



Id.: EE09

## **IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM MERCADO DE CARBONO REGULAMENTADO NAS INDÚSTRIAS DE MINERAÇÃO E SIDERURGIA NO BRASIL - ESTUDO DE CASO**

**Maria L. S. Gonçalves<sup>1</sup>, Antonella L. Costa<sup>1</sup>, Carlos E. Velasquez <sup>1</sup>, Douglas S. Oliveira<sup>1</sup>, Gustavo N. P. Moura<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Nuclear, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Bloco 4- Pampulha, CEP 31270-901 Belo Horizonte, MG - Brasil; <sup>2</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Produção Campus Universitário Morro do Cruzeiro, s/n, CEP 35400-000 Ouro Preto, MG - Brasil maria.lu.goncalvess@gmail.com, antonella@nuclear.ufmg.br, carlosvelcab@nuclear.ufmg.br, douglasilva.olv@gmail.com, gustavo.moura@ufop.edu.br

**Palavras-Chave:** Mudanças climáticas, Mercado de carbono, Mineração, Siderurgia, Redução de emissões.

### **RESUMO**

As mudanças climáticas e seus impactos representam desafios complexos para o século XXI, sendo amplamente atribuídas às emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes de atividades humanas. O Brasil, um dos maiores emissores de GEE no cenário global, estabeleceu um compromisso de redução de emissões de 53% até 2030. No entanto, o país continua a enfrentar obstáculos substanciais, evidenciados pelos persistentes altos níveis de emissões e pela implementação ineficaz de políticas climáticas robustas e abrangentes. Dentre as principais fontes emissoras, destacam-se as indústrias de mineração e siderurgia, que representam uma parcela significativa das emissões nacionais de GEE. Nesse contexto, a adoção de um mercado de carbono regulado, análogo ao Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS), é considerada uma abordagem estratégica promissora para a mitigação desse desafio. A partir de uma análise comparativa baseada no ano de 2025, verificou-se que três empresas representativas desses setores industriais alcançaram reduções em suas emissões de 9,64%, 9,69%, e 12,11%, respectivamente, até 2030. A criação de um sistema de mercado de carbono que incorpore mecanismos de teto e comércio de emissões apresenta o potencial de induzir uma redução progressiva das emissões, além de promover práticas industriais mais sustentáveis e acelerar a transição para uma economia de baixo carbono.

### **1. INTRODUÇÃO**

As mudanças climáticas, bem como suas causas e consequências, representam um dos principais desafios que as diferentes sociedades ao redor do planeta enfrentam no século XXI [1]. Esse fenômeno está diretamente associado às emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) que têm contribuído significativamente para o aquecimento global e seus impactos adversos [2]. Por essa razão, cada vez mais países têm buscado aumentar a eficiência de suas atividades produtivas e implementar políticas de mitigação com o objetivo de garantir a redução de emissões de GEE [3]. O Brasil, que figura entre os dez maiores emissores mundiais de GEE [4], assumiu diversos compromissos voluntários para o controle de suas emissões perante órgãos internacionais [5]. Nesse contexto, em 2023, o país comprometeu-se a reduzir as emissões de GEE em 48% até 2025 e de 53% até 2030 [6], reforçando seu compromisso com a mitigação das mudanças climáticas e o desenvolvimento sustentável.

No entanto, o país caminha na contramão de suas metas climáticas, uma vez que as emissões de GEE seguem em níveis alarmantes. O Brasil continua entre os maiores emissores globais de



gases de efeito estufa, ocupando a sétima posição, com 3% das emissões totais, atrás de países como China (25,2%), Estados Unidos (12%), Índia (7%), União Europeia (6,6%), Rússia (4,1%) e Indonésia (4%) [7]. Além disso, as emissões per capita no Brasil superam a média global, em grande parte devido a setores como as indústrias de mineração e siderurgia. Esses setores, embora não sejam os maiores responsáveis, contribuem com cerca de 13% das emissões nacionais de GEE, principalmente pelo uso intensivo de energia e do processo de produção de aço, que libera grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [8].

