



INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

VICTOR SANTOS CARNEIRO

**DIAGNÓSTICO DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA, DESAFIOS E
ESTRATÉGIAS DE DESCARBONIZAÇÃO PARA A INDÚSTRIA DA
TRANSFORMAÇÃO DO BRASIL**

Marechal Deodoro – AL

2025

VICTOR SANTOS CARNEIRO

**DIAGNÓSTICO DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA, DESAFIOS E
ESTRATÉGIAS DE DESCARBONIZAÇÃO PARA A INDÚSTRIA DA
TRANSFORMAÇÃO DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira
Maia

Marechal Deodoro – AL

2025



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
***Campus* Marechal Deodoro**
Biblioteca Dorival Apratto

363.7

C289d

Carneiro, Victor Santos.

Diagnóstico de emissões de gases do efeito estufa, desafios e estratégias de descarbonização para a indústria da transformação do Brasil / Victor Santos Carneiro. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 1,36 MB). – 2025.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Orientação: Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia.

Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Marechal Deodoro, Marechal Deodoro, 2025.

1. Mudanças do clima. 2. Sustentabilidade industrial. 3. Eficiência energética. 4. Tecnologia de baixo carbono. 5. Indicadores de performance ambiental. I. Maia, Stoécio Malta Ferreira. II. Título.

VICTOR SANTOS CARNEIRO

**DIAGNÓSTICO DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA, DESAFIOS E
ESTRATÉGIAS DE DESCARBONIZAÇÃO PARA A INDÚSTRIA DA
TRANSFORMAÇÃO DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Aprovado em: 17 de dezembro de 2025

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente
STOECIO MALTA FERREIRA MAIA
Data: 05/01/2026 17:20:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia (Orientador)

Instituto Federal de Alagoas - IFAL



Documento assinado digitalmente
SHEILA KAROLINA JUSTINO MARQUES
Data: 05/01/2026 18:12:17-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Sheyla Karolina Justino Marques

Instituto Federal de Alagoas - IFAL



Documento assinado digitalmente
KARINA RIBEIRO SALOMON
Data: 06/01/2026 13:24:56-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dra. Karina Ribeiro Salomon

Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Marechal Deodoro – AL

2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo à minha esposa Natália e aos meus filhos, Francisco e Pedro. Foram eles que, com paciência e carinho, suportaram minha ausência e entenderam minha dedicação aos estudos. Sem esse apoio em casa, nada disso teria sido possível.

Aos meus pais, que são motivos de orgulho e sempre acreditaram na educação como caminho. Foram eles que, desde cedo, me incentivaram a estudar e nunca deixaram faltar apoio.

Agradeço também aos professores e colegas de curso pela convivência, pelas trocas e pelos aprendizados ao longo dessa jornada. Em especial, ao professor Stoécio, meu orientador, pela orientação firme, pelas provocações intelectuais e pela confiança no meu trabalho.

À Braskem, meu reconhecimento pelo incentivo e por me permitir conciliar o estudo com a vida profissional. Esse apoio fez toda a diferença.

E ao Instituto Federal de Alagoas, instituição pública que honra seu papel de fomentar pesquisa e inovação, meu muito obrigado por abrir espaço para o conhecimento e por acreditar na transformação que ele pode gerar. Que a ciência continue sendo ferramenta de mudança, desenvolvimento e esperança para o nosso país.

CARNEIRO, Victor Santos. Diagnóstico de Emissões de Gases do Efeito Estufa, Desafios e Estratégias de Descarbonização para a Indústria da Transformação do Brasil. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - *Campus* Marechal Deodoro, Instituto Federal de Alagoas Marechal Deodoro, 2025.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo diagnosticar os principais desafios e propor estratégias de descarbonização para a indústria da transformação brasileira, com foco nas emissões diretas de gases de efeito estufa (GEE), classificadas como Escopo 1. A pesquisa é de natureza quantitativa e descritiva, baseada na análise de 264 inventários corporativos publicados entre 2021 e 2023 por 88 organizações do setor, disponíveis no Registro Público de Emissões. As organizações foram classificadas em 14 subsetores industriais, permitindo avaliação segmentada da contribuição de cada grupo para o total de emissões.

Os resultados revelam que os subsetores de metalurgia e construção civil concentram aproximadamente 75% das emissões diretas da indústria da transformação, com predominância das categorias de processos industriais e combustão estacionária, que juntas representam mais de 90% das emissões de Escopo 1. A análise das dez organizações com maior emissão demonstrou que elas são responsáveis por 90,85% do total de emissões diretas, evidenciando forte concentração em poucos agentes econômicos. Esse padrão reforça a necessidade de estratégias setoriais específicas e ações corporativas direcionadas.

Foram construídos cenários prospectivos até 2030 com base em consumo per capita e projeção populacional. No subsetor da metalurgia, estima-se uma produção de 23,7 milhões de toneladas de aço, com potencial de redução de emissões de 50,7 MtCO_{2e} para 42,3 MtCO_{2e}, totalizando economia de 8,4 MtCO_{2e}. No subsetor da construção civil, a produção estimada de cimento é de 64,8 milhões de toneladas, com redução projetada de 38,4 MtCO_{2e} para 31,6 MtCO_{2e}, o que representa economia de 6,8 MtCO_{2e}. Esses dados demonstram que a adoção de tecnologias de baixo carbono e práticas operacionais mais eficientes pode gerar ganhos ambientais significativos.

Apesar dos avanços observados, o estudo identificou lacunas importantes na gestão climática corporativa. Apenas 44% das organizações analisadas reportaram indicadores de descarbonização em seus inventários, e menos de 15% implementaram projetos de compensação. A ausência de metas claras e padronização de métricas dificulta o monitoramento do progresso e limita a capacidade de comparação entre empresas e subsetores. Além disso, nenhuma das dez maiores emissoras relatou iniciativas de compensação, o que evidencia a necessidade de maior engajamento com práticas de neutralização de emissões.

Conclui-se que a descarbonização da indústria da transformação é essencial para mitigar os impactos das mudanças climáticas. A transição para uma economia de baixo carbono exige colaboração entre setor público e privado, inovação tecnológica, padronização de indicadores e maior comprometimento com metas ambientais. O estudo contribui com subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas e para o reposicionamento estratégico do setor industrial brasileiro frente aos desafios climáticos globais.

Palavras-chave: Mudanças do clima, Sustentabilidade Industrial, Eficiência energética, Tecnologias de baixo carbono, Indicadores de performance ambiental.

CARNEIRO, Victor Santos. Assessment of Greenhouse Gas Emissions, Challenges, and Decarbonization Strategies for Brazil's Manufacturing Industry. Dissertation (Master in Environmental Technologies) - Campus Marechal Deodoro, Federal Institute of Alagoas Marechal Deodoro, 2025.

ABSTRACT

This study aims to diagnose the main challenges and propose decarbonization strategies for Brazil's manufacturing industry, focusing on direct greenhouse gas (GHG) emissions, classified as Scope 1. The research is quantitative and descriptive, based on the analysis of 264 corporate inventories published between 2021 and 2023 by 88 organizations in the sector, available in the Public Emissions Registry. The organizations were classified into 14 industrial subsectors, allowing a segmented assessment of each group's contribution to total emissions.

Results show that the metallurgy and civil construction subsectors account for approximately 75% of direct emissions, with a predominance of industrial processes and stationary combustion categories, which together represent over 90% of Scope 1 emissions. The ten highest-emitting organizations are responsible for 90.85% of total direct emissions, highlighting a strong concentration among a few economic agents. This pattern reinforces the need for sector-specific strategies and targeted corporate actions.

Decarbonization scenarios were developed for 2030 based on per capita consumption and population projections. In the metallurgy subsector, steel production is estimated at 23.7 million tons, with potential emission reductions from 50.7 MtCO_{2e} to 42.3 MtCO_{2e}, totaling 8.4 MtCO_{2e} avoided. In civil construction, cement production is projected at 64.8 million tons, with emissions decreasing from 38.4 MtCO_{2e} to 31.6 MtCO_{2e}, resulting in a reduction of 6.8 MtCO_{2e}. These figures demonstrate that adopting low-carbon technologies and more efficient operational practices can generate significant environmental gains.

Despite these advances, the study identified critical gaps in corporate climate management. Only 44% of the organizations reported decarbonization indicators in their inventories, and less than 15% implemented offset projects. The lack of clear targets and standardized metrics hinders progress monitoring and limits comparability across companies and subsectors. Furthermore, none of the ten largest emitters reported offset initiatives, underscoring the need for greater engagement with emission neutralization practices.

It is concluded that decarbonizing the manufacturing industry is essential to mitigate the impacts of climate change. The transition to a low-carbon economy requires collaboration between public and private sectors, technological innovation, standardized indicators, and stronger commitment to environmental goals. This study provides technical insights to support public policy formulation and the strategic repositioning of Brazil's industrial sector in response to global climate challenges.

Keywords: Climate Change, Industrial Sustainability, Energy Efficiency, Low-Carbon Technologies, Environmental Performance Indicators.

LISTA DE ABREVIATURAS

- CO_{2e}** – Gás Carbônico equivalente
- CNI** – Confederação Nacional da Indústria
- COP** – Conferência das Partes
- CSN** – Companhia Siderúrgica Nacional
- ESG** – Ambiental, Social e Governança
- FGV** – Fundação Getúlio Vargas
- GEE** – Gases de Efeito Estufa
- GHG** – Green House Gas (Gás de Efeito Estufa)
- GRI** – *Global Reporting Initiative*
- HFC** – Gases Hidrofluorcarbonos
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IPCC** – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
- NBR** – Norma Brasileira
- NDC** – Contribuição Nacionalmente Determinada
- ODS** – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas
- ONU** – Organização das Nações Unidas
- PCI** – *Pulverized Coal Injection* (Injeção de Carvão Pulverizado)
- PIB** – Produto Interno Bruto
- PNUMA** – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
- RCD** – Resíduos de Construção e Demolição
- RPE** – Registro Público de Emissões
- WMO** – Organização Meteorológica Mundial
- WSA** – World Steel Association

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
Figura 1. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).....	24
Figura 2. Evolução do número de organizações com inventário de GEE publicado no RPE.....	33
Figura 3. Tipo de informações disponíveis nos inventários de GEE utilizados na análise da indústria da transformação brasileira (2021-2023).....	35
Figura 4. Etapas metodológicas de coleta, tabulação e análise dos dados de emissões de GEE da indústria da transformação brasileira (2021–2023).....	37
Figura 5. Comparação da média de emissões de GEE de escopo 1 entre todos os setores empresariais e a indústria da transformação no Brasil (2021–2023).....	41
Figura 6. Distribuição média das emissões de escopo 1 por categoria na indústria da transformação brasileira (2021–2023).....	43
Figura 7. Distribuição das 88 organizações da indústria da transformação brasileira por subsetor de atuação, conforme classificação adotada no estudo.....	44
Figura 8. Participação média dos subsetores da indústria da transformação nas emissões de escopo 1, por categoria de fonte emissora (2021–2023).....	46
Figura 9. Distribuição das 10 organizações com maior emissão de GEE por subsetor da indústria da transformação brasileira (2021–2023).....	48
Figura 10. Distribuição média das emissões de escopo 1 por categoria nas 10 organizações com maior emissão da indústria da transformação.....	49
Figura 11. Organizações com indicadores de descarbonização (A) e inventários com indicadores de descarbonização (B) (2021-2023).....	58

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Emissões de GEE da indústria da transformação por escopo nos anos de 2021, 2022 e 2023 (MtCO ₂ e).....	42
Tabela 2. Emissões diretas de GEE de Escopo 1 por subsetor da indústria da transformação nos de 2021, 2022 e 2023, com média anual e participação percentual (MtCO ₂ e).....	45
Tabela 3. Emissões de GEE de Escopo 1 das 10 organizações da indústria da transformação com maior média anual nos anos de 2021, 2022 e 2023, incluindo desvio padrão e variação percentual	48
Tabela 4. Projetos de compensação de GEE realizados pela indústria da transformação entre 2021, 2022 e 2023, por subsetor e quantidade total compensada.....	55
Tabela 5. Indicadores de descarbonização reportados nos inventários de GEE das organizações da indústria da transformação, organizados por subsetor e tipo de métrica utilizada.....	59
Tabela 6. Desempenho dos indicadores de descarbonização das 10 organizações com maior emissão.....	61
Tabela 7. Cenários de emissão de GEE de 2023 a 2030 da subcategoria da metalurgia.....	64
Tabela 8. Projeções de produção e de emissão de GEE da subcategoria da metalurgia.....	65
Tabela 9. Cenários de emissão de GEE de 2023 e 2030 da subcategoria da construção civil.....	66
Tabela 10. Projeções de produção e emissão de GEE da subcategoria da construção civil.....	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. JUSTIFICATIVA	23
3. OBJETIVOS	25
3.1 Objeto geral	25
3.2 Objetos específicos	25
4. REVISÃO DE LITERATURA	26
4.1 Mudanças Climáticas e o Papel das Emissões Industriais.....	26
4.2 Governança Climática: Políticas Públicas e Compromissos Internacionais de Descarbonização	28
4.3 Indicadores de Desempenho Ambiental e Estratégias de Monitoramento na Indústria da Transformação	29
5. MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1 Tipo de pesquisa	32
5.2 Fonte de dados	32
5.3 Critérios de seleção da amostra	33
5.4 Classificação por subsetores	34
5.5 Informações tabuladas por inventário	34
5.6 Delimitação das análises.....	36
5.7 Análise de dados	36
5.8 Dados de descarbonização	38
5.9 Projeção de Cenários	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
6.1 Indústria da Transformação	42
6.2 Emissão de Escopo 1 da Indústria da Transformação	42
6.3 Subsetores da Indústria da Transformação	44
6.4 As 10 Organizações da Indústria da Transformação com maior emissão de GEE	47
6.4.1 ArcelorMittal Brasil (Metalurgia)	50
6.4.2 Votorantim Cimentos (Construção Civil)	51
6.4.3 Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) (Metalurgia)	51
6.4.4 Ternium Brasil Ltda (Metalurgia)	51
6.4.5 Braskem (Químico e Plástico).....	52
6.4.6 Usiminas (Metalurgia).....	52
6.4.7 InterCement (Construção Civil)	53
6.4.8 Alcoa (Mineração).....	53
6.4.9 Suzano (Papel e Celulose)	53
6.4.10 Raízen Energia (Óleos e Combustíveis).....	54
6.5 Projetos de Compensação	54
6.6 Indicadores de Desempenho e Estratégias de descarbonização	57
6.7 Cenários de descarbonização para os principais subsetores	63
6.7.1 Subsetores da Metalurgia.....	64
6.7.2 Subsetores da Construção Civil.....	66
6.8 Desafios e Estratégias para a Descarbonização da Indústria da Transformação	68
6.8.1 Metalurgia.....	68
6.8.2 Construção Civil	70
6.9 Barreiras Transversais à Descarbonização	71
6.10 Políticas Públicas e Regulação	73
7. CONCLUSÕES	75

8. PRODUÇÃO DE PRODUTO TÉCNICO / TECNOLÓGICO.....	77
9. REFERÊNCIAS	78
10. APÊNDICE	88

1. INTRODUÇÃO

O planeta Terra tem atravessado mudanças naturais, com maior intensidade desde que começou a ser habitado pela humanidade. O desenvolvimento industrial aumentou a produção de manufaturas, mas também impulsionou o consumo dos recursos naturais e matéria prima, como também a geração rejeitos como resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas (Veloso, 2023).

No início da Revolução Industrial, no século XVIII, estes impactos não eram considerados relevantes. Com o tempo e a continuidade do desenvolvimento tecnológico, os impactos provocados pela atividade industrial atingiram velocidade maior do que a necessária para a recomposição da natureza, e esta desproporção tem causado consequências negativas ao planeta. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) afirma que existe 95% de probabilidade de atividades antrópicas estarem provocando o aquecimento global, por meio de emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2013).

A Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization* – WMO) publica anualmente o Relatório do Estado Global do Clima, com informações atualizadas sobre as condições climáticas globais que subsidiam o monitoramento das mudanças climáticas para a Conferência das Partes (COP). De acordo com a versão provisória do relatório de 2023, entre 2014 e 2023 a temperatura ficou 1,19 °C acima da média de 1850/1900, sendo esta década a mais quente registrada (WMO, 2023).

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) foi criado em 1988 por iniciativa conjunta do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e da Organização Meteorológica Mundial (OMM), com o objetivo de fornecer avaliações científicas sobre a mudança do clima, seus impactos e riscos futuros, além de propor ações de adaptação e mitigação (IPCC, 2024).

Segundo o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) (IPCC, 2023), do total de emissões líquidas de GEE de 1850 a 2019, 58% ocorreram entre 1850 e 1989 e o restante, 42%, ocorreram entre 1990 e 2019. Em 2019, as emissões provocadas pelo homem foram 12% mais altas do que em 2010 e 54% mais altas do que 1990, com maior contribuição da combustão de combustíveis fósseis e dos processos industriais.

As emissões identificadas pelo IPCC demonstram que mesmo com o aumento das políticas e leis no âmbito da geopolítica mundial, os resultados ainda não refletem na desaceleração global das emissões de GEE. O IPCC (2013) considera provável que o

aquecimento exceda 1,5°C durante o século 21 e, no pior cenário, pode chegar a 4°C antes de 2100.

A desaceleração de emissões pode ser alcançada por meio de mudanças nos padrões de consumo, adoção de medidas de eficiência energética, e mudança na matriz energética para aquelas com maior uso de energia de baixo carbono (IPCC, 2014). Demanda ainda mudança de postura das instituições públicas e privadas, provocada inicialmente pelos órgãos reguladores e fiscalizadores, mas também para a percepção de organizações não governamentais, agentes financeiros, consumidores e o mercado em si.

Como um esforço internacional para o enfrentamento das mudanças climáticas é realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento com a união de países para assinar um tratado internacional para estabelecer metas de combate às mudanças climáticas. O encontro anual dos países membros é chamado de Conferência das Partes (COP) (Pontes; Figueiredo, 2023).

O enfrentamento das mudanças climáticas é um desafio global que mobiliza governos, empresas e a sociedade civil. Fruto da 21ª COP, o Acordo de Paris entrou em vigor em 2016 com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global a até 2°C em relação aos níveis pré-industriais. Em resposta, os países signatários assumiram metas individuais de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). O Brasil, por meio da atualização de sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) em 2024, comprometeu-se a reduzir suas emissões líquidas entre 59% e 67% até 2035, em relação aos níveis de 2005, com vistas à neutralidade climática até 2050 (Brasil, 2024).

Antes mesmo do Acordo de Paris, o Brasil já havia publicado, em 2013, o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação (Plano Indústria), com meta inicial de redução de 5% nas emissões de GEE até 2020 (Brasil, 2013).

Embora esse plano não tenha sido formalmente revisado por vários anos, em 2025 o governo federal publicou uma nova versão do Plano Setorial da Indústria, como parte da Estratégia Nacional de Mitigação, alinhando o setor industrial aos compromissos da NDC brasileira e às metas de descarbonização até 2035 e 2050 (Brasil, 2025a).

O papel do Estado é fundamental na mobilização para a redução das emissões, atuando como formulador de políticas públicas e regulamentações. Contudo, o setor privado e a sociedade civil também têm responsabilidades importantes, especialmente na adoção de tecnologias de baixo carbono e na implementação de práticas sustentáveis. Segundo o IPCC (2013), a indústria possui potencial de redução de emissões de até 29%.

Nesse contexto, as empresas passaram a enxergar as ações climáticas como oportunidades de inovação, eficiência e valorização no mercado. A incorporação da agenda ESG (Ambiental, Social e de Governança) tornou-se um dos pilares estratégicos para o médio e longo prazo, atendendo às exigências do mercado global e promovendo maior transparência e responsabilidade corporativa (Guevara, 2022).

Uma das principais ferramentas utilizadas pelas empresas para a gestão de emissões atmosféricas é o Inventário de GEE. Considerado pela FGV (2008) como o primeiro passo na contribuição ao combate às mudanças climáticas, o inventário permite o mapeamento das fontes emissoras e a definição de metas de redução. No Brasil, diversas empresas divulgam voluntariamente seus inventários no Registro Público de Emissões, plataforma do Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV, 2024).

A análise das emissões por setor revela que, com exceção do setor de energia, houve aumento nas emissões de GEE entre 2016 e 2020, saindo respectivamente de 1.305,4 MtCO₂e para 1.676,7, com destaque para o setor de uso da terra, mudança do uso da terra e florestas que apresentou aumento de 131% (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2022)..A indústria da transformação, por sua vez, representou cerca de 15,2% do PIB brasileiro em 2023 (IBGE, 2024), o que reforça sua importância econômica e sua responsabilidade ambiental. Esse setor contribui significativamente para as emissões de GEE, exigindo estratégias específicas de mitigação e adaptação. Sua participação expressiva na economia nacional evidencia o papel central que a indústria deve desempenhar na transição para economia de baixo carbono.

Segundo Rezende (2018), as empresas possuem papel estratégico na busca por soluções sustentáveis para o desenvolvimento econômico, pois dispõem de recursos financeiros e capacidade tecnológica. No entanto, a descarbonização não deve ser responsabilidade exclusiva da iniciativa privada. O Estado tem papel crucial na formulação de políticas públicas, regulamentações e incentivos que promovam a sustentabilidade e a redução dos impactos ambientais.

Nesse contexto, a descarbonização da indústria não se limita à substituição de fontes energéticas fósseis por alternativas renováveis. Trata-se de um processo complexo, que envolve gestão ambiental estratégica, monitoramento por indicadores de desempenho e aplicação de mecanismos de compensação e mitigação que permitam reduzir impactos sem comprometer a competitividade. A adoção de tecnologias limpas, eficiência energética, economia circular e valorização de resíduos industriais emergem como pilares fundamentais para essa transição (BNDES, 2023).

