

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CAEL RODRIGUES ALVARENGA

A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA, A PRODUÇÃO DO AÇO E AS TECNOLOGIAS PARA
NEUTRALIZAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂

JUIZ DE FORA

2024

CAEL RODRIGUES ALVARENGA

A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA, A PRODUÇÃO DO AÇO E AS TECNOLOGIAS PARA
NEUTRALIZAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Engenharia da Universidade
Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial
para a obtenção do título de Engenheiro de
Produção.

Orientador: Eduardo Breviglieri Pereira de Castro

JUIZ DE FORA

2024

Alvarenga, Cael Rodrigues.

A indústria siderúrgica, a produção do aço e as tecnologias para neutralização da emissão de CO₂ / Cael Rodrigues Alvarenga. -- 2024.

53 p. : il.

Orientador: Eduardo Breviglieri Pereira de Castro
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2024.

1. Emissão de CO₂. 2. Indústria siderúrgica. 3. Neutralização gases de efeito estufa. I. Castro, Eduardo Breviglieri Pereira de, orient. II. Título.

CAEL RODRIGUES ALVARENGA

**A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA, A PRODUÇÃO DO AÇO E AS TECNOLOGIAS
PARA NEUTRALIZAÇÃO DA EMISSÃO DE CO2**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

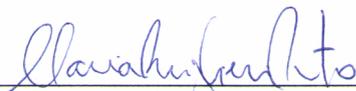
Aprovada em 30 de Setembro de 2024

BANCA EXAMINADORA



DSc Eduardo Breviglieri Pereira de Castro

UFJF



Clarice Breviglieri Porto

UFJF



Roberta Cavalcanti Pereira Nunes

UFJF

AGRADECIMENTOS

Desde criança, meus brinquedos favoritos eram os legos e os carrinhos. Eles eram mais do que diversão, eram ferramentas para explorar minha curiosidade. À medida que fui crescendo, os jogos de estratégia e planejamento começaram a capturar minha atenção. Na adolescência, a paixão por bicicletas, carros e motos me transformou em um verdadeiro inventor: desmontava e remontava tudo o que via pela frente.

Acho que, desde sempre, fui movido por essa inquietude, essa vontade de construir e de entender como o mundo funcionava. A organização, o desejo de encontrar o equilíbrio perfeito entre o “custo x benefício”, eram quase instintivos. Eu achava que isso me dava uma vantagem – e, de fato, dava. Com o tempo e o avanço no curso, percebi que o nome para essa busca incessante era otimização, algo que nós, engenheiros, perseguimos com fervor.

Quando escolhi a engenharia, não sabia exatamente o que me aguardava. Nem mesmo tinha certeza se essa era realmente a minha estrada. Mas, ao longo da jornada, descobri que ser engenheiro não é uma escolha, é uma missão. A engenharia sempre esteve em mim, não como um destino, mas como um propósito traçado. Sinto que estou atendendo a um chamado, algo maior que eu, afinal a engenharia é diferente.

Hoje, com o coração sereno e a certeza de que estou no caminho certo, preciso expressar minha gratidão: Primeiramente, à minha família. À minha mãe, Cláudia; ao meu pai, Helter; ao meu irmão, Cauã; e às minhas avós, Maria Aparecida e Terezinha. Sem a paciência, os sonhos compartilhados, o cuidado e o incentivo de vocês, nada disso seria possível.

Aos professores e funcionários da UFJF, que me guiaram com seus ensinamentos e lições valiosas. À SEEPRO, que abriu meus olhos para novas possibilidades. À Mais Consultoria, que me ensinou o verdadeiro significado da engenharia e me deu propósito. À ProdCrê, que foi meu alívio nos momentos mais difíceis. À Nexa e à Votorantim, pela oportunidade de início profissional e pelos ensinamentos que levarei para a vida inteira.