A mineração, por exemplo, contribui significativamente para as emissões de CO<sub>2</sub>, principalmente pelo uso intensivo de maquinários pesados a diesel e processamento de minérios, geralmente proveniente de fontes não renováveis. Sendo assim, esses fatores somam-se aos impactos ambientais diretos, como desmatamento e degradação de solos devido às mudanças no uso da terra [9]. Por sua vez, a siderurgia gera emissões predominantemente no processo de produção de aço, onde o carvão coque é utilizado no alto-forno. Durante este processo, o carvão coque reage com o oxigênio e o minério de ferro para produzir ferro-gusa, liberando CO<sub>2</sub> como subproduto [9]. Como resultado, em 2020, a cadeia minero-siderúrgica emitiu 107,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Esse montante, que contribui diretamente para o agravamento da crise climática no Brasil e no mundo, responde por cerca de 5% das emissões totais brasileiras. [10]. Globalmente, o setor minero-siderúrgico responde por uma faixa de 7% a 9% das emissões antropogênicas de GEE, destacando sua importância nas discussões sobre mudanças climáticas [11].

Considerando o impacto significativo das emissões de CO<sub>2</sub> geradas pela cadeia minero-siderúrgica, a implementação de um teto para emissões, acompanhada pela aplicação de penalidades, surge como uma estratégia potencialmente eficaz para a redução das emissões nesse setor.

Para complementar essa estratégia, o mercado de créditos de carbono emerge como uma ferramenta adicional ao teto de emissões, oferecendo uma abordagem prática para a gestão das emissões no setor. Os créditos de carbono, que representam a redução ou remoção de uma tonelada de CO<sub>2</sub> ou seu equivalente de outros gases, são gerados por projetos que reduzem ou eliminam emissões de GEE [12]. Nesse sentido, empresas podem adquirir esses créditos para compensar suas próprias emissões, proporcionando uma forma flexível e eficiente de cumprir metas de redução [12]. Dentro desse cenário, existem dois principais tipos de mercado de carbono: o regulado e o voluntário. No mercado regulado, as empresas são obrigadas por legislação ou acordos internacionais, como o Acordo de Paris, a adquirir créditos de carbono para atender às suas obrigações legais, frequentemente através de sistemas de comércio de emissões (*Emission Trading Systems – ETS*) ou tributos sobre o carbono [13]. Em contraste, o mercado de carbono voluntário permite que empresas e entidades adquiram créditos para cumprir compromissos climáticos não obrigatórios por lei, contribuindo para iniciativas ambientais adicionais [13]. No Brasil, o mercado voluntário já está em operação, facilitando a transação de créditos gerados por projetos de redução ou remoção de emissões. [13]

No entanto, o impacto desse mercado ainda é limitado, refletindo os desafios enfrentados pelo país para maximizar a eficácia dos créditos de carbono e integrá-los de forma robusta nas políticas climáticas [14]. Entre os principais obstáculos estão a falta de regulamentação clara e consistente, as dificuldades na verificação e monitoramento das emissões, além da necessidade de incentivar a adoção de tecnologias mais limpas pelas empresas [15]. A oferta restrita de créditos de alta qualidade, junto à desconfiança dos investidores, limita o crescimento desse mercado [16].

Em contrapartida, a implementação de um mercado regulado de carbono no Brasil poderia mitigar algumas dessas dificuldades. Um sistema regulado garantiria limites obrigatórios de emissões e promoveria uma fiscalização mais rigorosa, obrigando as empresas a adotar estratégias mais eficazes de redução de GEE [17]. Tal estrutura proporcionaria maior previsibilidade econômica e estimularia o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono,



assegurando, ao mesmo tempo, a integridade ambiental dos créditos negociados [17]. Todavia, a transição para um mercado regulado enfrenta desafios consideráveis, como a resistência de setores com altas emissões, os custos envolvidos na implementação de sistemas de monitoramento e fiscalização, além da necessidade de apoio governamental para a criação de um arcabouço regulatório eficaz [18].