Embora muitas iniciativas corporativas exijam investimentos iniciais, elas também representam oportunidades de ganho competitivo. Segundo Lewandowski e Ullrich (2023), ações voltadas à melhoria da eficiência energética podem reduzir custos operacionais e aumentar a competitividade das empresas. Diante disso, torna-se essencial diagnosticar o perfil de emissões da indústria da transformação brasileira e compreender suas estratégias de descarbonização frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

2. JUSTIFICATIVA

O setor industrial brasileiro desempenha um papel crucial na sociedade, contribuindo para a geração de empregos, arrecadação de impostos e produção de manufaturas utilizadas pela população. A preocupação com a utilização de menos materiais para produzir a mesma unidade de produto tem sido crescente. No entanto, o consumo excessivo impulsiona o aumento da produção e, conseqüentemente, o uso de recursos naturais. Uma das alternativas para promover o crescimento sustentável ambiental é a adaptação de padrões tecnológicos (Artaxo, 2022).

Devido à prevalência da emissão de GEE pela indústria, o tema das mudanças climáticas possui significância elevada quando se avalia sua contribuição no cenário nacional brasileiro. Para tal, é importante que sejam avaliadas as emissões de GEE nas empresas brasileiras que realizam inventário, para identificar os principais setores, empresas e categorias frente aos seus dados de emissões e iniciativas de redução, mitigação e compensação.

Este trabalho espera contribuir com a sociedade, representantes do setor público, membros do setor privado, organizações não governamentais, e a academia, com a avaliação dos desafios e estratégias para a indústria do Brasil atuar em busca da descarbonização, reduzindo o seu impacto nas mudanças climáticas inerentes aos seus processos fabris, contribuindo assim para a melhoria da qualidade ambiental.

Além da contribuição à sociedade de modo geral, há também o objetivo de apoiar o setor industrial ao apresentar um diagnóstico que favorece e traz subsídios para a tomada de decisão quanto às estratégias e tecnologias em prol da descarbonização, além do atendimento e melhorias da performance ambiental, financeiro, imagem perante a sociedade, e preparação para futuros marcos regulatórios.

O estudo possibilita às organizações a avaliação de seus cenários, das medidas propostas e das barreiras à sua implementação. Dessa forma, pode contribuir para a redução de custos na obtenção de informações sobre ações voltadas à mitigação das emissões de GEE, além de favorecer o compartilhamento de conhecimento entre os diferentes setores.

As informações apresentadas neste trabalho são especialmente relevantes, uma vez que a base de dados utilizada é disponibilizada pelo Programa Brasileiro de Mudanças Climáticas, em parceria com o Ministério do Meio Ambiente.

O trabalho está ainda alinhado com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), das Nações Unidas (ONU), elencados de forma resumida na Figura 1.

Figura 1 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: Nações Unidas Brasil, 2024.

A agenda dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) contempla, em escala global, a erradicação da pobreza, a proteção ao meio ambiente e ao clima, bem como a promoção da paz e da prosperidade para todas as pessoas. No contexto deste projeto, destacam-se os seguintes objetivos e metas específicas (ONU, 2024):

- **Objetivo 9:** Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação (Meta 9.4);
- **Objetivo 12:** Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis (Metas 12.4 e 12.5).
- **Objetivo 13:** Ação contra a mudança global do clima (Metas 13.2 e 13.3).

Esses princípios orientam todas as etapas da pesquisa — do conceito inicial à sua conclusão — com foco na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) pela indústria da transformação.

3. OBJETIVOS

3.1 Objeto geral

O presente trabalho teve como objetivo analisar o perfil de emissões de gases de efeito estufa (GEE) da indústria da transformação brasileira, a fim de subsidiar estratégias de descarbonização por meio da identificação dos principais vetores de emissão, da avaliação de indicadores e medidas compensatórias eficazes, e da construção de cenários prospectivos de redução de emissões até 2030.

3.2 Objetos específicos

- Avaliar os padrões de emissão de GEE da indústria da transformação por escopo, bem como sua distribuição por categoria e subsetor do escopo 1, de modo a viabilizar a compreensão da distribuição das fontes de emissão no setor.
- Identificar as categorias, os subsetores e organizações da indústria da transformação com maior contribuição nas emissões de GEE, para avaliação dos principais vetores de emissão.
- Identificar os principais indicadores e medidas de compensação mais eficazes em prol da descarbonização, visando subsidiar estratégias voltadas à redução das emissões e à promoção da sustentabilidade no setor.
- Construir cenários futuros de descarbonização para os principais subsetores até 2030, estimando o potencial de redução de emissões.

4. REVISÃO DE LITERATURA

Esta revisão de literatura tem como objetivo apresentar os principais fundamentos teóricos e evidências empíricas que sustentam a análise proposta neste trabalho, com foco na descarbonização da indústria da transformação brasileira. Para isso, são discutidos três eixos centrais: (i) as mudanças climáticas e o papel das emissões industriais, com ênfase na contribuição da indústria da transformação para o aquecimento global; (ii) a governança climática, incluindo os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil e as políticas públicas nacionais voltadas à mitigação das emissões; e (iii) os indicadores de desempenho ambiental e as estratégias de monitoramento adotadas pelas empresas do setor industrial. A partir dessa base teórica, busca-se compreender os desafios e as oportunidades da transição para economia de baixo carbono, bem como oferecer subsídios para a análise dos dados apresentados nos capítulos seguintes.

4.1 Mudanças Climáticas e o Papel das Emissões Industriais

As mudanças climáticas configuram-se como um dos maiores desafios do século XXI, exigindo respostas coordenadas em múltiplas escalas e setores. A elevação da temperatura média global, o aumento da frequência de eventos climáticos extremos e a intensificação de impactos socioambientais são fenômenos amplamente documentados pela literatura científica (IPCC, 2023; WMO, 2023). Nesse contexto, a indústria, especialmente a da transformação, surge como um dos principais vetores de emissão de gases de efeito estufa (GEE), sendo, portanto, uma chave na agenda de mitigação às mudanças climáticas.

A relação entre industrialização e mudanças climáticas é amplamente reconhecida na literatura científica. Desde a Revolução Industrial, a introdução da máquina a vapor e o uso intensivo de combustíveis fósseis, como carvão mineral e petróleo, ampliaram significativamente a capacidade produtiva da indústria e do transporte, mas também intensificaram a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Esses gases, ao se acumularem na atmosfera, intensificam o efeito estufa natural, provocando o aquecimento global e alterações nos padrões climáticos. Segundo Goldemberg e Lucon (2023), a forma como a energia tem sido produzida e consumida desde a Revolução Industrial é incompatível com os princípios do desenvolvimento sustentável, sendo a principal responsável pelas mudanças climáticas globais.

A indústria da transformação, em particular, apresenta características que a tornam altamente emissora. Primeiramente, trata-se de um setor intensivo em energia, com grande dependência de fontes fósseis para geração de calor e eletricidade. Além disso, muitos de seus processos produtivos envolvem reações químicas que, por si só, geram emissões diretas de GEE, como é o caso da calcinação na produção de cimento ou da redução do minério de ferro na siderurgia (IEA, 2022). Segundo dados da Agência Internacional de Energia, o setor industrial responde por cerca de 24% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia, sendo a indústria da transformação responsável por parcela significativa desse total.

No Brasil, embora o setor agropecuário e o uso da terra ainda sejam os principais emissores de GEE, a indústria da transformação tem ganhado destaque na matriz de emissões, especialmente em função da sua relevância econômica e da crescente demanda por bens manufaturados (CNI, 2024). A intensificação da atividade industrial, aliada à urbanização e ao aumento do consumo, tende a ampliar a pressão sobre os recursos naturais e a contribuir para o agravamento da crise climática, caso não sejam adotadas medidas estruturais de mitigação.

A literatura aponta que a descarbonização da indústria requer abordagem sistêmica, que envolva desde a substituição de fontes energéticas fósseis por renováveis até a reconfiguração dos processos produtivos com base em princípios de eficiência energética, economia circular e inovação tecnológica (Geels et al., 2017). Tecnologias como a captura e armazenamento de carbono (CCS), o uso de hidrogênio verde, a eletrificação de processos térmicos e o reaproveitamento de resíduos industriais são apontadas como estratégias promissoras para a redução das emissões industriais (Bataille et al., 2018).

Além dos aspectos tecnológicos, a governança climática no setor industrial depende da existência de marcos regulatórios claros, incentivos econômicos e mecanismos de monitoramento e reporte de emissões. A implementação de inventários corporativos de GEE, por exemplo, é considerada etapa fundamental para o diagnóstico das fontes emissoras e para o estabelecimento de metas de redução (GHG Protocol, 2017). No Brasil, iniciativas como o Registro Público de Emissões, coordenado pela Fundação Getúlio Vargas, têm contribuído para a transparência e a padronização das informações ambientais no setor empresarial (FGV, 2024).

A literatura também destaca a importância de integrar a agenda climática às estratégias corporativas de longo prazo. A incorporação de critérios ambientais, sociais e de governança (ESG) tem se consolidado como um diferencial competitivo, especialmente em mercados internacionais cada vez mais exigentes em relação à sustentabilidade (Gondak, 2019; Guevara, 2022). Nesse sentido, a descarbonização da indústria não deve ser vista apenas como um custo, mas como oportunidade de inovação, reposicionamento estratégico e geração de valor.

Por fim, é importante reconhecer que a transição para indústria de baixo carbono não ocorre de forma homogênea. Diferentes subsetores apresentam perfis de emissão, capacidades tecnológicas e desafios distintos. A metalurgia, por exemplo, enfrenta barreiras tecnológicas mais complexas para a substituição de insumos e processos, enquanto setores como o de alimentos e bebidas podem avançar mais rapidamente por meio de melhorias na eficiência energética e na gestão de resíduos (BNDES, 2023). Assim, a construção de estratégias de mitigação deve considerar as especificidades de cada segmento, promovendo soluções customizadas e viáveis do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Dessa forma, a compreensão aprofundada do papel das emissões industriais nas mudanças climáticas é essencial para o delineamento de políticas públicas eficazes e para o engajamento do setor produtivo na construção de uma economia mais sustentável e resiliente.

4.2 Governança Climática: Políticas Públicas e Compromissos Internacionais de Descarbonização

A governança climática global tem se consolidado como um dos pilares fundamentais para o enfrentamento das mudanças climáticas, exigindo a articulação entre países, setores produtivos e sociedade civil. Nesse contexto, os compromissos internacionais assumidos pelos Estados nacionais, como o Acordo de Paris, e a implementação de políticas públicas nacionais são essenciais para orientar a transição para uma economia de baixo carbono.

O Acordo de Paris, firmado em 2015 durante a 21ª Conferência das Partes (COP21), estabeleceu como meta limitar o aumento da temperatura média global a bem menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, com esforços para restringi-lo a 1,5 °C. O Brasil, como signatário, apresentou sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), comprometendo-se inicialmente a reduzir em 37% suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2025 e em 43% até 2030, em relação aos níveis de 2005 (BRASIL, 2015).

Com a atualização da NDC em 2024, o Brasil ampliou suas metas, comprometendo-se a reduzir entre 59% e 67% das emissões líquidas até 2035, com vistas à neutralidade climática até 2050 (Brasil, 2024). Além disso, o país assumiu compromissos adicionais, como a eliminação do desmatamento ilegal até 2030 e a regulamentação do mercado nacional de carbono. Esses compromissos foram reafirmados durante a COP28 (2023) e serão aprofundados na COP30, que será sediada em Belém (PA), em 2025.

No âmbito nacional, destaca-se o Plano Clima, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima em 2024, como instrumento central da política climática

brasileira. Embora ainda não tenha sido oficialmente lançado, o plano está em fase final de desenvolvimento e deverá estabelecer metas de redução de emissões, estratégias de adaptação e mecanismos de financiamento, com foco na transição justa e inclusiva. Um de seus principais desdobramentos será o Plano Setorial de Mitigação da Indústria, previsto para 2025, que reconhece a relevância do setor industrial na matriz de emissões do país e propõe ações estruturadas para sua descarbonização (Brasil, 2025a).

O plano setorial propõe medidas como a substituição de insumos por alternativas de menor emissão, ampliação do uso de energia renovável, eletrificação de processos, aplicação de tecnologias emergentes e promoção da economia circular. Também são destacados os desafios transversais, como o alto custo de modernização, a necessidade de capacitação da força de trabalho e as barreiras de acesso ao financiamento (Brasil, 2025a).

Nesse cenário, o Estado assume um papel estratégico na promoção da descarbonização industrial, atuando não apenas como regulador, mas também como formulador de políticas públicas, incentivador da inovação tecnológica e articulador de parcerias entre os setores público e privado. A literatura tem enfatizado a importância da governança ambiental integrada, que considere a transversalidade das políticas e promova a coordenação entre diferentes esferas de governo e atores sociais (Cruz, 2021; Veiga; Rios, 2023).

Segundo Cruz (2021), a eficácia das políticas ambientais depende da existência de conselhos nacionais e instâncias de participação social que garantam a transversalidade e a legitimidade das decisões. Já Veiga e Rios (2023) argumentam que a descarbonização da indústria brasileira exige abordagem sistêmica, com políticas industriais verdes, estímulo à inovação e à cooperação internacional.

Nesse sentido, a governança climática deve ser compreendida como um sistema de coordenação política e institucional que articula ações locais, nacionais e globais, promovendo a integração entre os compromissos internacionais e as políticas domésticas. A efetividade dessa governança depende da existência de marcos regulatórios claros, mecanismos de monitoramento e transparência, e da participação ativa dos diversos atores envolvidos.

4.3 Indicadores de Desempenho Ambiental e Estratégias de Monitoramento na Indústria da Transformação

A mensuração do desempenho ambiental tem se tornado prática essencial para a indústria da transformação, especialmente diante da crescente pressão por transparência, regulação e responsabilidade socioambiental. Os indicadores ambientais são instrumentos

fundamentais para o monitoramento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a avaliação da eficiência dos processos produtivos e a definição de metas de descarbonização (Assunção, 2019).

Entre os principais tipos de indicadores utilizados pelas organizações industriais, destacam-se:

- Intensidade de emissão por tonelada de produto: expressa a quantidade de CO₂ equivalente emitida por unidade de produto fabricado (ex: tCO₂e/t cimento ou tCO₂e/t aço);
- Emissão por receita ou faturamento: relaciona as emissões com o desempenho econômico da empresa (ex: tCO₂e/R\$ faturado);
- Emissão por colaborador: permite avaliar a eficiência ambiental em relação ao tamanho da força de trabalho (ex: tCO₂e/funcionários);
- Emissão por unidade de energia consumida: especialmente relevante para setores com alta intensidade energética (ex: tCO₂e/MWh);
- Indicadores compostos: que combinam variáveis físicas e econômicas, como tCO₂e por tonelada de produto e por receita simultaneamente.

Esses indicadores são utilizados tanto para fins internos de gestão quanto para comunicação externa com stakeholders, como investidores, órgãos reguladores e sociedade civil. A padronização desses indicadores é incentivada por iniciativas internacionais como o *GHG Protocol*, que fornece diretrizes para a contabilização e publicação de inventários corporativos de GEE (GHG Protocol, 2017).

No Brasil, o Programa Brasileiro *GHG Protocol*, coordenado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), tem desempenhado papel central na disseminação dessas práticas. O Registro Público de Emissões (RPE), mantido pela FGV, permite que empresas publiquem voluntariamente seus inventários de GEE, promovendo a transparência e a comparabilidade dos dados (FGV, 2024).

A ausência de padronização e a baixa adesão das empresas representam um desafio. Há grande heterogeneidade na forma de apresentação dos indicadores, com diferentes unidades de medida, escopos e metodologias. Essa diversidade dificulta a comparação entre empresas e setores, além de limitar a integração dos dados em bases nacionais e internacionais.

A literatura especializada tem destacado a necessidade de padronizar os indicadores ambientais como condição para o avanço da governança climática corporativa. Segundo Soares (2024), a ausência de diretrizes específicas por subsetor e a liberdade metodológica dos

programas voluntários de inventário contribuem para a falta de uniformidade, evidenciando a necessidade de maior maturidade na gestão climática empresarial.

A adoção de indicadores de desempenho ambiental também está diretamente relacionada à capacidade das empresas de estabelecer metas claras de redução de emissões e de monitorar sua evolução ao longo do tempo. Empresas que adotam indicadores estruturados tendem a apresentar maior comprometimento com a agenda climática, além de se destacarem em rankings de sustentabilidade e atraírem investimentos alinhados aos princípios ESG (Guevara, 2022).

Estudos também apontam que a existência de indicadores ambientais bem definidos está associada a melhores resultados econômicos e à inovação organizacional. Endrikat, Guenther e Hoppe (2014) realizaram análise que demonstra correlação positiva entre desempenho ambiental e desempenho financeiro, sugerindo que a sustentabilidade pode ser um diferencial competitivo. De forma semelhante, Martín-de Castro et al. (2017) destacam que certificações ambientais simbólicas ou substantivas influenciam diretamente a percepção de valor por parte dos stakeholders, impactando positivamente a imagem e a rentabilidade das empresas.

Por fim, é importante destacar que a mensuração do desempenho ambiental não deve se restringir às grandes corporações. Pequenas e médias empresas também devem ser incentivadas a adotar indicadores ambientais, com apoio de políticas públicas que promovam capacitação, acesso a ferramentas e integração com plataformas como o RPE. A ampliação da cultura de inventário e monitoramento é essencial para que a indústria da transformação brasileira avance de forma consistente rumo à descarbonização (Silvia, 2021).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Tipo de pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como um estudo quantitativo, de caráter descritivo, fundamentado na análise de dados secundários provenientes de inventários corporativos de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Esses inventários foram utilizados como base para avaliar o desempenho ambiental das empresas da indústria da transformação brasileira, com foco na mensuração das emissões de carbono e na identificação de estratégias de mitigação adotadas.

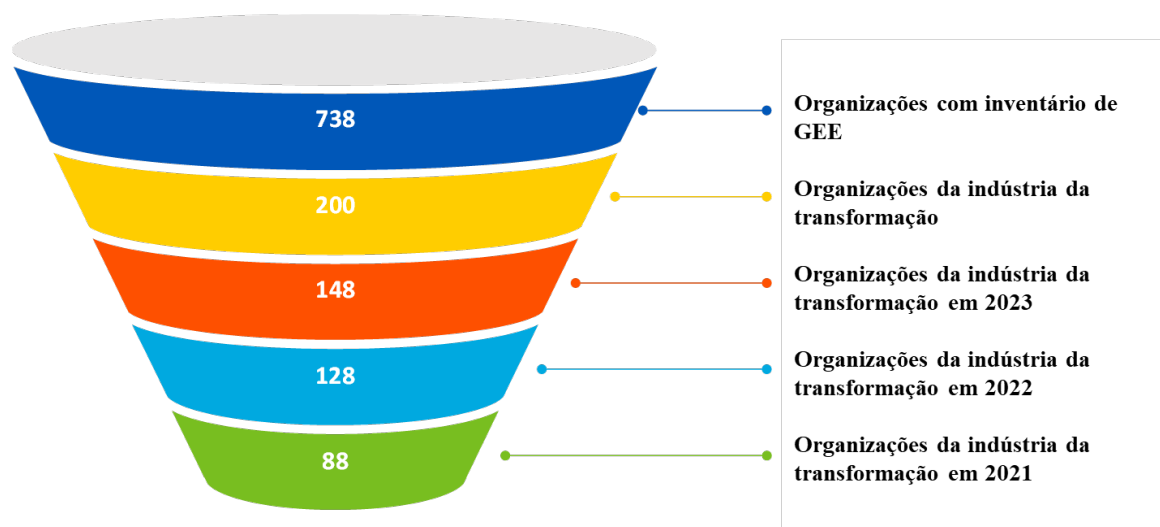
O estudo foi estruturado em três componentes principais: (i) caracterização do perfil das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) da indústria da transformação brasileira; (ii) análise das estratégias de descarbonização adotadas pelas empresas do setor; e (iii) construção de cenários prospectivos de descarbonização para os subsetores mais representativos em termos de emissões.

Segundo Carvalho, Silva e Novais (2020), a pesquisa descritiva tem como objetivo mapear e caracterizar fenômenos com base em dados observáveis, permitindo identificar padrões, relações e tendências relevantes para a compreensão de contextos específicos.

5.2 Fonte de dados

A pesquisa foi realizada utilizando o banco de dados do Registro Público de Emissões (RPE) do Programa Brasileiro GHG FGV (FGV, 2024), que possui 738 organizações que já publicaram seus inventários de GEE de 2008 até 2024, classificadas em 20 setores que variam com o segmento de atuação de cada organização (Figura 2).

Figura 2 – Evolução do número de organizações com inventário de GEE publicado no RPE



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Além dos dados dos inventários, foram analisados relatórios de sustentabilidade e outras publicações oficiais das empresas participantes do estudo. Esses documentos forneceram informações complementares sobre práticas de gestão ambiental, metas de redução de emissões e investimentos em tecnologias limpas, contribuindo para uma compreensão mais ampla das ações corporativas voltadas à descarbonização.

Complementarmente, foram utilizados dados de entidades representativas do setor industrial, como a Confederação Nacional da Indústria (CNI), a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Instituto Aço Brasil. Essas fontes disponibilizam estatísticas de produção, consumo per capita e projeções de mercado para os segmentos de cimento e aço, que foram fundamentais para a construção dos cenários de descarbonização e para a análise da evolução das emissões de GEE no contexto da indústria da transformação nacional.

5.3 Critérios de seleção da amostra

Para este trabalho foram consideradas somente as organizações que atenderam aos seguintes critérios:

- i. classificadas no setor da indústria da transformação;
- ii. inventários publicados nos anos de 2021, 2022 e 2023.

