatura, o manejo da biomassa, a quantificação da remoção líquida de carbono (ICVCM, 2024).

Para diminuição dos riscos deve-se observar a avaliação de ciclo de vida, a análise técnico-econômica e os sistemas de monitoramento contínuo.

4. RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTO

Espera-se que a integração entre o módulo de concentração de CO₂ e o sistema de cultivo de microalgas aumente a disponibilidade de carbono para o processo biológico e permita avaliar a eficiência do sistema integrado na captura e utilização de CO₂. A quantificação do carbono capturado, associada à avaliação das emissões decorrentes da operação, permitirá determinar o balanço líquido de carbono do sistema. Além do desempenho tecnológico, espera-se avaliar o potencial de inserção dessa tecnologia no mercado de carbono.

Do ponto de vista ambiental, a utilização de processos biológicos para captura de CO₂ apresenta potencial como estratégias complementar às abordagens convencionais de mitigação. Estudos recentes demonstram que microalgas podem realizar biofixação de carbono por meio da fotossíntese e, simultaneamente, gerar biomassa passível de valorização em diferentes cadeias produtivas (Ighalo *et al.*, 2022; Daneshvar *et al.*, 2022).

Entretanto, o impacto ambiental positivo dependerá da existência de remoção líquida efetiva. Zhang *et al.* (2023) demonstram que sistemas de cultivo de microalgas podem, em determinadas condições, apresentar emissões indiretas

suficientes para comprometer sua função como sumidouro de carbono. Assim, a avaliação do ciclo de vida permitirá quantificar as emissões associadas às diferentes etapas do sistema e verificar se a captura de CO₂ resulta em benefício climático líquido.

No aspecto econômico, espera-se que haja fortalecimento do mercado de carbono brasileiro. O SBCE representa um importante avanço nesse sentido, uma vez que estabelece uma estrutura regulatória nacional para a comercialização de ativos associados às emissões, reduções e remoções de GEE (Brasil, 2024). Ademais, o Banco Mundial (2026) aponta que as receitas públicas associadas à precificação de carbono superaram US\$ 107 bilhões em 2025, enquanto a emissão de créditos nos mercados de crédito de carbono aumentou 8% entre 2024 e 2025, demonstrando bons indícios de avanços.

5. CONCLUSÕES

Por fim, a integração entre o mercado de carbono e tecnologias de concentração e captura biológica de CO₂ apresenta potencial para ampliar as estratégias de mitigação climática, associando inovação tecnológica, utilização de CO₂ por microalgas e geração de biomassa, desde que comprovadas sua viabilidade ambiental e econômica.

Por fim, recomenda-se o fortalecimento de pesquisas, pois a situação futura está diretamente ligada às políticas climáticas mundiais; inovações tecnológicas e novas metodologias; e ao mercado financeiro, contribuindo para os três pilares do desenvolvimento sustentável.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Brasília, DF, 2024.
- DANESHVAR, E.; WICKER, R. J.; SHOW, P.-L.; BHATNAGAR, A. Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization – A review. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 427, 130884, 2022.
- IGHALO, J. O.; DULTA, K.; KURNIAWAN, S. B.; OMOARUKHE, F. O.; EWUZIE, U.; ESHIEMOGIE, S. O.; OJO, A. U.; ABDULLAH, S. R. S. Progress in Microalgae Application for CO₂ Sequestration. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 3, 100044, 2022.
- INTEGRITY COUNCIL FOR THE VOLUNTARY CARBON MARKET (ICVCM). **Core Carbon Principles**. 2024.
- WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing 2026**. Washington, DC: World Bank Group, 2026. DOI: 10.1596/978-1-4648-2348-0.
- ZHANG, X.; AN, L.; TIAN, J.; JI, B.; LU, J.; LIU, Y. Microalgal capture of carbon dioxide: A carbon sink or source? **Bioresource Technology**, v. 390, 129824, 2023.
- ZHU, C.; HU, C.; WANG, J.; CHEN, Y.; ZHAO, Y.; CHI, Z. A precise microalgae farming for CO₂ sequestration: A critical review and perspectives. **Science of the Total Environment**, v. 901, 166013, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166013.