Um exemplo notável de um mercado de carbono bem estruturado é o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS). O EU ETS opera com base no princípio de "limite e comércio", estabelecendo um teto para a quantidade total de gases de efeito estufa (GEE) que pode ser emitida pelas instalações cobertas pelo sistema. Esse teto é reduzido anualmente para garantir uma diminuição contínua das emissões [19]. Dentro desse sistema, os créditos de carbono gerados por projetos que reduzem ou removem emissões podem ser negociados, proporcionando um incentivo financeiro para a redução das emissões [19]. Em 2023, o EU ETS ajudou a reduzir as emissões das usinas de energia e indústrias europeias em aproximadamente 47% em comparação com os níveis de 2005, evidenciando a eficácia desse modelo [19].

Nesse sentido, a adoção de um mercado de carbono regulado no Brasil, semelhante ao modelo europeu, se apresenta como uma estratégia promissora para alcançar as metas de redução de emissões na indústria minero-siderúrgica.

## 2. METODOLOGIA

Para evidenciar os benefícios mercado regulado de carbono o estudo propõe a implementação de um sistema de *cap-and-trade* (teto e comércio) no setor de siderurgia e mineração no Brasil, inspirado no modelo EU ETS [19]. O objetivo é analisar como este mercado pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa nesse setor, fornecendo incentivos econômicos para adoção de tecnologias mais limpas e maior eficiência energética. O estudo busca estabelecer um limite para as emissões de CO<sub>2</sub> das empresas, criando um mercado para compra e venda de licenças de emissão, promovendo assim a redução gradual das emissões.

Para otimizar a análise inicial e aprimorar a compreensão dos impactos das emissões de dióxido de carbono nos setores de siderurgia e mineração, optou-se por apresentar os perfis de emissão de três grandes empresas mineradoras e siderúrgicas no Brasil, com base em dados dos anos de 2021, 2022 e 2023 (Tab. 1). Por questões éticas, o anonimato das empresas foi mantido, sendo elas denominadas como A, B e C. As emissões reportadas por essas empresas foram extraídas de seus relatórios anuais de sustentabilidade, que são documentos disponíveis ao público em geral.

A escolha de um número restrito de empresas possibilita uma investigação detalhada das estratégias que cada uma pode adotar dentro de um sistema de *cap-and-trade*, evitando a complexidade de uma análise mais abrangente. Nesse sentido, as empresas selecionadas foram aquelas cujas emissões superam 10.000 toneladas de CO<sub>2</sub>, o que as insere no mercado de comércio de emissões (ETS). Esses relatórios seguem padrões internacionais de reporte de emissões, garantindo a transparência e a precisão dos dados. Dessa forma, essa abordagem oferece uma visão abrangente sobre os efeitos do mercado de carbono, tanto em empresas de grande porte quanto em aquelas com menores emissões, mas que ainda atendem ao critério do ETS.

Tab.1. Emissões anuais de CO<sub>2</sub> no setor de mineração e siderurgia em três empresas brasileiras (tCO<sub>2</sub>/ano)

Empresa	2020	2021	2022
Empresa A	13.798.228	9.621.850	16.777.586
Empresa B	9.621.850	10.003.673	9.636.231
Empresa C	33.766	32.963	27.184



Foi realizado um estudo para o período de 2025 a 2030 com o objetivo de avaliar os impactos da implementação de um mercado de carbono regulado no Brasil. A definição do preço inicial dos créditos de carbono foi baseada nas experiências de mercados regulados na América Latina. No México, por exemplo, os preços variam entre 3 e 4 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> [20], enquanto na Argentina, os preços médios variam entre 6 e 10 dólares por tonelada em 2023 [21]. Esses valores refletem tanto as condições econômicas desses países quanto o estágio de maturidade de seus mercados de carbono. No caso brasileiro, considerando que o mercado está em fase inicial, foi adotado um preço de 4 dólares por tonelada, que corresponde ao valor mais baixo observado na região. Esse preço inicial visa garantir que as empresas possam se adaptar gradualmente ao novo sistema, incentivando a descarbonização sem impor custos excessivos em um momento de transição.