Após o filtro, 88 organizações atenderam aos critérios definidos. A partir de então, este estudo considerou os 3 inventários anuais (2021 a 2023) das 88 organizações, e com isso foram analisados dados de 264 inventários de GEE. A relação das 88 organizações está disponível no Apêndice.

5.4 Classificação por subsetores

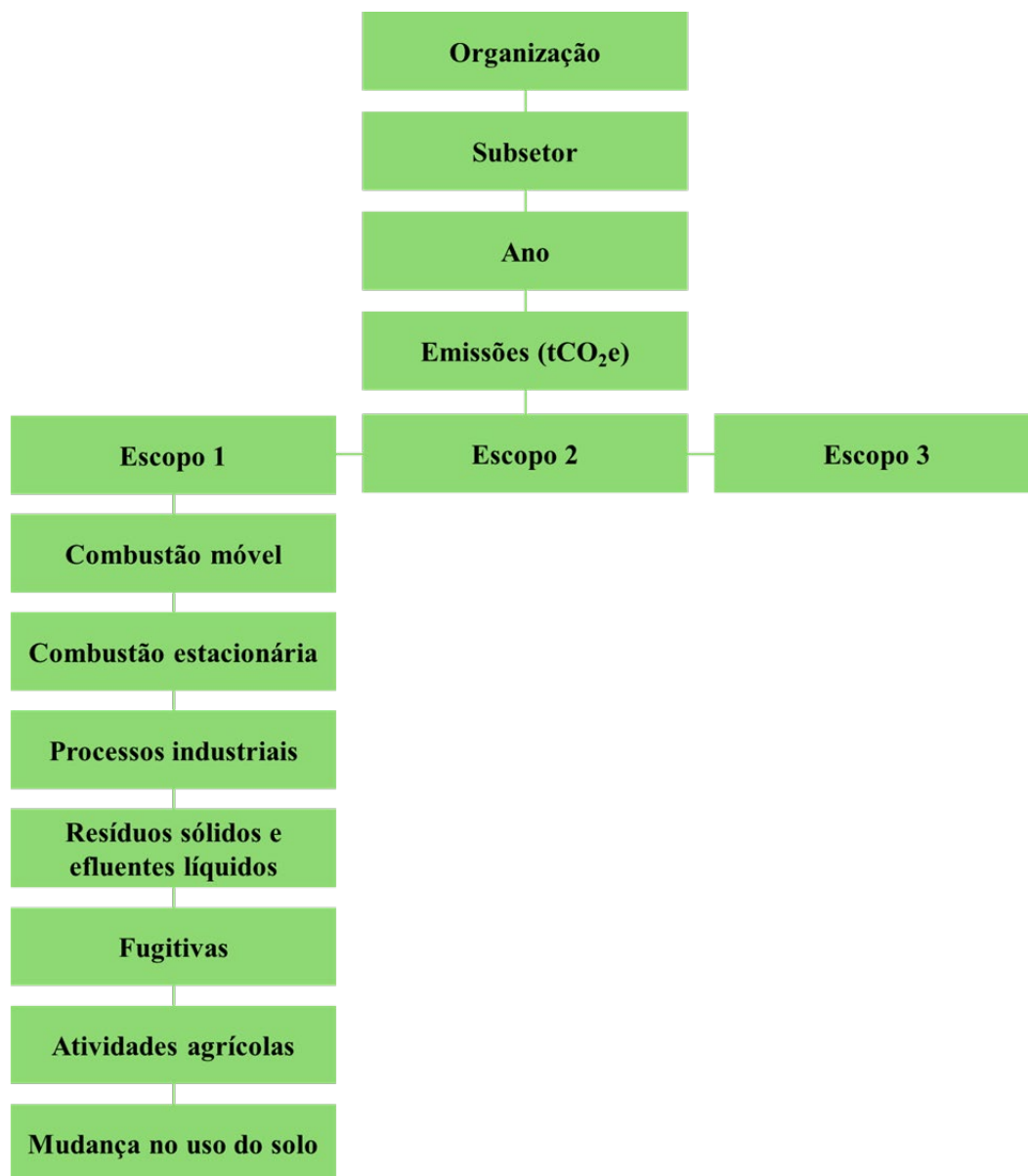
As organizações foram distribuídas em 14 subsetores definidos arbitrariamente, de acordo com o segmento industrial de cada uma. A distribuição das organizações em subcategorias permite a avaliação direcionada da contribuição de cada, considerando que o escopo de atividade das 88 organizações selecionadas é heterogêneo e dificulta a tabulação de dados e o atendimento aos objetivos do trabalho. Os subsetores definidos foram:

- Agronegócio
- Alimentos e Bebidas
- Automotivo
- Construção Civil
- Eletroeletrônico
- Embalagens
- Metalurgia
- Mineração
- Óleos e Combustíveis
- Papel e Celulose
- Químico e Plástico
- Roupas e Calçados
- Saúde e Beleza
- Serviços Gráficos

5.5 Informações tabuladas por inventário

O inventário de GEE possui diversos dados acerca da gestão de emissões das empresas. Para este estudo, cada um dos 264 inventários foi tabulado constando as seguintes informações (Figura 3).

Figura 3 – Tipo de informações disponíveis nos inventários de GEE utilizados na análise da indústria da transformação brasileira (2021-2023)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

Além das informações quantitativas sobre as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), foram também sistematizados dados que permitissem identificar organizações que adotaram voluntariamente práticas avançadas de gestão de emissões e iniciativas de compensação. Para isso, além dos inventários corporativos, foram consultados os relatórios de sustentabilidade das empresas incluídas no estudo, os quais frequentemente seguem diretrizes internacionais:

- Indicador de taxa de emissão;
- Unidade de medida do indicador de taxa de emissão;
- Projetos de compensação implementados;

- Quantidade de emissão compensada (tCO₂e).

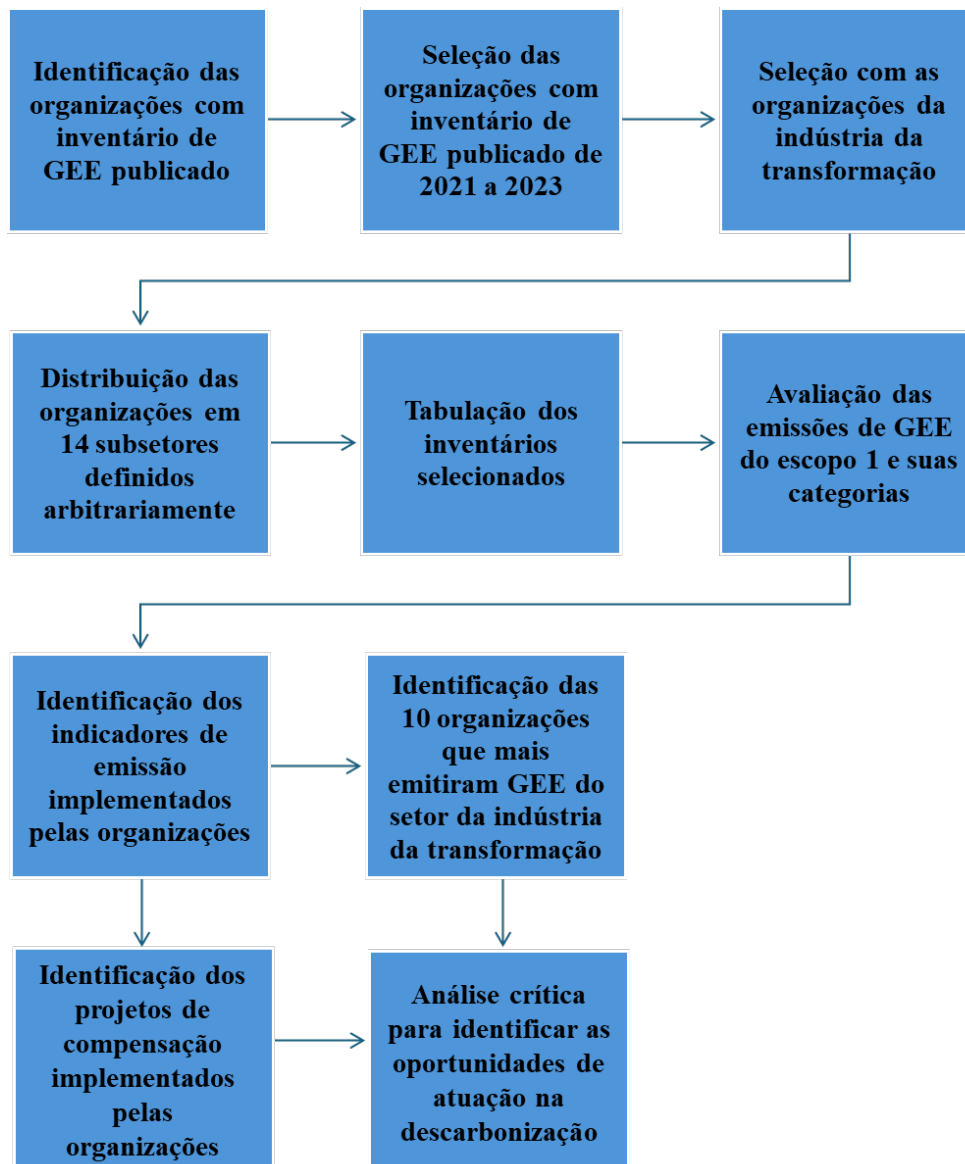
5.6 Delimitação das análises

Para efeitos deste trabalho descartaram-se as emissões de escopo 2 e 3, por serem pouco relevantes em relação ao escopo 1, apesar do escopo 2 ser obrigatório de reporte segundo o protocolo do RPE.

5.7 Análise de dados

A tabulação e elaboração do banco de dados permitiram realizar análises relevantes do comportamento e tendências das emissões do setor da indústria da transformação ao longo dos anos de 2021 a 2023. Foram avaliadas a contribuição de cada subsetor das organizações, a distribuição pelas categorias do escopo 1 e as dez organizações que mais emitiram GEE do setor da indústria da transformação, permitindo identificar onde estão as maiores oportunidades de atuação na descarbonização. Na Figura 4, um fluxograma permite a visualização da coleta e análise de dados.

Figura 4 - Etapas metodológicas de coleta, tabulação e análise dos dados de emissões de GEE da indústria da transformação brasileira (2021–2023)



Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

O acesso aos inventários permitiu a identificação da quantidade de organizações que possuem projetos de compensação implementados e de qual subsetor estão inseridas. Permitiu também a identificação da quantidade de organizações que possuem indicadores de emissão, comportamento e tendências dos indicadores, subsetores que os implementaram e unidades de medidas mais frequentes.

5.8 Dados de descarbonização

Para informações mais detalhadas acerca da gestão de emissões de GEE, foram também consultados os relatórios de sustentabilidade das empresas participantes do estudo. Esses documentos forneceram informações complementares sobre práticas de gestão ambiental, metas de redução de emissões e investimentos em tecnologias limpas, contribuindo para uma compreensão mais ampla das ações corporativas voltadas à descarbonização.

Segundo Mota, Mazza e Oliveira (2011), esses documentos seguem diretrizes internacionais como o *Global Reporting Initiative* (GRI), permitindo avaliação holística da performance corporativa. Foram extraídas informações objetivas de cada empresa sobre:

- Metas de redução de GEE;
- Projetos de eficiência energética;
- Adoção de fontes renováveis;
- Certificações ambientais;
- Participação em compromissos voluntários;
- Iniciativas de compensação de carbono;
- Investimentos em tecnologias de baixo carbono.

A análise desses documentos complementa os dados dos inventários, oferecendo subsídios para compreender o grau de maturidade ambiental das empresas e suas estratégias de transição para uma economia de baixo carbono.

5.9 Projeção de Cenários

A construção de cenários de descarbonização para os subsetores da indústria da transformação brasileira foi fundamentada em abordagem metodológica integrada, de natureza quantitativa, que combinou dados históricos de produção, projeções demográficas e indicadores setoriais de consumo e emissão. Essa abordagem visa estimar a demanda futura por materiais industriais e suas respectivas emissões de gases de efeito estufa (GEE), com foco nos subsetores mais representativos em termos de emissões: metalurgia e construção civil, que juntos respondem por aproximadamente 75% das emissões totais da indústria da transformação.

A metodologia adotada parte da relação direta entre o consumo per capita de materiais e a produção nacional, utilizando a fórmula:

Produção estimada = Consumo per capita × População projetada

Essa abordagem é amplamente utilizada em estudos de planejamento setorial e sustentabilidade, pois permite simular diferentes cenários de consumo e emissão, considerando variações econômicas, tecnológicas e políticas. A escolha do consumo per capita como variável central se justifica por sua estabilidade relativa e por refletir mudanças estruturais no setor, como aumento de eficiência, substituição de materiais e políticas de descarbonização (OLIVEIRA; SOUZA, 2024).

Para o subsetor da metalurgia, o consumo per capita de aço foi fixado em 106 kg/hab/ano, conforme dados do Instituto Aço Brasil (2023). Esse valor representa a média observada nos últimos anos, influenciada por eventos como a pandemia, retração industrial e retomada gradual dos investimentos em infraestrutura. Com base nessa taxa e na população projetada de 223,5 milhões de habitantes em 2030 (IBGE, 2024), estima-se produção de aproximadamente 23,7 milhões de toneladas de aço.

Para o subsetor da construção civil, o consumo per capita de cimento foi fixado em 260 kg/hab/ano, com base em dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2022). Esse valor reflete o padrão médio recente de atividade do setor, compatível com a capacidade instalada e o nível de demanda por obras públicas e privadas. A projeção de produção para 2030, nesse cenário base, é de aproximadamente 58,1 milhões de toneladas de cimento.

Com base nessas estimativas, foram definidos dois cenários para cada subsetor:

- Cenário BAU (Business as Usual): considera a manutenção das condições atuais de produção e emissões, utilizando as taxas médias de emissão observadas em 2023 para cada produto. Esse cenário serve como referência neutra, permitindo avaliar o impacto das emissões caso o setor não implemente medidas adicionais de mitigação.
- Cenário de Descarbonização: incorpora as taxas médias de emissão projetadas para 2030, considerando metas corporativas de redução, avanços tecnológicos e políticas setoriais de mitigação. Esse cenário permite estimar o potencial de redução de emissões com base em iniciativas já em curso ou planejadas pelas principais empresas dos respectivos subsectores.

As premissas adotadas para a construção dos cenários foram:

1. População projetada para 2030: 223,5 milhões de habitantes (IBGE, 2024);
2. Consumo per capita constante: 106 kg/hab/ano para aço e 260 kg/hab/ano para cimento;
3. Taxas de emissão de GEE:

- Cenário BAU: taxas médias de 2023, conforme inventários das 10 maiores empresas emissoras de cada subsetor;
 - Cenário de Descarbonização: taxas projetadas para 2030, com base em metas corporativas e tendências tecnológicas;
4. Horizonte temporal: projeção até o ano de 2030;
 5. Foco nas emissões de Escopo 1, por representarem a maior parcela das emissões diretas da indústria da transformação.

Essa estrutura metodológica permite avaliar o impacto potencial das estratégias de descarbonização sobre os níveis de emissão futuros, oferecendo subsídios para a formulação de políticas públicas, tomada de decisões empresariais e priorizações de investimento em tecnologias de baixo carbono.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

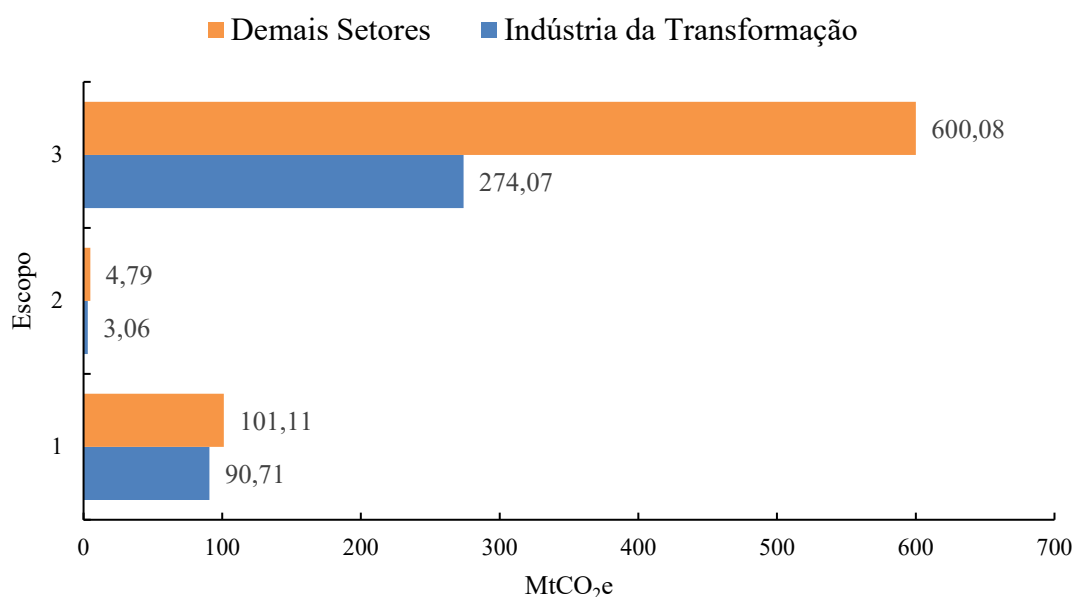
A partir da aplicação da metodologia supracitada, foram obtidos resultados que permitem compreender o perfil de emissões da indústria da transformação brasileira.

Os resultados são apresentados por meio de tabelas, gráficos e discussões técnicas, com destaque para os subsetores mais emissores, as principais fontes de emissão e as iniciativas de descarbonização identificadas.

A análise de resultados ambientais em processos produtivos é essencial para identificar oportunidades de melhoria, promover práticas sustentáveis e alinhar a produção industrial às exigências competitivas e regulatórias. Segundo Anacleto *et al.* (2020), a gestão ambiental estratégica, aliada à produção mais limpa e à ecoeficiência, tem-se consolidado como um diferencial competitivo para organizações industriais que buscam reduzir impactos e atender às demandas de *stakeholders* cada vez mais exigentes.

A análise comparativa entre os setores evidencia que a indústria da transformação apresenta participação significativa nas emissões de GEE do setor empresarial que são reportadas no programa GHG Protocol do Brasil, especialmente no Escopo 1, com 90,71 Mt CO₂e, representando aproximadamente 47% das emissões diretas reportadas. Embora os demais setores apresentem maior volume absoluto em Escopos 2 e 3, a intensidade das emissões diretas da indústria da transformação revela sua centralidade na agenda de descarbonização (Figura 5).

Figura 5 - Comparação da média de emissões de GEE de escopo 1 entre todos os setores empresariais e a indústria da transformação no Brasil (2021–2023)



Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

Segundo Gondak (2019), as questões ambientais vêm sendo discutidas em todos os setores econômicos, mas a indústria ainda opera majoritariamente sob o modelo linear de produção — extrair, transformar, descartar — o que intensifica os impactos ambientais. A transição para modelos circulares e regenerativos exige mudanças estruturais nos padrões de produção e consumo, especialmente nos setores industriais mais intensivos em carbono.

6.1 Indústria da Transformação

Considerando especificamente o setor da indústria da transformação, os resultados na Tabela 1 demonstram que as emissões totais relatadas aumentaram de forma constante, com crescimento mais acentuado em 2023, apesar de todas as agendas em prol da descarbonização.

Tabela 1 - Emissões de GEE da indústria da transformação por escopo nos anos de 2021, 2022 e 2023 (MtCO₂e)

Escopo	2021 (MtCO ₂ e)	2022 (MtCO ₂ e)	2023 (MtCO ₂ e)	Média (MtCO ₂ e)
1	89,77	87,35	95,00	90,71 ± 3,91
2	5,08	1,73	2,37	3,06 ± 1,78
3	255,86	267,46	298,88	274,07 ± 22,25
TOTAL	351,43	356,87	396,67	368,32 ± 24,70

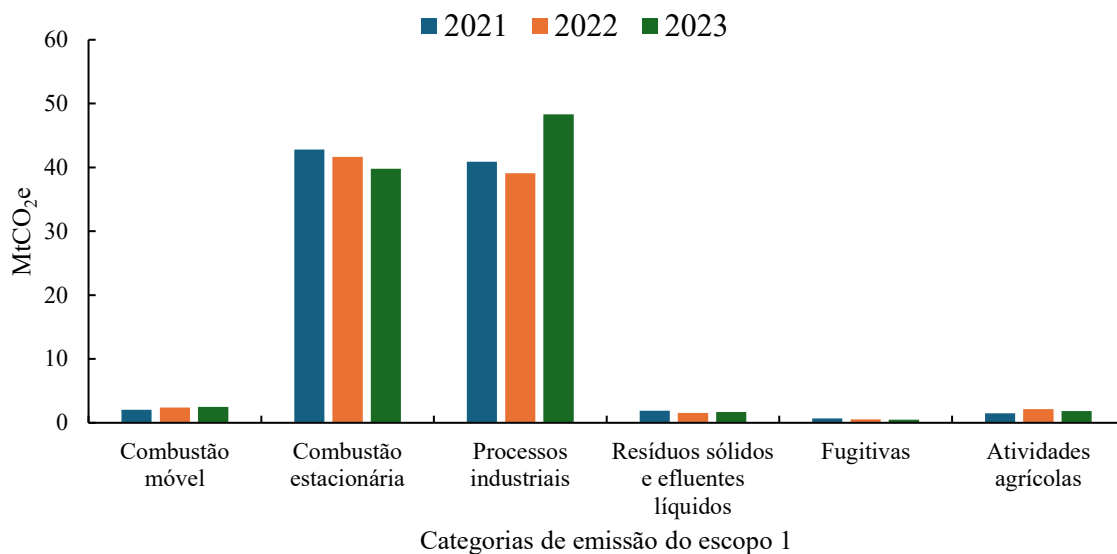
Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

As emissões de Escopo 1 variam a representação entre 26% e 24% do total de emissões relatadas, com leve redução na representação nos últimos 3 anos, apesar das emissões totais no Escopo 1 terem aumentado 6% entre 2021 e 2023, com leve redução em 2022.