A projeção de aumento anual de 2 dólares por tonelada, culminando em 14 dólares em 2030, reflete o crescimento esperado na demanda por créditos de carbono e a necessidade de alinhar os preços com os custos de projetos de compensação de carbono. No contexto brasileiro, o reflorestamento na Amazônia, uma das principais estratégias de compensação, apresenta custos de implementação que variam de 10 a 20 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>, dependendo da escala e da localização do projeto. Assim, o valor de 14 dólares foi estimado como suficiente para financiar projetos de reflorestamento e outras iniciativas de captura de carbono [23], garantindo que o sistema contribua efetivamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e seja economicamente viável para as empresas.

Além disso, a escolha desse valor leva em conta a necessidade de cobrir os custos ambientais de setores que contribuem significativamente para o desmatamento, como a siderurgia, que frequentemente utiliza carvão vegetal, muitas vezes de origem ilegal, como fonte de combustível e agente redutor na produção de ferro-gusa, agravando o problema do desmatamento [24].

No contexto do Brasil, a implementação de uma redução anual de 2% das licenças alocadas visa proporcionar uma meta realista e alcançável, semelhante à abordagem do EU ETS, e assegurar a redução efetiva das emissões ao longo do tempo. Para determinar o número de licenças que cada empresa receberá em 2025, foram utilizados dados históricos das emissões reais dos anos de 2020, 2021 e 2022. Essa escolha foi feita devido à falta de dados mais recentes, tornando os dados históricos uma base sólida para a estimativa das permissões alocadas. Embora não reflitam totalmente as condições futuras, as médias históricas oferecem um referencial confiável para projeções.

A partir dessas projeções e da quantidade de licenças alocadas, foi possível avaliar a diferença entre as permissões e as emissões reais de cada empresa. Essa avaliação é de suma importância para determinar se a empresa está dentro do limite estabelecido. Dessa forma, empresas com emissões superiores às permissões alocadas precisarão adquirir créditos de carbono adicionais, enquanto aquelas com emissões abaixo do limite poderão negociar créditos excedentes no mercado. Esse mecanismo incentiva a redução de emissões e promove práticas sustentáveis, alinhando o mercado brasileiro com os objetivos globais de mitigação climática.

### 3. RESULTADOS

Os resultados apresentados na Tab. 2 refletem diferentes estratégias adotadas pelas empresas para responder à introdução do mercado de carbono entre 2025 e 2030. As emissões projetadas ao longo deste período foram calculadas com base na implementação de tecnologias mais eficientes e nos efeitos de um mercado regulado, considerando estudos de caso de indústrias semelhantes que já adotaram essas tecnologias [25, 26, 27, 28]. As emissões atribuídas às empresas foram alocadas de acordo com um modelo que visa ilustrar o impacto das mudanças regulatórias, sem necessariamente refletir uma correspondência exata com a realidade. A



redução anual de 2% nas permissões de emissão forçou as empresas a buscar maior eficiência, tanto para atender às novas exigências quanto para explorar as oportunidades de comercialização de créditos excedentes.

Tab. 2. Dinâmica de emissões de CO<sub>2</sub> e negociação de créditos em um mercado regulado na indústria minero-siderúrgica

Ano	Em- presa	Emissões reais (tCO <sub>2</sub> )	Licenças alocadas (tCO <sub>2</sub> )	Diferença (tCO <sub>2</sub> )	Ação necessária	Crédito de carbono (US\$/tCO <sub>2</sub> )	Ganho/ Perda Potencial (US\$)
2025	A	15.769.332	15.769.332	0	-	-	-
2025	B	9.753.231	9.753.231	0	-	-	-
2025	C	30.073	30.073	0	-	-	-
2026	A	15.490.870	15.453.945	36.925	COMPRA	4	- 147.700
2026	B	9.582.399	9.558.166	24.233	COMPRA	4	- 96.932
2026	C	30.100	29.472	628	COMPRA	4	- 2.512
2027	A	15.150.870	15.144.866	6.004	COMPRA	6	- 36.020
2027	B	9.342.001	9.367.003	-25.002	VENDA	6	+ 150.012
2027	C	29.991	28.882	1.109	COMPRA	6	- 6.054
2028	A	14.830.968	14.841.969	-11.001	VENDA	8	+ 88.008
2028	B	9.182.650	9.179.663	2.987	COMPRA	8	- 23.896
2028	C	28.106	28.304	-198	VENDA	8	+ 1.584
2029	A	14.546.108	14.545.130	978	COMPRA	10	- 9.780
2029	B	8.990.059	8.996.070	-6.011	VENDA	10	+ 60.110
2029	C	26.738	27.738	-1.000	VENDA	10	+10.000
2030	A	14.248.188	14.254.227	-6.039	VENDA	12	+ 72.468
2030	B	8.808.136	8.816.148	-8.012	VENDE	12	+ 96.144
2030	C	26.430	27.184	-754	VENDA	12	+ 9048

Em 2025, as licenças de carbono foram alocadas com base nas emissões reais das empresas, estabelecendo esse ano como um marco inicial estratégico. Esse ponto de partida proporcionou às empresas a oportunidade de se familiarizarem com o funcionamento do mercado de carbono e ajustarem suas operações, sem a pressão imediata de ultrapassar os limites de emissões ou realizar negociações de créditos de carbono. Dessa forma, o ano de 2025 funcionou como um período de transição, permitindo que as empresas delineassem suas ações, compreendessem as dinâmicas do sistema de comércio de emissões e elaborassem estratégias de longo prazo para a redução de suas emissões, alinhando-se às exigências do mercado regulado de carbono.

A partir de 2026, com a redução progressiva de 2% nas licenças a cada ano, as empresas começaram a enfrentar a necessidade de ajustar suas emissões ou negociar créditos de carbono, seja comprando ou vendendo, conforme suas emissões se distanciassem do novo limite estabelecido. Dessa forma, o incentivo à redução de emissões tornou-se mais evidente, à medida que as empresas que ultrapassavam o limite enfrentavam a necessidade de adquirir créditos de carbono.

Ao analisar o desempenho das empresas A, B e C em 2026, observa-se que todas elas enfrentaram dificuldades em se adequar ao teto proposto, mesmo após o período de transição em 2025. A empresa A, por exemplo, registrou a maior perda potencial, sendo forçada a adquirir créditos no valor de \$147.700, enquanto a empresa B também adquiriu créditos no valor de \$96.932 e a empresa C \$2.512. Esses valores destacam as diferenças na capacidade de cada empresa em gerenciar suas emissões e responder às exigências do mercado de carbono. A empresa C, por ser de menor porte ou menos emissora, apresentou um impacto financeiro



menos severo, o que sugere que empresas menores podem ter mais flexibilidade ou menores desafios para se adequar às novas regras, enquanto empresas maiores enfrentam dificuldades proporcionais ao seu volume de emissões.

Em 2027, apenas a empresa B conseguiu se enquadrar nas licenças alocadas, o que reflete os efeitos positivos do incentivo econômico promovido pelo mercado de carbono. Com a venda de seus créditos excedentes, a empresa obteve um ganho significativo de \$150.012, demonstrando que a adaptação às novas regras trouxe benefícios financeiros. Esse resultado ilustra a importância do mercado de carbono como um mecanismo que não apenas penaliza emissões em excesso, mas também recompensa práticas eficientes de redução de emissões.

Por outro lado, as empresas A e C, embora ainda acima do limite de emissões em 2027, demonstraram uma redução significativa em suas emissões. A empresa A reduziu suas emissões em 3,92% em relação ao ano base de 2025, enquanto a empresa C obteve uma redução de 4,21%. No entanto, essa diminuição, embora positiva, não foi suficiente para enquadrá-las dentro do limite estabelecido, indicando que o processo de adaptação pode ser mais longo e exigente para algumas empresas, especialmente aquelas com maiores níveis de emissões iniciais.