6.2 Emissão de Escopo 1 da Indústria da Transformação

As emissões de Escopo 1, ou seja, aquelas que ocorrem diretamente nas operações das organizações, estão distribuídas em sete categorias conforme o Programa Brasileiro *GHG Protocol* e diretrizes internacionais. A estratificação apresentada na Figura 6 demonstra que 92,8% dessas emissões estão concentradas nas categorias de combustão estacionária e processos industriais, o que reforça a necessidade de priorizar ações de descarbonização nesses dois vetores principais.

Figura 6 - Distribuição média das emissões de escopo 1 por categoria na indústria da transformação brasileira (2021–2023)



Fonte: Registro Público de Emissões (2024).

A combustão estacionária está relacionada à queima de combustíveis fósseis para geração de energia térmica em equipamentos como fornos, caldeiras e turbinas. Essa categoria, embora ainda represente parcela significativa das emissões, apresenta tendência de redução nos últimos anos, resultado de iniciativas voltadas à eficiência energética e à substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis (Martins et al., 2012).

Por outro lado, a categoria de processos industriais é a mais relevante identificada neste estudo, tanto pelo volume de emissões quanto pela tendência de crescimento. Essas emissões decorrem de reações químicas inerentes aos processos produtivos, como a calcinação do calcário na produção de cimento, que libera CO₂ como subproduto, e a redução do minério de ferro em altos-fornos na siderurgia, que utiliza carvão coque como agente redutor, gerando grandes volumes de CO₂ (IPCC, 2014; IEA, 2022).

É importante destacar que os gases da família dos hidrofluorcarbonos (HFCs), utilizados em sistemas de refrigeração industrial, se enquadram na categoria de emissões fugitivas, pois são liberados de forma não intencional, geralmente por vazamentos em equipamentos de refrigeração e ar-condicionado (*GHG Protocol*, 2017).

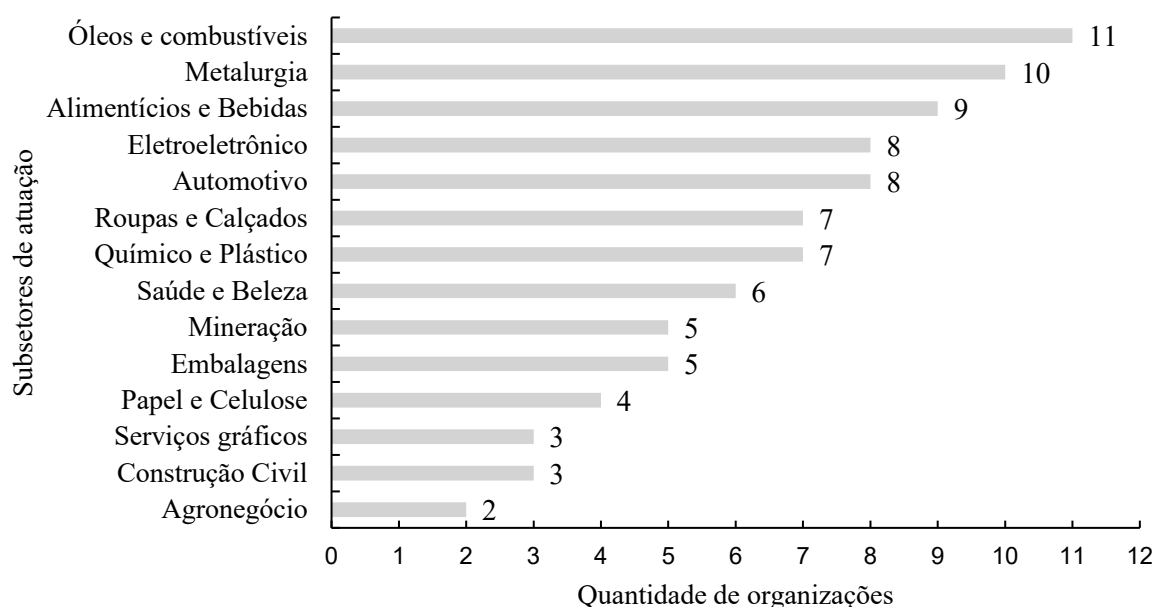
Dessa forma, recomenda-se que as organizações da indústria da transformação concentrem seus esforços iniciais de descarbonização nas categorias de processos industriais e combustão estacionária, por representarem conjuntamente mais de 90% das emissões diretas do setor. A adoção de tecnologias de baixo carbono, como a eletrificação de processos térmicos,

o coprocessamento de resíduos, e o uso de biomassa e hidrogênio verde, são caminhos promissores para a redução dessas emissões (Bataille et al., 2018; Mores Júnior et al., 2024).

6.3 Subsetores da Indústria da Transformação

A indústria da transformação possui variedade considerável de atividade e área de atuação e, por esta razão, as 88 organizações que fazem parte deste estudo foram distribuídas em 14 subsectores, conforme Figura 7.

Figura 7 - Distribuição das 88 organizações da indústria da transformação brasileira por subsector de atuação, conforme classificação adotada no estudo



Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

Percebe-se que há distribuição na quantidade de organização para cada subsector, com maior participação em Óleos e combustíveis, Metalurgia, e Alimentícios e Bebidas. Por outro lado, quando é considerada a emissão de GEE por subsector, o comportamento não é necessariamente proporcional à quantidade de organizações. Para exemplificar, o subsector de Óleos e combustíveis possui 11 organizações e é somente o sexto principal emissor, enquanto a Mineração com 6 organizações é o segundo mais emissor, ficando atrás somente da Metalurgia. É possível acompanhar o comportamento das emissões de GEE em cada subsector ao longo dos anos de 2021, 2022 e 2023 a partir da observação da Tabela 2.

Tabela 2 - Emissões diretas de GEE de Escopo 1 por subsetor da indústria da transformação nos de 2021, 2022 e 2023, com média anual e participação percentual (MtCO₂e)

Subsetor	Quantidade de organizações	2021 (MtCO ₂ e)	2022 (MtCO ₂ e)	2023 (MtCO ₂ e)	Média (MtCO ₂ e)	Participação Média (%)
Metalurgia	9	47,51	45,20	53,67	48,79 ± 4,38	53,03%
Construção Civil	3	20,38	19,47	18,92	19,59 ± 0,74	21,73%
Químico e Plástico	7	8,89	8,96	8,19	8,68 ± 0,43	9,93%
Mineração	6	3,67	4,32	4,60	4,19 ± 0,47	4,82%
Papel e Celulose	4	3,28	3,33	3,34	3,32 ± 0,03	3,72%
Óleos e combustíveis	11	2,41	2,79	3,20	2,80 ± 0,40	3,11%
Alimentícios e Bebida	9	2,32	2,02	1,87	2,07 ± 0,23	2,25%
Embalagens	5	0,92	0,90	0,84	0,89 ± 0,04	1,01%
Automotivo	8	0,17	0,14	0,14	0,15 ± 0,02	0,16%
Roupas e Calçados	7	0,12	0,10	0,09	0,10 ± 0,01	0,11%
Eletroeletrônico	8	0,07	0,07	0,09	0,08 ± 0,01	0,08%
Saúde e Beleza	6	0,04	0,05	0,04	0,04 ± 0,004	0,04%
Serviços gráficos	3	0,01	0,01	0,01	0,01 ± 0,001	0,01%
Agronegócio	2	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01%

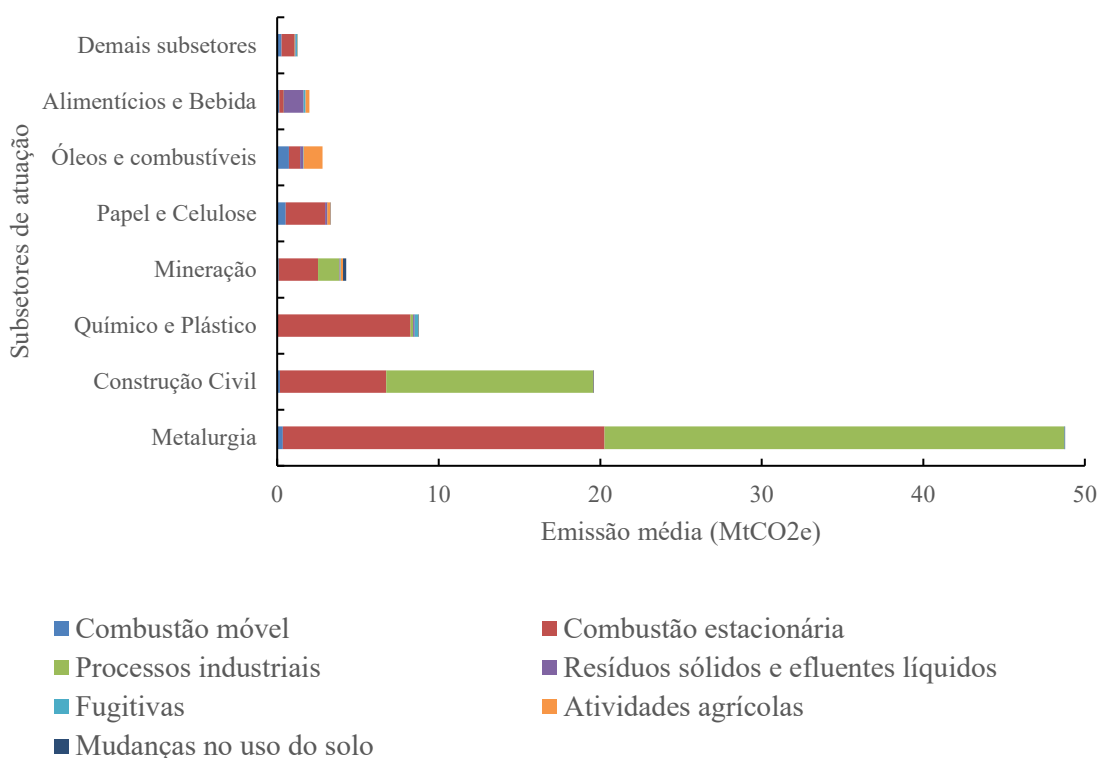
Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

As emissões de Metalurgia representam mais da metade das emissões da indústria da transformação, e ainda apresentaram aumento nas emissões em 2023, que saiu de 47,51 MtCO₂e em 2021 para 53,67 MtCO₂e em 2023. Um destaque positivo observa-se no subsetor de Alimentos e Bebidas, que reduziu as emissões de 2,32 MtCO₂e em 2021 para 1,87 MtCO₂e em 2023.

A Figura 8 apresenta a participação média dos subsectores nas emissões de Escopo 1, expressas em milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e), distribuídas por categoria de

emissão, o que permite visualizar a contribuição relativa de diferentes fontes emissoras em cada subsetor analisado, como combustão móvel e estacionária, processos industriais, resíduos, entre outros. Essa representação é essencial para compreender os principais vetores de emissão direta e subsidiar a definição de estratégias de mitigação específicas para cada setor.

Figura 8 - Participação média dos subsetores da indústria da transformação nas emissões de escopo 1, por categoria de fonte emissora (2021–2023)



Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

É possível entender que a categoria de processos industriais é a mais representativa de emissão de GEE, com cerca de 47%, e está mais presente na metalurgia, mineração e construção civil. Nos demais subsetores, essa categoria apresenta menor relevância relativa, o que indica que os esforços de descarbonização podem ser priorizados nos subsetores onde essa fonte é mais significativa, sem que isso exclua ações pontuais nos demais.

A combustão estacionária, por sua vez, está presente de forma mais distribuída entre os principais subsetores, representando 45% das emissões de Escopo 1. Isso reforça sua importância como foco estratégico para ações de mitigação em diferentes segmentos da indústria da transformação.

Os resultados evidenciaram que os subsetores de metalurgia e construção civil concentram aproximadamente 75% das emissões diretas da indústria da transformação,

com predominância das categorias de processos industriais e combustão estacionária, que juntas representam mais de 90% das emissões de escopo 1.

As estratégias de descarbonização devem ser setoriais e direcionadas, considerando o perfil de emissão predominante em cada subsetor. A priorização de ações deve focar nas categorias com maior contribuição relativa, especialmente processos industriais e combustão estacionária, que somadas representam 92% das emissões, para alcançar reduções significativas nas emissões de Escopo 1.

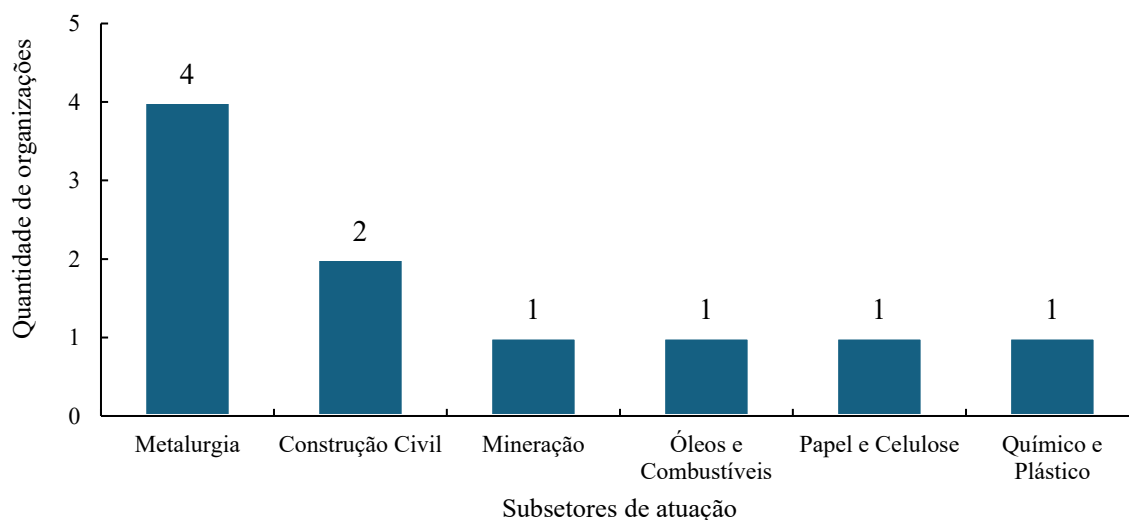
6.4 As 10 Organizações da Indústria da Transformação com maior emissão de GEE

A emissão média anual (2021 a 2023) no escopo 1 da indústria da transformação foi de 90,71 MtCO_{2e}, como foi apresentado anteriormente, representa 47% das emissões de escopo 1 de todas as organizações que publicaram seus inventários na plataforma.

A análise da emissão de GEE individualmente para cada organização permitiu constatar que as 10 organizações que mais emitem GEE representam 90,85% de toda emissão de escopo 1. Ou seja, o montante de emissão média anual de 88 organizações é de 90,71 MtCO_{2e}, enquanto a das 10 organizações citadas é de 82,41 MtCO_{2e}.

Diante deste cenário discrepante de comportamento entre as organizações, seja por tamanho ou por capacidade produtiva, foi realizado diagnóstico mais detalhado de comportamento das 10 organizações com maior quantidade de emissão de GEE. Inicialmente, a Figura 9 demonstra como está a distribuição entre 6 subsetores, com destaque para metalurgia e construção civil.

Figura 9 - Distribuição das 10 organizações com maior emissão de GEE por subsetor da indústria da transformação brasileira (2021–2023)



Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

Na Tabela 3, estão listadas as 10 organizações citadas, a emissão anual, a média com desvio padrão e a variação percentual entre os anos de 2021 e 2023.

Tabela 3 - Emissões de GEE de Escopo 1 das 10 organizações da indústria da transformação com maior média anual nos anos de 2021, 2022 e 2023, incluindo desvio padrão e variação percentual

Nº	Empresas	Subsetor	2021	2022	2023	Média	Variação
							2021/2023
							MtCO ₂ e
							%
1	ArcelorMittal Brasil	Metalurgia	17,16	16,82	23,04	19,01 ± 3,50	25,52
2	Votorantim Cimentos	Construção Civil	14,56	13,88	13,38	13,94 ± 0,59	-8,82
3	Companhia Siderúrgica Nacional	Metalurgia	12,03	11,67	14,67	12,79 ± 1,64	18,00
4	Ternium Brasil Ltda	Metalurgia	10,36	9,98	10,17	10,17 ± 0,19	-1,87
5	Braskem	Químico e Plástico	8,74	8,80	8,02	8,52 ± 0,44	-8,98%
6	Usiminas	Metalurgia	7,06	5,88	4,87	5,93 ± 1,09	-44,97
7	InterCement	Construção Civil	5,49	5,30	5,32	5,37 ± 0,11	-3,20

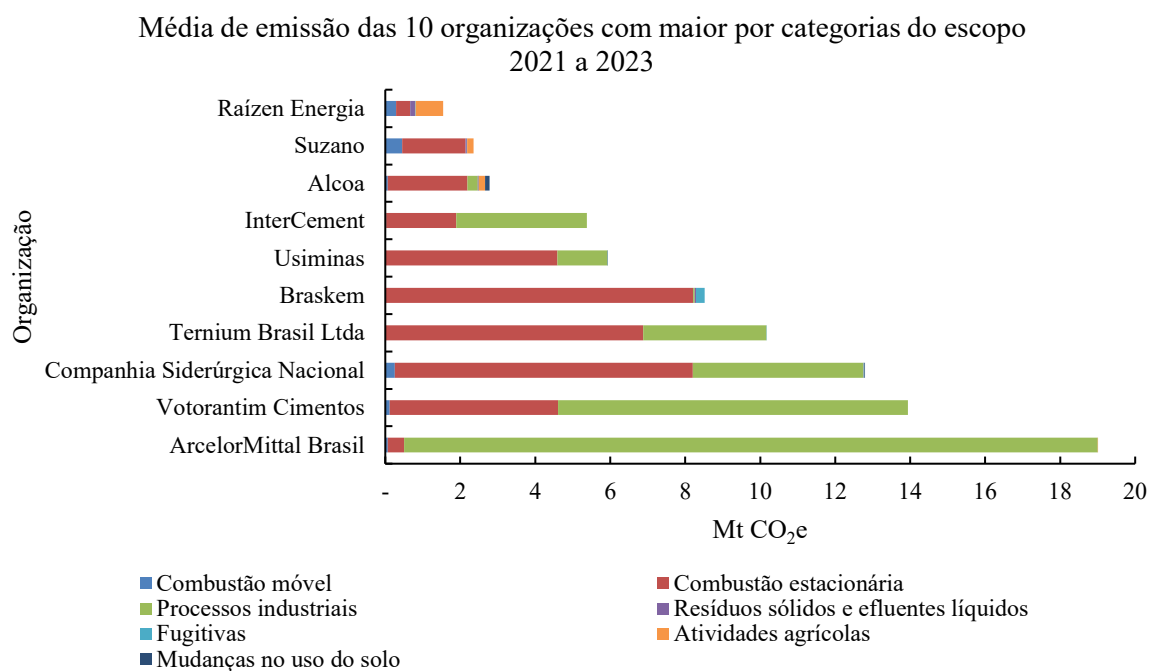
Nº	Empresas	Subsetor	2021	2022	2023	Média	Varição 2021/2023
							%
8	Alcoa	Mineração	2,39	2,83	3,13	2,78 ± 0,37	23,64
							MtCO ₂ e
9	Suzano	Papel e Celulose	2,31	2,35	2,39	2,35 ± 0,04	3,35
10	Raízen Energia	Óleos e Combustíveis	1,18	1,55	1,91	1,55 ± 0,37	0,37

Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

As três primeiras empresas (ArcelorMittal Brasil, Votorantim Cimentos e Companhia Siderúrgica Nacional) representam 55% das emissões totais das 10 empresas, cada uma de subsetor diferente. Em seguida, são analisadas as informações de emissões diretas de cada empresa.

Na Figura 10, é possível verificar como é a distribuição das emissões nas categorias do escopo 1 em cada uma das 10 organizações com maior emissão. Estas empresas possuem grande representatividade e por isso devem ser consideradas como referência, seja em comportamento das emissões como em iniciativas de descarbonização.

Figura 10 – Distribuição média das emissões de escopo 1 por categoria nas 10 organizações com maior emissão da indústria da transformação



Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

As principais categorias de emissão são processos industriais, combustão estacionária, e emissões fugitivas, que juntas representam a maior parcela das emissões totais das 10 organizações analisadas. Empresas como ArcelorMittal Brasil, CSN e Votorantim Cimentos concentram suas emissões principalmente nas categorias de processos industriais e combustão estacionária, refletindo a natureza intensiva em carbono de seus processos produtivos.

Por outro lado, categorias como mudanças no uso do solo, resíduos sólidos e efluentes líquidos e atividades agrícolas apresentam participação marginal, indicando menor representatividade nos setores analisados. Essa diversidade de fontes emissoras entre as empresas evidencia a complexidade da gestão climática industrial, exigindo estratégias específicas e direcionadas conforme o perfil de emissão de cada organização.

A análise das dez organizações com maior emissão revelou elevada concentração de emissões em poucas empresas, o que reforça a necessidade de estratégias setoriais específicas e ações corporativas direcionadas.

Nos próximos itens será realizada avaliação sobre o comportamento individual das organizações, aprofundando a análise das fontes específicas de emissão de cada uma.

6.4.1 ArcelorMittal Brasil (Metalurgia)

As emissões totais apresentaram um aumento significativo, passando de 17,16 MtCO₂e em 2021 para 23,04 MtCO₂e em 2023. Esse crescimento está diretamente relacionado à incorporação, em 2023, de uma unidade integrada de produção de aço ao portfólio de ativos da ArcelorMittal Brasil. Essa unidade, isoladamente, foi responsável pela emissão de 6,43 MtCO₂e no referido ano.