Em 2028, tanto a empresa A quanto a empresa C conseguiram se adequar às licenças de carbono estabelecidas, apresentando reduções de 5,95% e 6,54%, respectivamente, em comparação ao ano base de 2025. A empresa A gerou uma receita de \$88.008 com a venda de créditos excedentes, enquanto a empresa C obteve \$1.584. Em contrapartida, a empresa B, apesar de ter alcançado uma redução de 5,75% em suas emissões comparadas ao ano base, ainda foi obrigada a adquirir créditos no valor de \$23.896, evidenciando que a plena adequação ao mercado regulado ainda não havia sido alcançada.

Em 2029, apenas a empresa A precisou comprar créditos de carbono, resultando em uma despesa de 9.780 dólares e uma redução de 7,75% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação ao ano base de 2025. Enquanto isso, as empresas B e C apresentaram um desempenho positivo no mercado de créditos de carbono, obtendo saldos de 60.110 dólares e 10.000 dólares em vendas, respectivamente.

No ano seguinte, 2030, todas as três empresas registraram lucro no mercado de créditos de carbono. A empresa A, que no ano anterior havia enfrentado um déficit, conseguiu alcançar um saldo positivo de 72.468 dólares. A empresa B, por sua vez, ampliou seu resultado positivo, atingindo um saldo de 96.144 dólares, enquanto a empresa C obteve um lucro de 9.048 dólares. Além dos ganhos financeiros, as três empresas também alcançaram reduções significativas nas suas emissões de GEE em 2030 em comparação a 2025. A empresa A obteve uma redução de 9,64%, a empresa B de 9,69%, e a empresa C atingiu uma redução de 12,11%. Esses resultados indicam uma tendência de maior eficiência na gestão das emissões e na adaptação ao mercado de créditos de carbono ao longo do tempo.

Esse panorama evidencia como o mercado de carbono regulado promoveu a redução das emissões e proporcionou uma nova fonte de receita para as empresas mais eficientes, criando um duplo incentivo — econômico e ambiental. Além de permitir que as empresas lucrassem com a venda de créditos excedentes, o mercado reforça a importância de uma gestão ambiental eficiente como parte da estratégia corporativa. Para a economia do país, esse cenário é extremamente promissor. Ao estruturar um mercado de carbono eficiente e regulamentado, o Brasil pode atrair mais investimentos em setores verdes e em tecnologias de baixo carbono, fortalecendo sua posição em acordos internacionais sobre mudanças climáticas, uma vez que a receita gerada com a venda de créditos pode também estimular outros setores a inovarem, buscando reduzir suas emissões e aumentar sua competitividade. Ademais, o fortalecimento de um mercado de carbono interno pode posicionar o Brasil como um importante exportador de créditos de carbono, especialmente em um contexto global em que a demanda por soluções sustentáveis é crescente. Isso impulsionaria o setor industrial e a imagem internacional do país como um líder no combate às mudanças climáticas.



#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a viabilidade da implementação de um mercado de carbono regulado no Brasil, inspirado no Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS). O ETS surge como uma estratégia eficaz para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente nos setores de mineração e siderurgia. A análise das três empresas representativas desses setores indicou que, entre 2025 e 2030, a adoção de um sistema de cap-and-trade com redução progressiva de licenças e valores crescentes para os créditos de carbono resultou em reduções significativas de emissões, alcançando 9,64%, 9,69%, e 12,11%, respectivamente, até 2030. Durante o período analisado, as empresas que ultrapassaram os limites de emissões tiveram que comprar créditos, enquanto aquelas que conseguiram reduzir suas emissões puderam vender créditos excedentes, gerando ganhos financeiros. Esse mecanismo promoveu a eficiência energética e a adoção de tecnologias mais limpas, criando incentivos econômicos para a redução de GEE. Além de focar nos setores de mineração e siderurgia, é fundamental que o mercado de carbono não se limite a essas áreas, mas seja estendido a outros setores que também possuem altas emissões, como o setor de transporte, agricultura e geração de energia. A inclusão de uma gama mais ampla de setores aumentaria o impacto do sistema de comércio de emissões, proporcionando uma abordagem mais abrangente para a mitigação das mudanças climáticas. Ao se alinhar com padrões internacionais, o Brasil se posiciona de forma competitiva no mercado global de carbono, facilitando a transição para uma economia de baixo carbono e incentivando práticas industriais mais sustentáveis. Contudo, a implementação de tal sistema exige um planejamento estratégico cuidadoso, considerando as peculiaridades do contexto econômico e industrial brasileiro. A adaptação das empresas ao mercado de carbono regulado requer um equilíbrio entre rigor ambiental e competitividade econômica. Para garantir o sucesso da transição, é essencial estabelecer mecanismos de apoio à inovação tecnológica e à eficiência energética, além de uma governança clara que assegure a transparência e a integridade do mercado de carbono.

#### AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) pelo apoio financeiro direto ao desenvolvimento dessa pesquisa. À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio indireto.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MARTIN, J. L.; MARIS, V.; SIMBERLOFF, D. S. *The need to respect nature and its limits challenges society and conservation science*. PNAS, 113, n. 22, p. 6105-6112, 2016.
- [2] IPCC. **Relatório de Avaliação 6 (AR6)**: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Genebra: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: outubro de 2024.
- [3] ZHANG, J.; XING, Z.; WANG, J. *Analysis of CO2 emission performance and abatement potential for municipal industrial sectors in Jiangsu, China*. Sustainability, 8, n. 7, p. 697- 711, 2016.
- [4] WORLD BANK. *World Bank Group*, 2016. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/>>. Acesso em: setembro de 2024.
- [5] SOARES, T. C.; CUNHA, D. A. DA. **Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil**. *Nova Economia*, v. 29, n. 2, p. 429–458, ago. 2019.
- [6] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. NDC - **Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC>. Acesso em: outubro de 2024



- [7] Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies*. Nairobi, 2022. Disponível em: Acesso: setembro de 2024
- [8] OUR WORLD IN DATA. *Brazil: CO<sub>2</sub> Country Profile*. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2/country/brazil>. Acesso em: outubro de 2024.
- [9] **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MTI)**. Inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa: setor ferro e aço. São Paulo: CETESB, 2014. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil\\_mcti\\_ferro\\_aco.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil_mcti_ferro_aco.pdf). Acesso em: setembro de 2024
- [8] **Energia e suas implicações para as metas do Brasil 1970-2021**. [s.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/SEEG-10-anosv5.pdf>. Acesso em: setembro de 2024.
- [9] ANGELO, C. **Mineração responde por 5% das emissões do Brasil** – OC, Observatório do Clima. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/mineracao-responde-por-5-das-emissoes-do-brasil/>. Acesso em: setembro de 2024
- [10] Observatório do Clima. **Mineração responde por 5% das emissões do Brasil**. Disponível em: <https://oc.eco.br/mineracao-responde-por-5-das-emissoes-do-brasil/>. Acesso em: 10 set. 2024.
- [11] Redação Siderurgia Brasil. **O aço mundial em números segundo a Worldsteel**, Portal Siderurgia Brasil, Notícias sobre a Indústria Siderúrgica. Disponível em: <https://siderurgiabrasil.com.br/2024/06/06/o-aco-mundial-em-numeros-segundo-a-worldsteel/>. Acesso em: 10 set. 2024.
- [12] Carbon Free Brasil. **"Compensação de Emissões de GEE."** Carbon Free Brasil, 2024. Disponível em: <https://carbonfreebrasil.com/compensacao-de-emissoes-de-gee/>. Acesso em setembro de 2024.
- [13] Iberdrola. **"Mercados de Carbono e Direitos de Emissão de CO<sub>2</sub>."** Iberdrola, 2024. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/meio-ambiente/gestao-ambiental/mercados-carbono-direitos-emissao-co2/>. Acesso em setembro de 2024.
- [14] Agência Brasil. **"Mercado Voluntário de Carbono no Brasil Recua em 2023."** Agência Brasil, 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.etc.com.br/economia/noticia/2024-07/mercado-voluntario-de-carbono-no-brasil-recua-em-2023/>. Acesso em setembro de 2024.