A emissões da ArcelorMittal Brasil estão concentradas na categoria de processos industriais, onde devem ser concentradas os esforços de descarbonização, contudo, não reflete o comportamento do setor da Metalurgia, em que a concentração das emissões está dividida entre os processos industriais e a combustão estacionária.

Unidades integradas de produção de aço, como a incorporada pela ArcelorMittal, possuem processos intensivos em carbono, especialmente devido ao uso de carvão coque na redução do minério de ferro em altos-fornos. Segundo o IPCC (2014), as indústrias siderúrgicas estão entre os maiores emissores de GEE do setor industrial, em razão da elevada demanda energética e da liberação de CO₂ como subproduto dos processos químicos. De acordo com Kouloukoi *et al.* (2019), a expansão de operações industriais com baixa eficiência energética ou com processos convencionais baseados em combustíveis fósseis tende a impactar

diretamente o volume total de emissões, mesmo quando há esforços de mitigação em outras frentes.

6.4.2 Votorantim Cimentos (Construção Civil)

As emissões diminuíram de 14,56 MtCO₂e em 2021 para 13,38 MtCO₂e em 2023. Houve também redução na taxa de emissão de tCO₂ por tonelada de cimento produzido de 579 (2022) para 556 (2023). Essa redução foi atribuída a combinação de fatores, com destaque para o aumento do coprocessamento de diferentes tipos de resíduos e a redução do fator clínquer nas operações, e está em linha com a meta de emissão de 475 a ser alcançada em 2030.

A contribuição relativa a processos industriais da indústria cimenteira é devido à produção do clínquer, principal material do cimento, que para ser produzido é necessário o processo de descarbonatação da farinha, gerando CO₂ (Bărbulescu; Hosen, 2025).

6.4.3 Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) (Metalurgia)

O inventário da CSN contempla as emissões de sua atuação nos setores de metalurgia, cimentos e mineração, com a respectiva participação nas emissões de 62%, 37% e 1%. Para fins de categorização, a CSN foi considerada como metalurgia.

As emissões totais da CSN aumentaram de 12,03 MtCO₂e em 2021 para 14,67 MtCO₂e em 2023. A justificativa está na aquisição de novas plantas e pelo maior consumo de gás natural para geração de energia.

A CSN traçou uma jornada de descarbonização do seu processo siderúrgico para promover reduções nas emissões específicas, com meta de atingir um índice anual de até 1,89 tCO₂e/tonelada de aço em 2030. A taxa de emissão em 2023 foi de 2,07 tCO₂e/tonelada de aço.

Destacam-se iniciativas para a descarbonização da CSN tais como, a implementação da tecnologia para controle de combustível no processo de combustão; o estudo de viabilidade técnica para o uso de carvão vegetal no alto-forno e sinterizações; e a inteligência artificial para otimização dos consumos específicos em fornos da indústria.

6.4.4 Ternium Brasil Ltda (Metalurgia)

As emissões permaneceram relativamente estáveis, com média de 10,17 MtCO₂e. A estabilidade demonstra que as operações estão bem controladas, apesar da demanda por redução das emissões. A operação dos fornos consome combustível fóssil, como o gás natural e carvão mineral, e, por outro lado, emite gases de combustão, por isso a maior concentração em

combustão estacionária e processos industriais, respectivamente.

6.4.5 Braskem (Químico e Plástico)

As emissões mostraram leve variação, com média de 8,52 MtCO₂e. A estabilidade nas emissões sugere que as operações estão relativamente constantes, com pequena redução nas emissões ao longo dos 3 últimos anos. O Programa de Descarbonização Industrial Global da Braskem totalizou mais de 50 iniciativas em diferentes graus de maturidade, com o potencial de reduzir quase 2,3 milhões de tCO₂e/ano até 2030. Destas iniciativas, 29 já estão em operação ou em fase de execução.

A indústria química, da qual a Braskem é um dos principais representantes no Brasil, é reconhecida por sua alta intensidade de carbono e complexidade operacional, o que a torna um dos setores mais desafiadores para a descarbonização. Segundo Marinho e Morais (2024), a redução das emissões nesse setor exige estratégias estruturadas, como a transição para fontes renováveis de energia e a melhoria contínua dos processos produtivos.

6.4.6 Usiminas (Metalurgia)

As emissões diminuíram de 7,06 em 2021 para 4,87 MtCO₂e em 2023, que passou por uma condição operacional atípica na Usina localizada em Ipatinga-MG, em função da interrupção, por alguns meses, do funcionamento de um Alto-Forno e de uma Aciaria, responsáveis pela maior parte da produção de gusa e aço da empresa, respectivamente, para realizar as reformas dos equipamentos.

Paradas de planta como essas têm impacto direto na redução das emissões de GEE, especialmente em setores de alta intensidade energética como a metalurgia. Segundo Firmino e Peixoto (2025), embora fatores estruturais e tecnológicos sejam os principais determinantes do desempenho ambiental das empresas, variações operacionais temporárias, como interrupções de processos produtivos, podem gerar quedas significativas nas emissões, ao reduzir o consumo de energia e a queima de combustíveis fósseis durante o período de inatividade. Essas oscilações, embora pontuais, devem ser consideradas na análise de desempenho climático, pois podem distorcer a percepção de progresso ambiental se não forem contextualizadas adequadamente.

6.4.7 InterCement (Construção Civil)

Apesar da estabilidade das emissões, aumentou a parcela de resíduos e biomassa utilizados em substituição de combustíveis fósseis na categoria de combustão estacionária. Essa substituição é considerada estratégia eficaz para a redução das emissões de gases de efeito estufa, especialmente em setores industriais intensivos em carbono. Segundo Ferreira *et al.* (2020), o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e biomassa contribui não apenas para a diversificação da matriz energética, mas também para a diminuição das emissões de GEE, a recuperação de materiais descartados e a melhoria da viabilidade econômica de processos industriais.

6.4.8 Alcoa (Mineração)

As emissões da Alcoa aumentaram de 2,39 MtCO₂e em 2021 para 3,13 MtCO₂e em 2023. Apesar de haver redução na combustão estacionária, aumentaram processos industriais e mudanças no uso do solo.

A empresa tem se destacado por iniciativas de descarbonização, como o uso de energia 100% renovável na planta de Alumar (MA) e a produção de alumina de baixa emissão de carbono em Poços de Caldas (MG). Apesar dessas ações, as emissões de escopo 1 ainda são significativas devido à natureza intensiva dos processos industriais envolvidos, especialmente na calcinação e fundição, que demandam alto consumo energético e geram CO₂.

6.4.9 Suzano (Papel e Celulose)

As emissões da Suzano permaneceram relativamente estáveis, com média de 2,35 MtCO₂e. A empresa mantém sistemas de geração de energia a partir da biomassa e do licor negro, subproduto do processo de produção da celulose. Atualmente, grande parte das unidades industriais é autossuficiente em energia renovável, suprimindo integralmente sua demanda interna.

Em 2023, observou-se uma redução no ritmo de produção, marcada por paradas programadas, o que impactou a eficiência operacional. As emissões do escopo 1 apresentaram leve aumento, influenciadas pelas atividades agrícolas associadas à consolidação da base florestal. Houve também um pequeno acréscimo nas emissões estacionárias, decorrente da retomada das plantas após as paradas, exigindo maior consumo de combustíveis fósseis.

Esse perfil operacional está alinhado com a tendência da indústria brasileira de papel e celulose de buscar maior eficiência energética e menor impacto climático, especialmente frente

às exigências dos mercados internacionais. Segundo Freitas, Silva e Oliveira (2024), a Suzano tem se destacado por integrar práticas sustentáveis em sua estratégia empresarial, promovendo o uso de fontes renováveis, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental, o que reforça sua competitividade no cenário global.

6.4.10 Raízen Energia (Óleos e Combustíveis)

A emissão aumentou mais de 60%, de 1,18 MtCO₂e em 2021 para 1,91 MtCO₂e em 2023, justificada pelo aumento da produção, principalmente nos itens de combustão móvel e estacionária, resíduos sólidos e efluentes líquidos, e atividades agrícolas. As categorias de combustão aumentaram devido à maior geração de energia pela Raízen, levando a menor aquisição externa e com isso redução de emissões de escopo 2. As emissões de atividades agrícolas estão relacionadas à produção e aplicação de fertilizantes, herbicidas e pesticidas.

A ampliação da geração própria de energia e a consequente redução da dependência de fontes externas refletem uma estratégia alinhada às exigências contemporâneas de transição energética. Segundo Moutinho e Silva (2025), a divulgação das emissões de carbono e das estratégias de mitigação climática é considerada essencial para que empresas brasileiras alcancem metas de descarbonização e se mantenham competitivas em um mercado global cada vez mais orientado por critérios ambientais.

6.5 Projetos de compensação

Os projetos de compensação de emissão de GEE são uma estratégia eficaz para neutralizar emissões. A compensação pode ser realizada por meio de iniciativas que reduzem, removem ou evitam a emissão de GEE, sendo os mais comuns os projetos de reflorestamento e manutenção florestal. Segundo Grandini, Santos e Marjotta (2023), ações como o plantio de árvores e a recuperação de áreas degradadas contribuem significativamente para o sequestro de carbono, além de gerarem benefícios ambientais adicionais, como a conservação da biodiversidade, a melhoria da qualidade do solo e o fortalecimento do mercado de créditos de carbono no contexto pós Acordo de Paris.

Para as organizações, a compensação é crucial, pois contribui para atingir metas de descarbonização, melhora a imagem corporativa perante as partes interessadas, demonstra responsabilidade social e ambiental, e geralmente preserva áreas florestais, apesar de permitir que a empresa não atue na fonte, reduzindo de fato as suas emissões de GEE.

As metas de descarbonização podem ser alcançadas através de projetos que aumentam a eficiência energética ou melhoram processos industriais, ou seja, por meio de reduções internas. A compensação configura-se como alternativa viável quando o custo para a redução de emissões é elevado ou quando há limite técnico para as oportunidades de iniciativas. No entanto, é essencial que as organizações sejam transparentes em seus inventários e comunicados, informando que suas metas de descarbonização foram atingidas com o uso de projetos de compensação (WRI; WBCSD, 2005).

O modelo de inventário de GEE do RPE possui o item 5, onde as organizações podem relatar os projetos de compensação. Das 88 organizações deste estudo, 13 relataram projetos de compensação, contudo não há descrição ou maiores detalhes sobre o projeto.

A compensação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem se consolidado como estratégia complementar às ações de mitigação direta, especialmente no contexto industrial. A Tabela 4 apresenta os projetos de compensação realizados por organizações da indústria da transformação nos anos de 2021, 2022 e 2023, discriminados por subcategoria e pela quantidade total compensada. Observa-se que, embora o número de organizações envolvidas ainda seja limitado, há iniciativas relevantes em setores como saúde e beleza, roupas e calçados, e eletroeletrônicos, que juntos representam a maior parcela das emissões compensadas no período.

Tabela 4 - Projetos de compensação de GEE realizados pela indústria da transformação entre 2021, 2022 e 2023, por subsetor e quantidade total compensada

Subcategoria	Organizações	Quantidade compensada (ktCO₂e)
Alimentícios	1	0,387
Óleos e combustíveis	2	0,976
Automotivo	1	2,441
Metalurgia	1	5,316
Embalagens	2	18,080
Eletroeletrônico	3	31,439
Roupas e Calçados	1	252,916
Saúde e Beleza	2	467,899
	Total (ktCO₂e)	779,453
	Total (MtCO₂e)	0,779

Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

As compensações estão distribuídas entre 13 organizações de 7 subsetores, o que representa uma fração limitada do total de empresas avaliadas. A quantidade compensada é ainda menos significativa, totalizando cerca de 0,779 MtCO_{2e}, o que equivale a aproximadamente 0,86% da emissão média de escopo 1 das 88 organizações analisadas, estimada em 90,707 MtCO_{2e}.

A baixa representatividade dos projetos de compensação indica que, embora existam iniciativas pontuais, essa estratégia ainda não está consolidada como prática inerente ao setor. As compensações estão concentradas em poucos subsetores, com destaque para saúde e beleza, roupas e calçados, e eletroeletrônicos, que juntos respondem por mais de 97% do volume total compensado. Esse padrão sugere que determinados segmentos apresentam maior engajamento com mecanismos de neutralização de emissões, possivelmente em resposta a exigências específicas de mercado, regulamentações ambientais ou estratégias de posicionamento institucional voltadas à sustentabilidade.

A organização com a maior quantidade de emissões compensadas é a Natura, do subsetor de Saúde e Beleza, reconhecida no mercado por sua governança sustentável. A Natura possui compensação média de 374,50 ktCO_{2e}. Para efeito de comparação, suas emissões de escopo 1 são de apenas 0,8% da quantidade compensada, totalizando cerca de 3,06 ktCO_{2e}. Segundo Costa *et al.* (2023), a Natura é considerada uma das empresas mais sustentáveis do Brasil, tendo consolidado sua posição no mercado por meio da adoção de práticas ambientais robustas e transparentes, que incluem programas de compensação e divulgação pública de suas emissões

Nenhuma das dez maiores empresas analisadas relatou a implementação de programas de compensação de emissões de gases de efeito estufa, o que é um dado bastante significativo. Essa ausência revela uma lacuna importante nas estratégias corporativas de enfrentamento das mudanças climáticas. Embora haja crescente conscientização sobre a urgência da sustentabilidade e da neutralização das emissões, as corporações líderes ainda não demonstram engajamento efetivo em mecanismos de compensação, como reflorestamento, preservação de áreas nativas ou aquisição de créditos de carbono certificados.

Esse cenário pode ser interpretado de duas formas. Por um lado, a falta de iniciativas compensatórias pode indicar negligência frente à responsabilidade climática corporativa, especialmente considerando o papel central dessas empresas nas cadeias produtivas e na geração de emissões, servindo como referência para as demais do setor. Por outro lado, é possível que, devido ao volume expressivo de emissões que essas corporações geram, seus esforços estejam concentrados em projetos de redução direta — como a adoção de tecnologias

mais limpas, eficiência energética, substituição de combustíveis fósseis e mudanças nos processos industriais. Essas ações, embora mais complexas e custosas, tendem a ser mais eficazes e duradouras na trajetória de descarbonização.

6.6 Indicadores de desempenho e estratégias de descarbonização

A mensuração de resultados é fundamental para a organização, seja ela pública ou privada. O monitoramento de performance ambiental é semelhante ao de desempenho econômico, com indicadores em diferentes escopos, como lucro bruto, lucro líquido, receita, entre outros (Endrikat; Guenther; Hoppe, 2014).

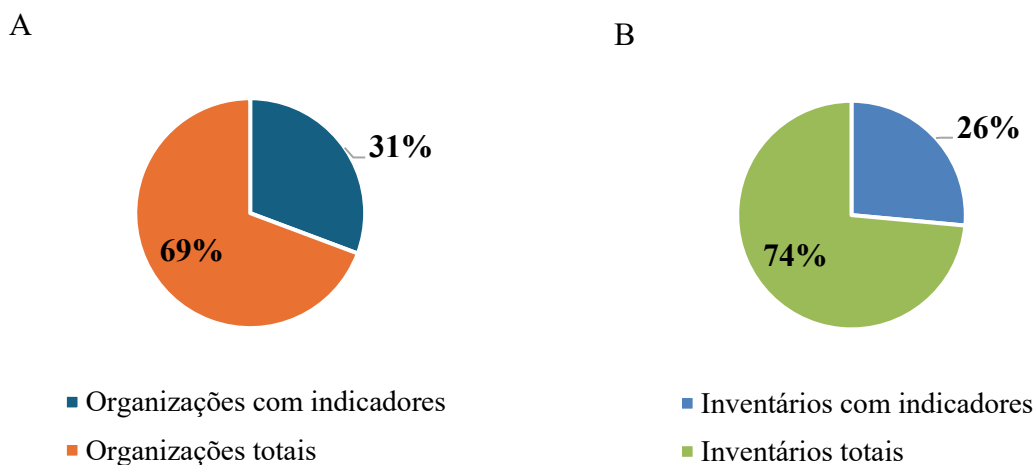
Os indicadores ambientais de desempenho são ferramentas fundamentais na gestão ambiental, especialmente em modelos orientados por resultados, como os adotados no mundo corporativo. Eles refletem os esforços gerenciais ou políticos voltados para a abordagem de questões ambientais, a implementação de certificações e o nível de conformidade com as exigências da fiscalização ambiental (Martín-de Castro *et al.*, 2017).

No contexto atual, tão importante quanto mensurar o desempenho ambiental é comunicá-lo de forma transparente aos diferentes grupos de *stakeholders*, como investidores, consumidores e formuladores de políticas públicas. Nesse sentido, os relatórios corporativos de sustentabilidade vêm ganhando relevância crescente, especialmente por apresentarem informações ambientais traduzidas em termos monetários (Herold, 2018).

O relatório padronizado do inventário de GEE permite que as organizações divulguem de forma voluntária os indicadores de gestão ambiental que foram implementados relacionados à descarbonização.

A análise dos inventários das empresas mostra que ainda há muita variação na forma como elas tratam suas emissões. Algumas apresentam indicadores mais estruturados, enquanto outras ainda não demonstram um compromisso claro com metas de descarbonização. A falta de padronização dificulta a comparação entre os dados e a avaliação do avanço real rumo à redução das emissões. A Figura 11 apresenta um resumo das organizações que possuem inventários com algum tipo de indicador voltado à descarbonização, permitindo visualizar quais estão mais avançadas nesse aspecto e quais ainda têm um caminho a percorrer.

Figura 11 - Organizações com indicadores de descarbonização (A) e inventários com indicadores de descarbonização (B) (2021-2023)



Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

Mesmo com o avanço das discussões sobre sustentabilidade, o número de organizações que adotaram e divulgaram indicadores de descarbonização ainda é insuficiente frente à urgência climática. Das 88 organizações analisadas, apenas 39 apresentaram algum tipo de indicador, e entre os 264 inventários avaliados, somente 95 incluíram métricas relacionadas à descarbonização. Esse dado revela que grande parte das empresas ainda não incorporou práticas consistentes de monitoramento e gestão das emissões, o que limita sua capacidade de estabelecer metas claras e desenvolver estratégias efetivas de redução.

Os indicadores de descarbonização identificados nos inventários são, em sua maioria, apresentados em forma de taxas relativas, o que permite avaliar a intensidade das emissões em relação à atividade produtiva ou econômica da empresa. Esses indicadores são geralmente associados à quantidade de produto gerado (por unidade, peso, volume ou energia), ao faturamento, à receita líquida ou até mesmo ao número de funcionários. Essa abordagem facilita a comparação entre diferentes empresas e setores, além de permitir o acompanhamento da evolução das emissões ao longo do tempo. A Tabela 5 apresenta os principais indicadores de descarbonização relatados nos inventários analisados, organizados por setor, evidenciando a diversidade de métricas utilizadas pelas empresas para comunicar seus esforços de redução de emissões.

Tabela 5 - Indicadores de descarbonização reportados nos inventários de GEE das organizações da indústria da transformação, organizados por subsetor e tipo de métrica utilizada

Subsetor	Indicador de Descarbonização
Agronegócio	tCO ₂ e / tonelada produzida
Alimentícios e Bebida	tCO ₂ e / tonelada de produto acabado tCO ₂ e / cabeça abatida gCO ₂ e / litro de bebida tCO ₂ e / tonelada gelatina produzida
Automotivo	Kg CO ₂ e / veículo KgCO ₂ e / motocicleta
Construção Civil	tCO ₂ e / tonelada cimento tCO ₂ e / peça cerâmica tCO ₂ e / kg produzido tCO ₂ e / m ³ para madeira tCO ₂ e / m ² para revestimento cerâmico
Eletroeletrônico	tCO ₂ e / valor agregado de produto tCO ₂ e / tonelada de produto acabado
Embalagens	tCO ₂ e / tonelada de produto produzido tCO ₂ e / tonelada de resina transformada
Metalurgia	tCO ₂ e / tonelada aço bruto tCO ₂ e / tonelada de produção ferro e aço tCO ₂ e / tonelada produzida MWh / economizados via implementação de projetos de eficiência energética
Mineração	tCO ₂ e / MWh geração de eletricidade na UTE tCO ₂ e / tonelada de produtos de nióbio produzidos tCO ₂ e / tonelada de alumínio líquido tCO ₂ e / produção anual de ferro gusa tCO ₂ e / número de funcionários tCO ₂ e / faturamento
Óleos e combustíveis	kgCO ₂ e / tonelada cana própria tCO ₂ e / tonelada cana processada gCO ₂ e / MJ produzida kgCO ₂ e / m ³ de biodiesel produzido tCO ₂ / L de óleo produzido CO ₂ e / colaborador tCO ₂ e / m ³ de óleo processado tCO ₂ / Faturamento
Papel e Celulose	tCO ₂ e / tonelada produzida tCO ₂ e / tonelada de papel produzido tCO ₂ e / tonelada de celulose seca ao ar tCO ₂ e / produção vendável de celulose tCO ₂ e / receita líquida
Químico e Plástico	tCO ₂ e / tonelada de produto produzido tCO ₂ e / tonelada de chumbo produzido tCO ₂ e / colaborador tCO ₂ e / Faturamento

Subsetor	Indicador de Descarbonização
Roupas e Calçados	tCO ₂ e / par de calçado produzido tCO ₂ e / tonelada de fio acabado tCO ₂ e / tonelada tecido kgCO ₂ e / peça produzida kgCO ₂ e / área de venda tCO ₂ e / número de lojas
Saúde e Beleza	tCO ₂ e / tonelada de produto produzida tCO ₂ e / produto faturado
Serviços gráficos	tCO ₂ e / impressão de 1 caderno de 16 páginas

Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

A análise dos indicadores de desempenho ambiental revelou que apenas 44% das organizações analisadas reportaram métricas de descarbonização, e menos de 15% implementaram projetos de compensação. Essa lacuna evidencia a necessidade de maior engajamento corporativo e de políticas públicas que incentivem a adoção de metas claras, indicadores padronizados e mecanismos de compensação ambiental (Kouloukoui *et al.*, 2019).