- [15] ICC Brasil. (2023). **Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono: Sumário Executivo**. *International Chamber of Commerce*. Disponível em: [https://www.iccbrasil.org/wp-content/uploads/2023/11/SUMARIO\\_ICCBR\\_2023\\_PT.pdf](https://www.iccbrasil.org/wp-content/uploads/2023/11/SUMARIO_ICCBR_2023_PT.pdf). Acesso em outubro de 2024.
- [16] LIBRETEXTS. **Demanda e oferta nos mercados financeiros**. Disponível em: [https://www.libretexts.org/Bookshelves/Financial\\_Markets\\_and\\_Institutions/4%3A\\_Demand\\_and\\_Supply\\_in\\_Financial\\_Markets/4.03%3A\\_Equilibrium\\_in\\_Financial\\_Markets](https://www.libretexts.org/Bookshelves/Financial_Markets_and_Institutions/4%3A_Demand_and_Supply_in_Financial_Markets/4.03%3A_Equilibrium_in_Financial_Markets). Acesso em outubro de 2024.
- [17] INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Avaliação de Impacto do Programa de Agricultura de Baixo Carbono no Brasil**. Brasília: IPEA, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br>.
- [18] ANBIMA. **Transição ecológica e mercado de carbono esquentam a pauta de 2023**. Disponível em: [https://www.anbima.com.br/pt\\_br/assuntos/mercado-de-capitais/noticias/2023-02-brasil-na-esteira-da-transicao-ecologica-e-do-mercado-regulado-de-carbono.htm](https://www.anbima.com.br/pt_br/assuntos/mercado-de-capitais/noticias/2023-02-brasil-na-esteira-da-transicao-ecologica-e-do-mercado-regulado-de-carbono.htm). Acesso em: outubro de 2024.
- [19] European Commission. **"What Is the EU Emissions Trading System (EU ETS)?"** European Commission, 2024. Disponível em: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets\\_en/](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en/). Acesso em setembro de 2024.
- [20] S&P Global Commodity Insights. (2024, April 3). **Mexico ETS delay likely to persist on regulatory uncertainty, lack of political will: Sources**. Retrieved from <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/040324-mexico-ets-delay-likely-to-persist-on-regulatory-uncertainty-lack-of-political-will-sources>. Acesso em setembro de 2024
- [21] Gnarly Tree Sustainability. (2022). **Case study: Carbon pricing in Argentina**. Retrieved from <https://gnarlytreesustainability.com/wp-content/uploads/2022/07/Case-3Argentina.pdf>. Acesso em: setembro de 2024
- [22] SILVA, Natanael Rodrigues. **Análise da Implementação do Mercado de Carbono no Brasil: Desafios e Oportunidades**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Economia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.
- [23] Busch, J., Bukoski, JJ, Cook-Patton, SC et al. **Custo-efetividade da regeneração florestal natural e plantações para mitigação climática**. *Nat. Clim. Chang.* 14 ,996–1002 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02068-1>



**Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações – VII SENCIR**  
Belo Horizonte, 12 a 14 de novembro de 2024

- [24] **Ministério do Meio Ambiente. Siderúrgicas multadas por uso ilegal de carvão vegetal.** Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/siderurgicas-multadas-por-uso-ilegal-de-carvao-vegetal>. Acesso em: setembro de 2024
- [25] Siemens. **Siemens Sustainability Information 2023.** Disponível em: <https://new.siemens.com/global/en/company/sustainability.html>. Acesso em setembro de 2024.
- [26] Vale. **Relatório de Sustentabilidade 2023.** Disponível em: <http://www.vale.com/EM/aboutvale/sustainability/>. Acesso em setembro de 2024.
- [27] Tesla. **Tesla Impact Report 2023.** Disponível em: <https://www.tesla.com/impact-report>. Acesso em setembro de 2024.
- [28] ArcelorMittal. **Climate Action Report 2022.** Disponível em: <https://corporatearcelormittal.com/sustainability/climate-action/climate-action-report-2022>. Acesso em setembro de 2024.