A diversidade de indicadores de descarbonização identificados nos inventários corporativos reflete a tentativa das empresas de adaptar suas métricas às especificidades de cada setor produtivo. Os indicadores são geralmente expressos em unidades relativas, como toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto, por unidade produzida, por volume, por receita ou por número de funcionários. Essa abordagem está alinhada com as diretrizes do *GHG Protocol*, que recomenda o uso de métricas padronizadas e comparáveis para facilitar o monitoramento e a gestão das emissões ao longo do tempo (GHG Protocol, 2017).

A escolha dos indicadores deve considerar a natureza da atividade econômica e os principais fatores de emissão associados a cada processo produtivo. Por exemplo, no setor de metalurgia, onde há grande consumo energético e emissões diretas de processos industriais, os indicadores estão fortemente ligados à produção física (tCO₂e/tonelada de aço ou ferro gusa). Já no setor de saúde e beleza, onde as emissões são mais difusas e ligadas à cadeia logística e ao consumo de energia, os indicadores aparecem relacionados ao faturamento ou ao volume de produto acabado.

Essa heterogeneidade, embora compreensível, pode dificultar a comparação entre empresas do mesmo setor e comprometer a consistência dos dados agregados. Como aponta Soares (2024), a ausência de diretrizes específicas por subsetor e a liberdade metodológica dos programas voluntários de inventário contribuem para essa falta de uniformidade, evidenciando

a necessidade de maior padronização e maturidade na gestão climática empresarial.

Além disso, a literatura destaca que a consolidação de indicadores setoriais é essencial para fortalecer a cultura de inventário no Brasil e permitir que as empresas se posicionem estrategicamente frente às exigências regulatórias e às oportunidades de mercado associadas à transição energética (Soares, 2024).

A definição de metas e o acompanhamento regular dos indicadores de descarbonização são passos fundamentais para que as empresas avancem na gestão ambiental e na redução das emissões. Sem esse tipo de controle, fica difícil avaliar se as ações adotadas estão realmente contribuindo para a descarbonização. A Tabela 6 mostra o desempenho desses indicadores entre 2021 e 2023, além das metas estabelecidas para 2030 e 2035, quando disponíveis.

Tabela 6 - Desempenho dos indicadores de descarbonização das 10 organizações com maior emissão

Nº	Empresa	Subsetor	Indicador de Descarbonização	Desempenho do Indicador				
				2021	2022	2023	Meta 2030	Meta 2035
1	ArcelorMittal Brasil	Metalurgia	tCO ₂ e / tonelada aço bruto	1,55	1,58	1,73	1,54	ND*
2	Votorantim Cimentos	Construção Civil	tCO ₂ e / tonelada de produto cimentício	0,597	0,579	0,556	0,475	ND*
3	Companhia Siderúrgica Nacional	Metalurgia	tCO ₂ / tonelada aço	1,98	1,99	2,07	1,89	1,68
4	Ternium Brasil Ltda	Metalurgia	tCO ₂ e / tonelada de produção ferro e aço	2,12	1,97	2,44	1,80	ND*
5	Braskem	Químico e Plástico	tCO ₂ e / tonelada de produto produzido	0,637	0,643	0,621	ND*	ND*
6	Usiminas	Metalurgia	tCO ₂ e / tonelada aço bruto	2,16	2,11	2,32	1,91	ND*
7	InterCement	Construção Civil	tCO ₂ / tonelada cimento	0,612	0,630	0,629	0,499	ND*
8	Alcoa	Mineração	Não foi relatado	-	-	-	-	-
9	Suzano	Papel e Celulose	tCO ₂ e / tonelada produzida	0,199	0,196	0,206	0,190	ND*
10	Raízen Energia	Óleos e Combustíveis	kgCO ₂ e / tonelada cana própria	46,0	40,0	Não foi relatada	ND*	ND*

* ND: Não definida. Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

Entre as dez empresas que mais emitem gases de efeito estufa, apenas a Alcoa não apresentou nenhum indicador relacionado à descarbonização em seus inventários. As demais empresas, embora com diferentes níveis de ambição e detalhamento, já adotam algum tipo de indicador e, em alguns casos, metas para os próximos anos.

A maioria dos indicadores faz relação com a quantidade de produto produzido, que proporcionalmente consome mais energia do processo industrial da transformação, emitindo mais GEE. Por esse motivo, este tipo de indicador é mais recomendado do que a relação de GEE pela receita da organização ou quantidade de funcionários, por exemplo. Como relatado anteriormente, as maiores emissões estão nas categorias de processos industriais e combustão estacionária.

A análise dos indicadores de descarbonização das 10 empresas com maiores emissões de escopo 1 entre 2021 e 2023 revela diversidade de comportamentos e estratégias. Empresas como Votorantim Cimentos e Braskem demonstram avanços consistentes na redução de suas emissões por tonelada de produto, com metas claras e investimentos em tecnologias limpas, como substituição térmica e uso de matérias-primas renováveis, de acordo com seus relatórios anuais de desempenho empresarial que incluem também informações de sustentabilidade e mudanças climáticas. Por outro lado, empresas como ArcelorMittal Brasil e Ternium apresentam aumento ou oscilação nos indicadores, refletindo desafios estruturais e operacionais, embora também estejam investindo em projetos de energia renovável e captura de carbono.

No setor de metalurgia, CSN, Usiminas e Ternium mantêm indicadores elevados, o que é esperado dada a intensidade energética dos processos de produção de aço. No entanto, há esforços visíveis para modernização de plantas e adoção de práticas mais eficientes. A InterCement, por sua vez, mostra metas ambiciosas de redução, com destaque para o coprocessamento de resíduos como estratégia principal. Já Suzano, no setor de papel e celulose, mantém estabilidade nos indicadores, mas se destaca por ações de conservação ambiental e conexão de fragmentos florestais, o que contribui indiretamente para a mitigação das emissões.

Essas análises mostram que, embora o desempenho varie entre empresas e setores, há tendência crescente de comprometimento com metas climáticas, ainda que em ritmos e abordagens diferentes.

As metas de descarbonização para 2030 e 2035 apresentadas pelas empresas variam em grau de ambição e detalhamento. Algumas organizações, como Votorantim Cimentos e InterCement, já definiram metas quantitativas para ambos os anos, com reduções progressivas na intensidade de emissões por tonelada de produto. Outras, como Suzano,

mantêm metas estáveis e alinhadas com práticas sustentáveis, enquanto empresas como ArcelorMittal Brasil, CSN e Ternium ainda não apresentaram metas específicas para 2035.

As metas para 2035 ganham relevância especial quando comparadas ao Plano Clima do Governo Federal, que estabelece como meta nacional a redução de 59% a 67% das emissões líquidas de gases de efeito estufa até 2035, em relação aos níveis de 2005. Esse plano, elaborado pelo Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima e coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente, serve como guia para a política climática nacional e está alinhado ao Acordo de Paris. Ele inclui estratégias setoriais de mitigação e adaptação, além de medidas transversais para garantir uma transição justa e sustentável (Brasil, 2024a).

Diante desse cenário, é fundamental que as empresas brasileiras, especialmente as que lideram em emissões, alinhem suas metas corporativas às diretrizes do Plano Clima. A ausência de metas claras para 2035 em parte das organizações representa lacuna estratégica que pode comprometer o engajamento do setor privado nos compromissos climáticos nacionais. A definição de metas robustas e transparentes, com indicadores de desempenho e planos de implementação, será essencial para que o Brasil alcance seus objetivos climáticos e contribua efetivamente para a contenção do aquecimento global (Leite; Sabonaro, 2024).

A principal justificativa para as organizações investirem em projeto climático é a própria lucratividade do projeto (Kouloukoui *et al.*, 2019). Contudo, assim como a melhoria nos processos ambientais está associada à redução de custos, já mencionado, a melhoria nos indicadores de performance é uma consequência positiva. Segundo Lewandowski e Ullrich (2023), as organizações devem estabelecer indicadores que avaliem as emissões de CO₂ pelo valor de retorno estimado sobre o investimento, para que seja possível a gestão priorizar medidas de descarbonização.

6.7 Cenários de descarbonização para os principais subsetores

A avaliação dos cenários de descarbonização para os principais subsetores da indústria da transformação brasileira permite compreender o potencial de redução das emissões de GEE a partir da adoção de tecnologias e estratégias específicas.

Considerando que os subsetores de metalurgia e construção civil concentram aproximadamente 75% das emissões diretas (Escopo 1) do setor, foram selecionados como foco desta análise. A partir dos dados de produção estimada e das taxas médias de emissão, foram construídos dois cenários comparativos para o ano de 2030: um cenário de referência, que

mantém as condições atuais de emissão, e um cenário de descarbonização, que incorpora metas corporativas e avanços tecnológicos.

A seguir, são apresentados os resultados para cada subsetor, com destaque para o impacto potencial das estratégias de mitigação sobre os níveis futuros de emissão.

6.7.1 Subsetores da Metalurgia

O subsetor de metalurgia, com destaque para a produção de aço, representa uma das principais fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) na indústria da transformação brasileira. A produção de aço envolve processos intensivos em energia e carbono, como a redução de minério de ferro em altos-fornos e a fundição em aciarias, que resultam em elevadas emissões diretas de CO₂. Segundo dados do Instituto Aço Brasil (2023), o consumo per capita de aço no país foi de 106 kg/hab em 2023, valor utilizado como referência para a projeção de produção até 2030. Embora inferior à média mundial, estimada em 223 kg/hab (WSA, 2023), esse indicador reflete o padrão histórico nacional, condicionado por fatores como renda média, grau de urbanização, estrutura industrial e investimentos em infraestrutura.

A produção estimada de aço para 2030, com base na projeção populacional de 223,5 milhões de habitantes e mantendo constante o consumo per capita, é de aproximadamente 23,7 milhões de toneladas. Essa estimativa serve como base para os dois cenários de emissão de GEE, que diferem quanto à taxa média de emissão por tonelada de aço (Tabela 7).

Tabela 7 - Cenários de emissão de GEE de 2023 e 2030 da subcategoria da metalurgia

Empresa	Taxa de emissão 2023	Taxa de emissão 2030
	Cenário BAU (tCO _{2e} / t aço)	Cenário de Descarbonização (tCO _{2e} / t aço)
Companhia Siderúrgica Nacional	2,07	1,89
Ternium Brasil Ltda	2,44	1,80
Usiminas	2,32	1,91
ArcelorMittal Brasil	1,73	1,54
Média	2,14	1,79

Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

As taxas foram calculadas com base nos dados das principais empresas do setor — Companhia Siderúrgica Nacional, Ternium Brasil, Usiminas e ArcelorMittal Brasil — que

compõem o grupo das maiores emissoras de escopo 1 no país identificadas neste trabalho.

A partir da metodologia descrita, foram calculadas as projeções de produção e de emissões de GEE para o subsetor de metalurgia, com foco na produção de aço até o ano de 2030. A seguir, a Tabela 8 apresenta os principais resultados obtidos, incluindo a produção estimada, as taxas médias de emissão e o volume total de emissões projetadas para cada cenário, além do potencial de redução associado à adoção de práticas de descarbonização.

Tabela 8 - Projeções de produção e de emissão de GEE da subcategoria metalurgia

Cenário	Consumo per capita (t/hab)	População Estimada (milhões)	Produção estimada (Mt)	Taxa média de emissão (tCO ₂ e/t aço)	Emissão total estimada (MtCO ₂ e)	Redução potencial (MtCO ₂ e)
Cenário BAU (2023)	0,106	223,5	23,7	2,14	50,7	-
Cenário de Descarbonização (2030)	0,106	223,5	23,7	1,79	42,3	8,4

Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

No cenário BAU, que considera a taxa média de emissão observada em 2023 (2,14 tCO₂e/t aço), as emissões totais projetadas para 2030 alcançam aproximadamente 50,7 MtCO₂e. Este cenário representa a manutenção das práticas produtivas atuais, sem avanços significativos em eficiência energética ou tecnologias de baixo carbono. Ele funciona como referência neutra, permitindo avaliar o impacto das emissões caso o setor não implemente medidas estruturais de mitigação.

O cenário de descarbonização, por outro lado, incorpora a taxa média de emissão projetada para 2030 (1,79 tCO₂e/t aço), estimada com base nas metas de redução divulgadas pelas principais empresas do setor. Nesse cenário, as emissões totais projetadas para 2030 seriam de aproximadamente 42,3 MtCO₂e, o que representa redução potencial de 8,4 MtCO₂e em relação ao cenário BAU. Essa diferença evidencia o impacto positivo das estratégias de descarbonização, como a modernização de plantas industriais, o uso de fontes renováveis, o aumento da reciclagem de sucata metálica e a adoção de tecnologias de captura e armazenamento de carbono.

A análise comparativa entre os cenários reforça a importância de políticas públicas e incentivos regulatórios que estimulem a transição para siderurgia de baixo carbono. O setor

possui potencial significativo de mitigação, mas enfrenta desafios técnicos e econômicos que exigem coordenação entre governo, indústria e sociedade civil. O alinhamento das metas empresariais às diretrizes do Plano Clima e à NDC brasileira será essencial para que o Brasil avance rumo à neutralidade climática nas próximas décadas.

6.7.2 Subsetores da Construção Civil

O subsetor de construção civil, com foco na produção de cimento, é um dos principais emissores de GEE dentro da indústria da transformação brasileira. A produção de cimento envolve processos industriais intensivos em carbono, especialmente a calcinação do calcário, que libera grandes volumes de CO₂ como parte da reação química. O consumo per capita de cimento no Brasil foi estimado em 0,290 t/hab/ano, conforme dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2022). Esse valor representa média histórica recente, influenciada por fatores como a pandemia de COVID-19, a retomada de obras públicas e privadas, e a estabilidade da capacidade instalada do setor.

Apesar de estar abaixo da média mundial de consumo, estimada em 0,553 t/hab/ano (CEMNET, 2023), o indicador brasileiro reflete um equilíbrio entre oferta e demanda, condicionado por variáveis como renda, urbanização, acesso ao crédito e políticas habitacionais. A projeção de produção para 2030, com base na população estimada de 223,5 milhões de habitantes e mantendo constante o consumo per capita, resulta em aproximadamente 64,8 milhões de toneladas de cimento.

Essa estimativa serve como base para os dois cenários de emissão de GEE, que variam conforme a taxa média de emissão por tonelada de produto, calculada a partir dos dados das principais empresas do setor — InterCement e Votorantim Cimentos (Tabela 9).

Tabela 9 - Cenários de emissão de GEE de 2023 e 2030 da subcategoria da construção civil

Empresa	Taxa de emissão 2023 Cenário BAU (tCO₂e / t cimento)	Taxa de emissão 2030 Cenário de Descarbonização (tCO₂e / t cimento)
InterCement	0,63	0,50
Votorantim Cimentos	0,56	0,48
Média	0,59	0,49

Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

As projeções de produção e de emissões de gases de efeito estufa (GEE) foram calculadas para o subsetor da construção civil, com foco na produção de cimento até o ano de 2030. O cenário base considera a manutenção do consumo per capita atual, enquanto o cenário de descarbonização incorpora metas de redução de emissões estabelecidas pelas principais empresas do setor. Ambos os cenários utilizam a projeção populacional brasileira para 2030 e mantêm constante a taxa de consumo per capita de cimento.

A Tabela 10 apresenta os principais resultados obtidos, incluindo a produção estimada, as taxas médias de emissão e o volume total de emissões projetadas para cada cenário, além do potencial de redução associado à adoção de práticas de descarbonização.

Tabela 10 - Projeções de produção e de emissão de GEE da subcategoria da construção civil

Cenário	Consumo per capita (t/hab)	População Estimada (milhões)	Produção estimada (Mt)	Taxa média de emissão (tCO ₂ e/t aço)	Emissão total estimada (MtCO ₂ e)	Redução potencial (MtCO ₂ e)
Cenário BAU (2023)	0,29	223,5	64,8	0,59	38,4	-
Cenário de descarbonização (2030)	0,29	223,5	64,8	0,49	31,6	6,8

Fonte: Adaptado do Registro Público de Emissões (2024).

No cenário BAU, que considera a taxa média de emissão observada em 2023 (0,59 tCO₂e/t cimento), as emissões totais projetadas para 2030 alcançam aproximadamente 38,4 MtCO₂e. Este cenário representa a continuidade das práticas produtivas atuais, sem avanços significativos em tecnologias de baixo carbono ou mudanças estruturais nos processos industriais. Assim como no setor de metalurgia, este cenário funciona como referência neutra para avaliar o impacto das emissões caso o setor mantenha seu padrão tecnológico e operacional.

O cenário de descarbonização, por sua vez, incorpora a taxa média de emissão projetada para 2030 (0,49 tCO₂e/t cimento), estimada com base nas metas de redução divulgadas pelas principais empresas do setor. Nesse cenário, as emissões totais projetadas seriam de aproximadamente 31,6 MtCO₂e, o que representa uma redução potencial de 6,8 MtCO₂e em relação ao cenário BAU. Essa diferença evidencia o impacto das estratégias de descarbonização, como o aumento da substituição térmica por combustíveis alternativos, o uso de adições minerais no clínquer, e a otimização dos processos de moagem e transporte.

A análise dos cenários reforça a relevância do setor cimenteiro na agenda climática nacional. Embora o cimento seja um material essencial para o desenvolvimento urbano e de

infraestrutura, sua produção está entre as mais intensivas em carbono. A adoção de tecnologias de baixo carbono e o alinhamento às metas do Plano Clima são fundamentais para que o setor contribua efetivamente para a redução das emissões nacionais até 2030 e além.

A construção de cenários de descarbonização até 2030, com base no consumo per capita e na projeção populacional, permitiu estimar o impacto potencial de metas corporativas e políticas públicas. No subsetor de metalurgia, a redução projetada pode alcançar 8,4 MtCO_{2e}, enquanto no subsetor de cimento a redução estimada é de 6,8 MtCO_{2e}. Esses resultados demonstram que a adoção de tecnologias de baixo carbono, como o uso de hidrogênio verde, eletrificação de processos e coprocessamento de resíduos, pode gerar ganhos ambientais e competitivos para o setor (Mendes de Paula, 2020).

6.8 Desafios e Estratégias para a Descarbonização da Indústria da Transformação

Segundo dados da CNI (2019), 20% dos empregos formais no Brasil estão no setor industrial que representa ainda 22% do produto interno bruto (PIB) nacional. A indústria da transformação está inserida neste contexto, principalmente os subsetores da Metalurgia, Mineração, Construção Civil, Químico e Plástico. Dentre as emissões diretas destes quatro subsetores, a concentração está em duas categorias: processos industriais e combustão estacionária.

Há algumas estratégias para atuar na redução das emissões de GEE do setor industrial, principalmente relacionadas à melhoria da eficiência energética, eletrificação, uso de combustíveis renováveis, evitar perdas e realizar capturas de gases de processo (McKinsey, 2018 apud Brasil, 2019).

A seguir serão apresentadas estratégias para a descarbonização da indústria da transformação, com foco na metalurgia e construção devido à sua relevância e concentração das emissões de escopo 1. É sabido todos os benefícios ambientais, sociais e econômicos associados à redução da emissão de GEE, contudo, é de conhecimento também que existem limitações tecnológicas, desafios e oportunidades para estes setores, especialmente os que mais demandam energia, como os de cimento, aço, vidro, alumínio, papel e celulose, e químico (CNI, 2024).

6.8.1 Metalurgia

A indústria metalúrgica, especialmente a siderurgia, é uma das mais intensivas em energia e emissões de gases de efeito estufa (GEE), devido ao uso predominante de

combustíveis fósseis e à natureza dos processos térmicos e químicos envolvidos na produção de aço (Mores Júnior *et al.*, 2024). Diante dos desafios impostos pela agenda climática global, diversas empresas do setor têm adotado estratégias robustas para mitigar suas emissões e promover uma transição para uma produção mais sustentável.

A ArcelorMittal Brasil projeta uma transformação profunda na matriz energética da produção de aço, com transição para fontes de baixo carbono como energia eólica, biomassa e hidrogênio verde. A empresa também planeja substituir o carvão mineral por gás natural em algumas plantas industriais, aumentar o uso de sucata, adquirir energia renovável certificada e implementar projetos de compensação de emissões por meio de créditos de carbono de alta qualidade.

A CSN destaca-se pela implementação da tecnologia nos regeneradores do alto-forno 2, que utiliza hidrogênio verde e oxigênio para melhorar a eficiência da combustão e reduzir emissões. A empresa também realiza estudos sobre o uso de carvão vegetal e inteligência artificial para otimização energética, além de aplicar coprocessamento de resíduos nos fornos de clínquer, com significativa redução de emissões.

A Ternium Brasil tem investido em tecnologias de controle avançado para os altos-fornos, que otimiza a operação e reduz perdas. A empresa também tem aumentado o uso de carvão pulverizado (PCI) e introduzido biomassa por meio da injeção combinada com carvão vegetal, além de reformar regeneradores para reduzir o consumo de gás natural fóssil. Outra medida relevante é o aumento do uso de sucata metálica, diminuindo a dependência de gusa nos convertedores.

Por fim, a Usiminas aposta na diversificação energética com a instalação de um parque fotovoltaico, com capacidade de autoprodução de 120 MW. A empresa também utiliza carvão vegetal em altos-fornos de grande porte e promove ações de educação e conscientização por meio da agenda ESG, incentivando práticas sustentáveis e mudanças de comportamento organizacional.

Além das estratégias adotadas pelas principais empresas do setor, a indústria siderúrgica brasileira tem se articulado em torno de iniciativas setoriais voltadas à descarbonização, reconhecendo sua relevância na transição para uma economia de baixo carbono. Segundo Mores Junior *et al.* (2024), a sustentabilidade na siderurgia brasileira depende da integração entre inovação tecnológica e gestão ambiental, com destaque para o uso de biomassa, hidrogênio verde e inteligência artificial para otimização dos processos produtivos.

A reciclagem de aço também se consolida como uma estratégia central para a redução das emissões de GEE. Estudos indicam que o reaproveitamento de sucata metálica,

especialmente proveniente do descomissionamento de estruturas industriais, pode reduzir significativamente a demanda por minério de ferro e energia, contribuindo para a diminuição da pegada de carbono do setor (Mezavila *et al.*, 2024). Essa prática, além de ambientalmente vantajosa, também apresenta benefícios econômicos ao reduzir custos operacionais e dependência de matérias-primas virgens.

Outro aspecto relevante é a transformação digital da indústria, que tem sido impulsionada pela chamada Indústria 5.0. Essa nova fase industrial prioriza a centralidade humana, a sustentabilidade e a resiliência dos sistemas produtivos. De acordo com Davim (2023), a Indústria 5.0 propõe uma simbiose entre tecnologia e gestão de pessoas, promovendo uma produção mais inteligente e ambientalmente responsável, com potencial de aplicação direta na metalurgia e siderurgia.

6.8.2 Construção Civil

A indústria da construção civil é uma das maiores responsáveis pelas emissões de GEE, especialmente devido à produção de cimento. No Brasil, esse setor tem buscado alternativas para reduzir sua pegada de carbono, com destaque para a substituição de matérias-primas e combustíveis fósseis, além da adoção de práticas de eficiência energética e gestão integrada dos impactos ambientais (Silveira, 2017).

Entre as empresas brasileiras, a InterCement tem adotado estratégias voltadas à redução do uso de clínquer, principal componente do cimento e responsável por grande parte das emissões de CO₂. A empresa substitui o clínquer por resíduos industriais como cinzas, escória de alto-forno e argilas pozolânicas. Além disso, o coprocessamento tem sido um dos pilares da estratégia de descarbonização, com aumento de aproximadamente 1,5% em 2023, refletindo avanços nas unidades fabris.

A Votorantim Cimentos também tem investido na substituição de combustíveis fósseis nos fornos de cimento, utilizando subprodutos de outras indústrias, como escórias siderúrgicas e cinzas de termoelétricas. A empresa também utiliza materiais cimentícios alternativos, como argila calcinada e pozolanas naturais, e promove ações de eficiência energética em seus processos produtivos.

Essas iniciativas empresariais se somam a um conjunto de estratégias setoriais que vêm sendo discutidas e aplicadas em diferentes escalas. Segundo Parsekian (2023), o uso de concretos com baixo teor de cimento, aditivos que aumentam a durabilidade, cura com CO₂ em blocos de concreto e reciclagem em centrais dosadoras são medidas fundamentais para eliminar

resíduos e reduzir emissões. Tais práticas têm sido incorporadas em projetos de engenharia civil com foco em sustentabilidade e desempenho ambiental.

A construção civil brasileira tem avançado na adoção de práticas sustentáveis que visam reduzir sua pegada de carbono. Entre as estratégias mais promissoras estão o uso de materiais de baixo carbono, como concretos com adições pozolânicas e recicladas, e a reutilização de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) na produção de argamassas sustentáveis. Essas práticas contribuem para a redução das emissões de CO₂, promovem economia de recursos naturais e agregam valor ambiental aos empreendimentos (Silva, 2021)

Além das iniciativas técnicas, há uma crescente articulação entre academia e setor produtivo para promover a sustentabilidade do concreto. A edição especial da Revista IBRACON de Estruturas e Materiais reúne estudos que discutem o impacto do transporte de materiais, o uso de polímeros reforçados com fibras, e a aplicação de concreto de ultra-alto desempenho em reabilitação estrutural. Essas ações demonstram que a descarbonização da construção civil exige uma abordagem integrada, considerando todo o ciclo de vida das estruturas e a viabilidade de tecnologias inovadoras (Parsekian, 2023).

6.9 Barreiras Transversais à Descarbonização

A descarbonização da indústria brasileira enfrenta uma série de barreiras que transcendem os limites tecnológicos e operacionais dos setores produtivos. Essas barreiras são transversais porque afetam diversos subsetores industriais de forma simultânea, dificultando a implementação de estratégias integradas de mitigação de emissões. Entre os principais entraves estão os desafios econômicos, institucionais, tecnológicos e sociais. Segundo Veiga e Rios (2023), essas barreiras transversais estão relacionadas à complexidade dos sistemas produtivos e à necessidade de inovação sistêmica e políticas industriais integradas. Além disso, Cruz (2021) destaca que a transversalidade nas políticas públicas exige articulação interinstitucional e sensibilidade aos impactos sociais da transição.

Do ponto de vista econômico, a transição para uma indústria de baixo carbono exige investimentos significativos em inovação, capacitação e por vezes em modernização de infraestruturas que foram concebidas há décadas. No entanto, muitos setores industriais operam com margens reduzidas e enfrentam dificuldades para acessar financiamento adequado. Aghion *et al.* (2016) argumentam que, embora instrumentos como impostos sobre carbono possam estimular a inovação tecnológica, eles também geram resistência em setores com alta intensidade energética, especialmente quando não há mecanismos compensatórios eficazes.

As barreiras institucionais também são relevantes. A quantidade e fragmentação entre órgãos reguladores, a ausência de metas claras e a falta de mecanismos de monitoramento e avaliação dificultam a implementação de políticas públicas coerentes. Dechezleprêtre e Sato (2014) destacam que regulações ambientais mal desenhadas podem comprometer a competitividade industrial, gerando efeitos adversos sobre a produtividade e o emprego.

No campo tecnológico, embora existam soluções de mitigação disponíveis, sua difusão é limitada por fatores como falta de capacitação técnica, infraestrutura inadequada e resistência à mudança organizacional. A transferência internacional de tecnologias verdes, por exemplo, é desigual e depende fortemente de políticas de incentivo e cooperação internacional. Dechezleprêtre, Glachant e Ménière (2011) mostram que países em desenvolvimento enfrentam dificuldades para acessar tecnologias de ponta, o que limita seu potencial de descarbonização.

Outro fator relevante que dificulta a descarbonização da indústria brasileira é a ausência de incentivos fiscais voltados à inovação verde e à adoção de tecnologias limpas. A falta de estímulos tributários específicos reduz a atratividade econômica de investimentos em processos produtivos sustentáveis, especialmente em setores com alta intensidade energética. De acordo com Calel e Dechezleprêtre (2016), incentivos fiscais bem desenhados podem aumentar significativamente a inovação empresarial, promovendo o desenvolvimento de patentes e tecnologias de baixo carbono, além de gerar efeitos positivos em termos de inovações tecnológicas. A ausência desses mecanismos no contexto brasileiro representa um entrave estrutural à transição energética e à competitividade ambiental da indústria nacional.

A pesquisa também identificou barreiras institucionais e informacionais relevantes. A ausência de dados consolidados por parte de associações e federações industriais limita o planejamento estratégico e o monitoramento das emissões. Atualmente, as iniciativas de descarbonização são majoritariamente voluntárias e concentradas em grandes empresas, o que dificulta a articulação de políticas públicas eficazes e a construção de uma agenda coletiva. Como apontado por Hecksher, Silva e Oliveira (2020), a regulação ambiental bem desenhada pode promover inovação e ganhos de produtividade, desde que acompanhada por instrumentos de incentivo e governança.

Há barreiras sociais e culturais que dificultam a transição. A percepção de risco, o desconhecimento sobre os benefícios da descarbonização e a falta de engajamento dos trabalhadores e comunidades locais são fatores que precisam ser considerados. A superação dessas barreiras exige uma abordagem sistêmica, que integre políticas públicas, instrumentos econômicos e estratégias de comunicação e educação ambiental.

6.10 Políticas Públicas e Regulação

A descarbonização da indústria não é responsabilidade exclusiva das empresas. O Estado desempenha um papel fundamental na criação de um ambiente regulatório favorável, capaz de orientar, incentivar e viabilizar a transição para uma economia de baixo carbono. A literatura aponta que políticas públicas bem desenhadas são essenciais para superar barreiras estruturais e promover a inovação sustentável no setor industrial (Cruz, 2021).

Um dos principais instrumentos à disposição do Estado são os programas de incentivo à eficiência energética, que visam reduzir o consumo de energia nos processos produtivos por meio de tecnologias mais eficientes e práticas de gestão energética. Esses programas podem incluir subsídios, linhas de crédito específicas e apoio técnico, contribuindo para a redução das emissões e dos custos operacionais das empresas. No Brasil, estudos demonstram que políticas de eficiência energética têm potencial significativo para promover o crescimento econômico ao mesmo tempo em que reduzem as emissões de gases de efeito estufa, sendo consideradas uma alternativa de menor custo para a mitigação climática (Magalhães; Domingues, 2016).

Outro mecanismo relevante é a implementação de créditos de carbono e mercados regulados de emissões, que permitem às empresas comercializar permissões de emissão dentro de limites estabelecidos por políticas ambientais. Essa abordagem cria incentivos econômicos para a redução de emissões e estimula investimentos em tecnologias limpas. A regulação desses mercados exige transparência, fiscalização e integração com metas nacionais de mitigação (Calel e Dechezleprêtre, 2016).

No Brasil, o mercado de carbono tem avançado como instrumento estratégico para a transição rumo a uma economia de baixo carbono. A criação de um sistema regulado de comércio de emissões, como previsto na Lei nº 15.048/2024, representa um marco importante, embora sua implementação ainda enfrente desafios regulatórios e operacionais.

Estudos apontam que uma boa governança, aliada à segurança jurídica e à previsibilidade, é essencial para atrair investimentos e garantir a efetividade do sistema (Dias, 2022). Além disso, o mercado de carbono é visto como um catalisador para o desenvolvimento sustentável, promovendo externalidades positivas como geração de renda, emprego e inovação tecnológica (Cunha, 2023).

Além disso, o Estado pode estabelecer normas técnicas e metas obrigatórias de redução de emissões, que funcionam como parâmetros mínimos de desempenho ambiental. Essas normas são fundamentais para garantir que todos os agentes econômicos atuem dentro de padrões sustentáveis, promovendo equidade regulatória e previsibilidade para os investimentos

(Dechezleprêtre; Sato, 2014).

Por fim, as parcerias público-privadas para inovação representam uma estratégia eficaz para acelerar a descarbonização industrial. Ao unir recursos, conhecimento técnico e capacidade de implementação, essas parcerias viabilizam projetos de pesquisa e desenvolvimento, infraestrutura verde e capacitação profissional. Elas também permitem que o setor público compartilhe riscos com o setor privado, ampliando o alcance das políticas de transição energética (ZOTIN, 2023).

Essas ações estão alinhadas com o Plano Clima, lançado pelo governo federal como guia da política climática brasileira até 2035. O plano estabelece metas de mitigação e adaptação, incluindo a redução de 59% a 67% das emissões líquidas de gases de efeito estufa até 2035, com base nos níveis de 2005. Ele também prevê estratégias transversais para financiamento, governança, capacitação e transição justa, além de planos setoriais específicos para a indústria (Brasil, 2024a).

O Plano Setorial de Mitigação da Indústria, componente do Plano Clima, reconhece a relevância do setor industrial na matriz econômica e de emissões do país. O documento propõe ações estruturadas para reduzir as emissões industriais, agrupadas em categorias como substituição de insumos por alternativas de menor emissão, ampliação do uso de energia renovável, eletrificação de processos, aplicação de tecnologias emergentes e promoção da economia circular. O plano também destaca os desafios transversais, como o alto custo de modernização, a necessidade de capacitação da força de trabalho e as barreiras de acesso ao financiamento (Brasil, 2025).

Em síntese, a atuação estatal é indispensável para criar condições estruturais que favoreçam a descarbonização industrial. Sem um arcabouço regulatório robusto, mecanismos de incentivo e coordenação interinstitucional, os esforços empresariais tendem a ser fragmentados e insuficientes frente à urgência climática.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral diagnosticar os principais desafios e propor estratégias voltadas à descarbonização da indústria da transformação brasileira, com foco nas emissões de escopo 1. A análise de 264 inventários de GEE de 88 organizações permitiu atender aos objetivos específicos, identificando padrões de emissão por categoria e subsetor, os principais emissores e construindo cenários prospectivos para subsetores relevantes.

Os achados confirmam a relevância da indústria da transformação na agenda climática nacional, com concentração significativa das emissões em poucos subsetores e empresas. Essa concentração reforça a necessidade de estratégias setoriais específicas e ações corporativas direcionadas, alinhadas às metas nacionais e internacionais de mitigação. A análise revelou que os subsetores de metalurgia e construção civil concentram cerca de 75% das emissões diretas, com predominância das categorias de processos industriais e combustão estacionária, que juntas representam mais de 90% das emissões de Escopo 1.

A projeção de cenários até 2030 indicou potencial expressivo de redução. No subsetor da metalurgia, a adoção de metas corporativas e tecnologias de baixo carbono pode reduzir as emissões de 50,7 MtCO_{2e} para 42,3 MtCO_{2e}, representando uma economia de 8,4 MtCO_{2e}. Já no subsetor da construção civil, a redução projetada é de 38,4 MtCO_{2e} para 31,6 MtCO_{2e}, totalizando 6,8 MtCO_{2e} evitados. Esses dados demonstram que a implementação de estratégias específicas pode gerar ganhos ambientais significativos e contribuir para o cumprimento das metas climáticas nacionais.

Apesar dos avanços, o estudo identificou lacunas importantes: apenas 44% das organizações analisadas reportaram indicadores de descarbonização em seus inventários, e menos de 15% implementaram projetos de compensação. Além disso, nenhuma das dez maiores emissoras relatou iniciativas de compensação, o que evidencia a necessidade de maior engajamento corporativo, padronização de métricas e integração com políticas públicas. A baixa adesão a práticas de monitoramento e compensação limita a capacidade do setor de demonstrar progresso e de se alinhar às exigências regulatórias e de mercado.

Cabe destacar que, em 2023, o Brasil contava com 369.841 indústrias da transformação com pelo menos um empregado (IBGE, 2023). A avaliação de 88 empresas neste trabalho evidencia a baixa representatividade da amostra frente ao total de organizações do setor, resultado da baixa adesão das indústrias brasileiras à elaboração e publicação de inventários de GEE no RPE. Entretanto, é importante ressaltar que essas 88 empresas são, em sua maioria, de grande porte e incluem algumas das maiores emissoras do setor, o que confere relevância à

análise realizada, mesmo diante da limitação amostral.

A descarbonização da indústria da transformação deve ser encarada como uma oportunidade estratégica para reposicionamento competitivo, alinhada aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e à Política Nacional de Mudança do Clima. A adoção de tecnologias de baixo carbono, o fortalecimento da governança ambiental e o estímulo à inovação são caminhos promissores para que o setor industrial brasileiro contribua efetivamente para a mitigação das mudanças climáticas e para a construção de uma economia mais sustentável e resiliente.

Este estudo contribui para a área de Tecnologias Ambientais ao demonstrar a aplicação prática de inventários corporativos como ferramenta para diagnósticos setoriais e construção de cenários prospectivos, fortalecendo a integração entre ciência e gestão ambiental.

Para a indústria da transformação, pode orientar investimentos em tecnologias limpas e práticas de eficiência energética. No âmbito da formulação de estratégias de descarbonização, o estudo fornece subsídios técnicos para políticas públicas e iniciativas privadas, alinhando metas corporativas às diretrizes nacionais e internacionais de mitigação climática.

Considerando as limitações identificadas, recomenda-se que pesquisas futuras ampliem a base de dados para incluir empresas que ainda não publicam inventários de GEE, explorando mecanismos para estimar emissões indiretas (Escopos 2 e 3) e sua relevância na cadeia produtiva. Outra linha promissora é a análise da efetividade das políticas setoriais e dos instrumentos econômicos, como o mercado regulado de carbono, sobre a descarbonização industrial.

Por fim, sugere-se investigar o impacto da integração entre tecnologias emergentes — como hidrogênio verde, captura e armazenamento de carbono e eletrificação — e modelos de economia circular, avaliando sua viabilidade técnica e econômica para diferentes subsetores.

8. PRODUÇÃO DE PRODUTO TÉCNICO / TECNOLÓGICO

Opções de PTT:

- **Relatório Técnico Conclusivo**

Um relatório técnico conclusivo é um documento final que sintetiza os resultados de um projeto, pesquisa, serviço ou investigação, apresentando os fatos, análises e conclusões obtidas. A estrutura pode variar, mas geralmente inclui identificação do projeto e cliente, descrição dos serviços/atividades realizadas, resultados, conclusões e, por vezes, recomendações, seguindo normas técnicas como as da ABNT

9. REFERÊNCIAS

- AGHION, Philippe; DECHEZLEPRÊTRE, Antoine; HÉMOUS, David; MARTIN, Ralf; VAN REENEN, John. *Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: evidence from the auto industry*. *Journal of Political Economy*, v. 124, n. 1, p. 1–51, 2016. Disponível em: <https://dash.harvard.edu/bitstreams/7312037d-f187-6bd4-e053-0100007fdf3b/download>. Acesso em: 7 set. 2025.
- ANACLETO, Cristiane Alves; BEUREN, Fernanda Hänsch; LOHN, Vanderléia Martins; CAMPOS, Lucila Maria de Souza; MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Ecoeficiência e Produção mais Limpa: uma análise das publicações em quatro periódicos brasileiros da engenharia de produção**. *Revista Gestão & Produção*, v. 27, n. 3, 2020. Disponível em: https://www.academia.edu/download/45809682/Ecoeficincia_e_Produo_mais_Limpa_Uma_An120160520-22754-d21c3y.pdf. Acesso em: 08 set. 2025.
- ARTAXO, Paulo. **Oportunidades e vulnerabilidades do Brasil nas questões do clima e da sustentabilidade**. *Revista USP*, São Paulo, n. 135, p. 119–136, 2022. Disponível em: <https://revistas.usp.br/revusp/article/view/206255/189890>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- ASSUNÇÃO, Gardênia Mendes de. **A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão**. *Revista Sistemas & Gestão*, v. 14, n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&id=W2954706518>. Acesso em: 10 out. 2025.
- BĂRBULESCU, Alina; HOSEN, Kamal. *Cement Industry Pollution and Its Impact on the Environment and Population Health: A Review*. *Toxics*, Basel, v. 13, n. 7, p. 587, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6304/13/7/587>. Acesso em: 8 set. 2025.
- BATAILLE, C. Åhman, M.; Neuhoff, K.; Nilsson, L. J.; Fishedick, M.; Lechtenböhmer, S.; Solano-Rodriguez, B.; Denis-Ryan, A.; Stiebert, S.; Waisman, H.; Sartor, O.; Rahbar, S. *A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement*. *Journal of Cleaner Production*, v. 187, p. 960–973, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>. Acesso em: 10 out. 2025.
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Descarbonização da indústria de base**. Rio de Janeiro: BNDES, 2023. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/25847/1/PRLiv_216288_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o%20da%20ind%C3%BAstria%20de%20base.pdf. Acesso em: 8 set. 2025.
- 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)**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm. Acesso em: 08 fev. 2025.
- BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/>. Acesso em: 30 jan. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Clima**. Brasília: MMA, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima>. Acesso em: 06 set. 2025.

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores (MRE). **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. 2015. Disponível em: http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf. Acesso em 04 fev. 2024.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC). **Plano setorial de mitigação e adaptação à mudança do clima para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na indústria de transformação (Plano Indústria)**. Brasília, 2013. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80076/Industria.pdf>. Acesso em 05 fev. 2024.

BRASIL. Ministério de Ciências, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 4ª ed. Brasília, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/estimativas_4ed.pdf. Acesso em: 16 fev. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil ao Acordo de Paris – versão em português**. Brasília: MMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/ndc-versao-em-portugues.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025

BRASIL. **Plano Setorial da Indústria – Estratégia Nacional de Mitigação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/psm-industria-documento-na-integra.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Setorial de Mitigação da Indústria**. Brasília: MMA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/psm-industria-documento-na-integra.pdf>. Acesso em: 04 set. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Estratégia de Longo Prazo para Descarbonização da Economia Brasileira**. Documento do Fórum Brasileiro de Mudança do Clima. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/estrat-gia-de-longo-prazo-para-descarboniza-o-da-economia-brasileira.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MCDI). **Nova indústria Brasil – forte, transformadora e sustentável : Plano de Ação para a neointustrialização 2024-2026**. Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI). Brasília : CNDI, MDIC, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/composicao/se/cndi/plano-de-acao/nova-industria-brasil-plano-de-acao-2024-2026-1.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

CALDAS, Lucas R.; SILVA, Livia C.; SIQUEIRA, Thaís P. L.; TOLEDO FILHO, Romildo D. **Descarbonização e política industrial: desafios para a cadeia do cimento**. DIP-BR Working Paper, n. 05, Instituto de Economia da UFRJ, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://www.ie.ufrj.br/images/IE/grupos/GIC/publica%C3%A7%C3%B5es/2025/DIP/DIP-BR_WP-5_Cadeia%20Produtiva%20do%20Cimento_v.final.pdf. Acesso em: 09 set. 2025.

CALEL, Raphael; DECHEZLEPRÊTRE, Antoine. *Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market*. *Review of Economics and Statistics*, v. 98, n. 1, p. 173–191, 2016. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/pdf/43830339.pdf>. Acesso em: 24 set. 2025.

CARVALHO, G. S.; SILVA, R. M.; NOVAIS, R. M. **Análise de periódicos da área de ensino de química indicados no Qualis Periódicos da CAPES**. *Anais do Congresso Nacional de Educação – CONEDU*, João Pessoa, v. 7, p. 1–15, 2020. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conedu/2020/TRABALHO_EV140_MD1_SA16_ID6398_01092020141341.pdf. Acesso em: 01 set. 2025.

CEMNET – *Global Cement Report – 15th Edition*. *International Cement Review*. Disponível em: <https://www.cemnet.com>. Acesso em: 29 ago. 2025.

CNI (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA); MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Descarbonização da indústria – análise de experiências internacionais e recomendações para o Brasil**. FIERN, 2024. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/f6/dd/f6ddbf14-6eea-4c18-a008-7c05b778ec3e/id_248438_descarbonizacao_da_industria_interativo.pdf. Acesso em: 07 set. 2025.

CNI (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI). **Participação da indústria na economia brasileira sobe para 22%**. Agência CNI de Notícias, 2019. Disponível em: <https://imprensa.portaldaindustria.com.br/releases/participacao-da-industria-na-economia-brasileira-sobe-para-22-diz-cni>. Acesso em: 04 set. 2025.

COSTA, Camila; SCHREIBER, Dusan; FIGUEIRÓ, Paola Schmitt; VIANA, Luciane Pereira. **Análise do marketing verde da empresa Natura Cosméticos**. *Revista DON*, Campo Grande, v. 11, n. 3, 2023. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&source=all&id=W4386429593>. Acesso em: 10 set. 2025.

CRUZ, Fernanda Natasha Bravo. **Conselhos nacionais de políticas públicas e transversalidade: (des) caminhos do desenvolvimento democrático**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência Política) – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/24308>. Acesso em: 7 set. 2025.

CUNHA, Natália da. **O mercado de carbono e o desenvolvimento sustentável: uma análise do cenário brasileiro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Ambiental na Indústria) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: https://repositorio.uergs.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/2928/_artigo_final_paos_revisado.pdf. Acesso em: 8 set. 2025

DAVIM, João Paulo; MACHADO, Carolina. **Indústria 5.0: pessoas, tecnologia e sustentabilidade**. Lisboa: Leya, 2023. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Indústria_5_0_pessoas_tecnologia_e_sust.html?id=_5jfEAAAQBAJ. Acesso em: 07 set. 2025.

DECHEZLEPRÊTRE, Antoine; SATO, Misato. ***The impacts of environmental regulations on competitiveness***. *Review of Environmental Economics and Policy*, v. 11, n. 2, p. 183–206, 2017. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.1093/reep/rex013?download=true>. Acesso em: 7 set. 2025.

DECHEZLEPRÊTRE, Antoine; SATO, Misato. ***The impacts of environmental regulations on competitiveness***. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/273769970>. Acesso em: 04 set. 2025.

DECHEZLEPRÊTRE, Antoine; GLACHANT, Matthieu; MÉNIÈRE, Yann. ***Invention and transfer of climate change-mitigation technologies: a global analysis***. *Review of Environmental Economics and Policy*, v. 5, n. 1, p. 109–130, 2011. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/epdf/10.1093/reep/req023>. Acesso em: 7 set. 2025.

DIAS, Eduardo Junqueira. **Mercado de carbono no Brasil: perspectivas, marcos regulatórios e paradigmas na transição econômica-política-social**. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Políticas Públicas) – Fundação Getúlio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/items/e2b1e39c-e7b3-46fb-bf46-7e751a896024>. Acesso em: 8 set. 2025.

ENDRIKAT, J.; GUENTHER, E.; HOPPE, H. ***Making sense of conflicting empirical findings: A meta-analytic review of the relationship between corporate environmental and financial performance***. *European Management Journal*, 32(5), 735–751, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.emj.2013.12.004>. Acesso em 01 fev. 2025.

FERREIRA, Helen Gonçalves Romeiro; MALAVOTA, Gustavo Pedroso; ALVES, Rodrigo Gomes; MONNERAT, Gustavo; MELLO, Sílvia Conceição Reis Pereira. **Resíduos sólidos urbanos (RSU): uma análise do setor energético em ascensão com base no impacto ambiental e na qualidade de vida**. *Formação*, [S. l.], v. 27, n. 51, 2020. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&source=all&id=W3081145672>. Acesso em: 9 set. 2025.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol. Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. 2ª Edição, 2008. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/15413>. Acesso em 04 fev. 2024.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. Escola de Administração de Empresas de São Paulo. Centro de Estudos em Sustentabilidade (GVces). **Registro Público de Emissões**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://registropublicodeemissoes.fgv.br> . Acesso em 04 fev. 2024.

FIRMINO, Anderson Luís; PEIXOTO, Fernanda Maciel. **Desempenho ESG e seu impacto no desempenho das emissões de gases de efeito estufa na América Latina**. Revista Contabilidade & Finanças, São Paulo, v. 36, n. 97, 2025. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rcf/article/view/237211>. Acesso em: 8 set. 2025.

FREITAS, Danielle Ramos Alves Corrêa de; SILVA, Maria Eduarda; OLIVEIRA, Ana Carolina. **Suzano Papel e Celulose: com ênfase no crescimento sustentável, equilibrado e inclusivo**. Revista de Gestão Empresarial, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 1–15, 2024. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/31876/1/gestaoempresarial_2024_2_daniellerosamosalvescorreade Freitas_suzanopapelecelulose.pdf. Acesso em: 15 set. 2025

GHG PROTOCOL: Programa Brasileiro GHG Protocol. **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol. Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. 2ª Edição, 2017. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/c7c1073a-44dc-489b-8c3c-da456d740592/content>. Acesso em: 28 mar. 2024.

GONDAK, Maurício de Oliveira. **A Economia Circular contribui para alcançar o Desenvolvimento Sustentável?** CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – CONBREPPO, 2019. Disponível em: http://aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/10202019_231019_5dad1b4775098.pdf. Acesso em: 24 set. 2025.

GEELS, F. W; SOVACOOOL, B. K.; SCHWANEN, T.; SÜSSEL, S. **Sociotechnical transitions for deep decarbonization**. Science, v. 357, n. 6357, p. 1242–1244, 2017. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aao3760>. Acesso em: 10 out. 2025.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. Revista USP, São Paulo, n. 135, p. 4–19, 2023. Disponível em: <https://revistas.usp.br/revusp/article/download/13564/15382>. Acesso em: 10 out. 2025.

GRANDINI, Guillermo Antonio Cerávolo; SANTOS, Jeronimo Alves dos; MARJOTTA-MAISTRO, Marta Cristina. **Desafios e estratégias para o reflorestamento no Brasil: capacidade produtiva e mercado de créditos de carbono pós-Acordo de Paris**. Revista de Gestão e Secretariado, São Paulo, v. 16, n. 4, 2023. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/download/4906/3195/15563>. Acesso em: 16 set. 2025.

GUEVARA, Arnaldo José de Hoyos. **ESG PRINCIPLES, CHALLENGES AND OPPORTUNITIES**. RISUS - Journal on Innovation and Sustainability, vol. 13, nº 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.23925/2179-3565.2022v13i4p18-31>. Acesso em 07 jun. 2024.

HECKSHER, Camila; SILVA, André L.; OLIVEIRA, Mariana C. **Regulação ambiental e inovação: uma análise da indústria brasileira**. Revista de Economia Contemporânea, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 1–25, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/rec/article/download/19713/11398/0>. Acesso em: 09 set. 2025.

HEROLD, D. **Demystifying the link between institutional theory and stakeholder theory in sustainability reporting**. *Economics, Management and Sustainability*, 3(2), 6–19, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14254/jems.2018.3-2.1>. Acesso em: 01 fev. 2025.

IEA – International Energy Agency. **Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions**. Paris: IEA, 2022.

Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-industrial-energy-efficiency-and-co2-emissions>. Acesso em: 10 out. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores IBGE: Contas Nacionais Trimestrais. Indicadores de Volume e Valores Correntes Jul.-Set.** Publicado em 03/12/2024. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2121/cnt_2024_3tri.pdf. Acesso em 25 jan. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual – Empresa (PIA-Empresa): dados gerais das empresas industriais com 1 ou mais pessoas ocupadas, ano-base 2023**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-empresa/quadros/brasil/2023>. Acesso em: 20 dez. 2025.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2023**. Brasília: Instituto Aço Brasil, 2023. Disponível em: <https://acobrasil.org.br>. Acesso em: 29 ago. 2025.

IPCC. Climate Change 2013: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/summary-for-policymakers/>. Acesso em: 15 set. 2024.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça, 151pp. 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 15 set. 2024.

IPCC. **History of the IPCC**. Genebra: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2024. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/history/>. Acesso em: 20 out. 2025.

KOULOUKOUI, D; MARINHO, M.M. de Oliveira; GOMES, S.M. da Silva; KIPERSTOK, A.; TORRES, E.A. **Corporate climate risk management and the implementation of climate projects by the world's largest emitters**. *Journal of Cleaner Production*, Volume 238, 20 November 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117935>. Acesso em: 02 fev. 2025.

LEITE, Saulo Rocha; SABONARO, Débora Zunkeller. **Revisão sistemática de literatura sobre a implantação de áreas verdes urbanas como política pública de combate às mudanças climáticas**. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 19, n. 8, 2024. Disponível

em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=all&id=W4403021867>. Acesso em: 06 set. 2025.

LEWANDOWSKI, S.; ULRICH, A. **Measures to reduce corporate GHG emissions: A review-based taxonomy and survey-based cluster analysis of their application and perceived effectiveness.** *Journal of Environmental Management*, Volume 325, Part B, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116437>. Acesso em: 31 jan. 2025.

MAGALHÃES, Aline Souza; DOMINGUES, Edson Paulo. **Aumento da eficiência energética no Brasil: uma opção para uma economia de baixo carbono?** *Economia Aplicada*, v. 20, n. 3, p. 273–310, 2016. DOI: 10.11606/1413-8050/ea146090. Disponível em: <https://revistas.usp.br/ecoa/article/download/124395/120883/234945>. Acesso em: 8 set. 2025.

MARINHO, Kettily Oliveira; MORAIS, Dafne Oliveira Carlos de. **Descarbonização da indústria química: compromissos assumidos por empresas que aderem à iniciativa Science Based Targets na América Latina.** *Anais do ENGEMA – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*, São Paulo, v. 26, p. 1–15, 2024. ISSN 2359-1048. Disponível em: <https://engemausp.submissao.com.br/26/anais/arquivos/431.pdf>. Acesso em: 9 set. 2025.

MARTÍN-DE CASTRO, G.; AMORES-SALVADÓ, J.; NAVAS-LÓPEZ, J. E.; BALAREZO-NUÑEZ, R. M. **Exploring the nature, antecedents and consequences of symbolic corporate environmental certification.** *Journal of Cleaner Production*, 164, 664–675, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.238>. Acesso em: 01 fev. 2025.

MARTINS, Layla Beatriz Boos; SANTOS, Vanderlei dos; VICENTI, Terezinha; CUNHA, Paulo Roberto da. **Aspectos contábeis dos créditos de carbono: estudo com autores nacionais a respeito da sua classificação, forma de reconhecimento e mensuração.** *Anais do Encontro Nacional da ANPAD – ENANPAD*, 2012. Disponível em: https://arquivo.anpad.org.br/diversos/down_zips/63/2012_CON2744.pdf. Acesso em: 07 set. 2025.

MCT - **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.** Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. 6ª edição, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>. Acesso em: 26 abr. 2024.

MENDES DE PAULA, Germano. **Decarbonization in the steel value chain: global and Brazilian experiences. DIP-BR Working Paper**, n. 06, Instituto de Economia e Relações Internacionais da UFU, Uberlândia, 2020. Disponível em: https://www.ie.ufjf.br/images/IE/grupos/GIC/publica%C3%A7%C3%B5es/2025/DIP/DIP-BR_WP-6_Cadeia%20Produtiva%20do%20A%C3%A7o_vfinal.pdf. Acesso em: 09 set. 2025.

MEZAVILA, José Henrique dos Santos. **Avaliação da reciclagem do aço gerado na etapa de descomissionamento das plataformas offshore.** Universidade Federal Fluminense, 2024. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/919410>. Acesso em: 07 set. 2025.

MORES JUNIOR, José Mauro; BENINI, Lucas; PARDAL, Juan Manuel; SANT'ANNA, João Vitor Souza. **Estudo exploratório sobre sustentabilidade na siderurgia brasileira: abordagens para a redução das emissões de gases de efeito estufa.** Universidade Federal Fluminense, 2024. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/920003>. Acesso em: 07 set. 2025.

MOTA, Márcio de Oliveira; MAZZA, Adriana Carla Avelino; OLIVEIRA, Francisco Correia de. **Uma análise dos relatórios de sustentabilidade no âmbito ambiental do Brasil: desenvolvimento sustentável, aumento de competitividade ou camuflagem organizacional?** Encontro de Estudos Organizacionais da ANPAD – EnEO, 2011. Disponível em: https://arquivo.anpad.org.br/diversos/down_zips/58/ESO961.pdf. Acesso em: 09 set. 2025.

MOUTINHO, Rafael Antonio; SILVA, Ricardo Luiz Menezes da. **O risco de carbono é relevante no mercado brasileiro?** Revista de Contabilidade e Organizações, São Paulo, v. 19, n. 65, 2025. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rco/article/download/224756/212463/746684>. Acesso em: 8 set. 2025.

ONU. Organizações Unidas. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**, 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 28 mar. 2024.

OLIVEIRA, P.; SOUZA, Guilherme Torres de. **Inovações e tendências de materiais sustentáveis na construção civil: uma revisão bibliográfica.** Revista Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 12, n. 3, 2024. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscar.html?task=detalhes&source=all&id=W4404879410>. Acesso em: 07 set. 2025.

PARSEKIAN, Guilherme Aris. **Estratégias e ações para maior sustentabilidade do concreto são tema de artigos do IBRACON Journal.** SciELO em Perspectiva | Press Releases, 2023. Disponível em: <https://pressreleases.scielo.org/blog/2023/01/09/estrategias-e-acoes-para-maior-sustentabilidade-do-concreto-sao-tema-de-artigos-do-ibracon-journal/>. Acesso em: 08 set. 2025.

PONTES, O. de M.; FIGUEIREDO, F. F. **Conferências internacionais sobre meio ambiente e desenvolvimento sustentável: outro mundo é possível?** HOLOS, 1(39), 2023. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/12036>. Acesso em: 15 set. 2024.

REZENDE, I. A. C. **Uma proposição de modelo integrado para avaliação da sustentabilidade empresarial.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/192978/001088680.pdf>. Acesso em: 16 set. 2024.

SANTOS, Maria Alice; SANTOS, Emerson Costa dos; MAIA, Maria de Fátima Rocha. **Produtividade e inovação ambiental: uma análise da indústria de transformação de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Inovação, Campinas, SP, v. 22, n. 00, p. 1–31, 2023. DOI: 10.20396/rbi.v22i00.8667755. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rbi/article/view/8667755>. Acesso em: 27 jan. 2025.

SILVA, B. S.; SANTOS, M. A.; SANTOS, E. C.; MAIA, M. F. R. **Ações adotadas pelas empresas da B3 alinhadas com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): uma análise dos relatórios de sustentabilidade.** Revista Mineira de Contabilidade, v. 22, n. 2, 2021. Disponível em:

<https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscar.html?task=detalhes&id=W3193330105>. Acesso em: 10 out. 2025.

SILVA, Victor Valério Landim da. **Reutilização de resíduos de construção e demolição na produção de argamassas sustentáveis.** In: VIANA, Álefe Lopes; SANTOS, Roberta Monique da Silva (Orgs.). Desafios para a sustentabilidade urbana nas cidades brasileiras. Campo Grande: Editora Inovar, 2021. Disponível

em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/642878/3/LIVRO%20DESAFIOS%20PARA%20A%20SUSTENTABILIDADE%20URBANA%20NAS%20CIDADES%20BRASILEIRAS.pdf>. Acesso em: 07 set. 2025.

SILVEIRA, José Henrique Porto (Org.). **Sustentabilidade e responsabilidade social.** Belo Horizonte: Poisson, v. 5. ISBN 978-85-93729-13-3, 2017. Disponível

em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/553988/1/Sustentabilidade%20vol5.pdf>. Acesso em: 07 set. 2025.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Roadmap Tecnológico da Indústria Brasileira de Cimento.** 2022. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/roadmap/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2025.

SOARES, Rodrigo Guimarães. **Descarbonização da cadeia de suprimentos: um estudo de caso da aplicação da descarbonização na indústria de O&G.** 2024. Dissertação (Mestrado em Gestão Empresarial) – Fundação Getúlio Vargas, Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas. Disponível

em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/42278d59-6ca1-4290-a376-cb52f46812f9/content>. Acesso em: 08 set. 2025.

VEIGA, Pedro da Motta; RIOS, Sandra Polónia. **Descarbonização, desafios e oportunidades para a indústria brasileira.** Fundação FHC e CINDES, 2023. Disponível em: <https://fundacaoofhc.org.br/wp-content/uploads/2024/09/politicas-industriais-verdes-experiencia-internacional-e-desafios-para-o-brasil.pdf>. Acesso em: 7 set. 2025.

VELOSO, F. C. **Cidades, adaptação às mudanças climáticas e articulação em redes transnacionais: um estudo de caso da cidade do Rio de Janeiro na rede C40.**

Universidade de Lisboa, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.5/28009>. Acesso em: 30 mar. 2024.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Provisional State of the Global Climate 2023. Media centre – 2023 shatters climate records, with major impacts.** Disponível em: [2023 shatters climate records, with major impacts \(wmo.int\)](https://www.wmo.int). Acesso em: 30 jan. 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION – WSA. **World Steel in Figures 2023.** Brussels: WSA, 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org>. Acesso em: 29 ago. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *GHG Protocol for Project Accounting* - 2005. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/project-protocol>. Acesso em: 04 fev. 2025.

10. APÊNDICE

Relação das 88 empresas e subcategorias que compuserem o banco de dados deste estudo.

Organização	Subcategoria
Acumuladores Moura	Químico e Plástico
Albras	Metalurgia
Alcoa	Mineração
Alpargatas S.A.	Roupas e Calçados
Arcelormittal Brasil	Metalurgia
Avb	Metalurgia
Be8	Óleos e combustíveis
Biorigin	Alimentícios e Bebida
Bosch	Metalurgia
Box Print	Embalagens
Braskem	Químico e Plástico
Carmeuse Brasil	Químico e Plástico
Casa da Moeda do Brasil	Serviços gráficos
Cbmm	Mineração
Celulose Riograndense	Papel e Celulose
Cerradinhobio	Óleos e combustíveis
Cipalam Soluções em Aço - LI	Metalurgia
Círculo S/A	Roupas e Calçados
Companhia Brasileira de Alumínio	Mineração
Companhia de Fiação e Tecidos Cedro e Cachoeira	Roupas e Calçados
Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)	Metalurgia
Cosimat	Mineração
Denso do Brasil Ltda	Eletroeletrônico
Dexco S.A.	Construção Civil
Dori Alimentos - Un10	Alimentícios e Bebida
Eldorado Brasil Celulose S/A	Papel e Celulose

Organização	Subcategoria
Enaex Brasil	Químico e Plástico
Envision Industria de Produto Eletronico Ltda	Eletroeletrônico
Flex	Eletroeletrônico
Ford	Automotivo
FS Fueling Sustainability	Óleos e combustíveis
Furukawa	Eletroeletrônico
Gelnex	Alimentícios e Bebida
Givaudan	Saúde e Beleza
Gonçalves Packaging	Embalagens
Grendene	Roupas e Calçados
Grupo Boticário	Saúde e Beleza
Grupo Malwee	Roupas e Calçados
Grupo Polar	Eletroeletrônico
Grupo Sengés	Papel e Celulose
Guiguel Industria de Plástico Ltda	Químico e Plástico
Honda Automóveis	Automotivo
Hypera S.A	Saúde e Beleza
Hyundai Motor Brasil	Automotivo
Igaratiba	Embalagens
Inpasa Agroindustrial	Óleos e combustíveis
Intercement	Construção Civil
ITB	Eletroeletrônico
JBS S/A	Alimentícios e Bebida
Karina Plásticos	Químico e Plástico
Klabin	Embalagens
Leão Alimentos e Bebidas	Alimentícios e Bebida
Liasa	Mineração
Lojas Riachuelo	Roupas e Calçados
Lwart	Óleos e combustíveis

Organização	Subcategoria
Mercedes-Benz Cars & Vans Brasil	Automotivo
Minerva Foods	Alimentícios e Bebida
Moove	Óleos e combustíveis
Moto Honda da Amazônia	Automotivo
Natura	Saúde e Beleza
Novo Nordisk Producao Farmacêutica do Brasil Ltda	Saúde e Beleza
Onesubsea	Metalurgia
Plural	Serviços gráficos
Posigraf	Serviços gráficos
Positivo Servers & Solutions Ilhéus	Eletroeletrônico
Raízen Energia	Óleos e combustíveis
Samsung da Amazônia	Eletroeletrônico
São Martinho S.A.	Óleos e combustíveis
SJC Bioenergia Ltda	Óleos e combustíveis
SSA	Alimentícios e Bebida
Suzano	Papel e Celulose
Symrise (Matriz)	Saúde e Beleza
Ternium Brasil Ltda	Metalurgia
Tigre	Químico e Plástico
Toyota do Brasil	Automotivo
Tuper S/A	Metalurgia
Ubyfol	Agronegócio
Usiminas	Metalurgia
Usina Açucareira S. Manoel S.A.	Óleos e combustíveis
Volkswagen do Brasil	Automotivo
Volvo do Brasil	Automotivo
Votorantim Cimentos	Construção Civil
Westrock	Embalagens
Zoetis Indústria	Agronegócio

Organização	Subcategoria
Seara	Alimentícios e Bebida
Friboi	Alimentícios e Bebida
JBS Couros	Roupas e Calçados
JBS Novos Negócios	Óleos e combustíveis