Aos amigos, especialmente a Tropa do Critt e à República Triplex, e todos aqueles que estiveram ao meu lado com amizade, companheirismo e cumplicidade. Sem vocês, essa jornada teria sido impossível.

E a Deus, por me dar a força para carregar as cruzes e a fé para nunca desistir.

Por fim, cito Sir Isaac Newton: “Se enxerguei mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes”. A faculdade não nos prepara apenas para o trabalho; ela nos prepara para a vida. E ter me formado em uma Universidade Federal me ensinou muito sobre humanidade e resiliência. Obrigado por me ajudarem a realizar esse sonho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a descarbonização da indústria siderúrgica, um setor relevante devido à sua significativa emissão de gases de efeito estufa (GEE), especialmente dióxido de carbono (CO₂). A preocupação com as mudanças climáticas refletida pelos acordos internacionais como a Eco-92, o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, que estabeleceram metas para limitar o aquecimento global, indica uma necessidade da redução das emissões de GEE, em especial o CO₂. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é apresentar um panorama atual da descarbonização da indústria siderúrgica mundial, com enfoque no Brasil, justificado pela importância da siderurgia no Brasil, que representa 4,6% das emissões de GEE do país. Para tal, a metodologia adotada foi a análise da regulamentação nacional e dos relatórios de sustentabilidade das companhias de maior relevância nacional. Foram apresentadas as ações de gestão ambiental que vem sendo empregadas e as tecnologias de descarbonização que estão sendo utilizadas por essas empresas, bem como os resultados alcançados por elas e as metas futuras estabelecidas. O Brasil tem o potencial de se tornar um líder global na transição para uma siderurgia de baixo carbono, graças ao uso de carvão vegetal e à abundância de fontes renováveis de energia. No entanto, para reduzir as emissões de GEE no setor e, eventualmente, neutralizar as emissões de CO₂, será necessário um esforço maior, incluindo investimentos em novas tecnologias, como captura e armazenamento de carbono, *Carbon Capture and Storage* (CCS) e hidrogênio verde. O setor siderúrgico brasileiro precisa de incentivos financeiros, políticas públicas claras e acesso facilitado a financiamento para investir nessas novas soluções tecnológicas. A colaboração entre governo, indústria e sociedade é igualmente essencial para que as metas do plano sejam alcançadas, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono e garantindo que o Brasil cumpra seus compromissos internacionais de mitigação das mudanças climáticas. Adicionalmente, políticas públicas que incentivem a reciclagem de aço e o uso de sucata, podem contribuir significativamente para uma siderurgia mais sustentável no longo prazo.

Palavras-chave: dióxido de carbono, descarbonização, emissão de GEE, gases de efeito estufa, siderurgia, aço.

ABSTRACT

This work presents a study on the decarbonization of the steel industry, a relevant sector due to its significant emission of greenhouse gases (GHG), especially carbon dioxide (CO₂). The urgency of climate change reflected by international agreements such as Eco-92, the Kyoto Protocol and the Paris Agreement, which established goals to limit global warming, brings with it the need to reduce GHG emissions, especially CO₂. The work is justified by the importance of the steel industry in Brazil, which represents 4.6% of the country's GHG emissions. The general objective is to present a current overview of the decarbonization of the global steel industry, with a focus on Brazil. To this end, the methodology adopted was the analysis of national regulations and sustainability reports of the most nationally relevant companies. The environmental management actions that have been used and the decarbonization technologies that are being used by these companies were presented, as well as the results achieved by them and the future goals established. Brazil has the potential to become a global leader in the transition to a low-carbon steel industry, thanks to its use of charcoal and an abundance of renewable energy sources. However, to reduce GEE emissions in the sector and eventually neutralize CO₂ emissions, a greater effort will be required, including investments in new technologies such as carbon capture and storage (CCS) and green hydrogen. The Brazilian steel sector needs financial incentives, clear public policies and easier access to financing to invest in these new technological solutions. Collaboration between government, industry and society is equally essential for the plan's goals to be achieved, promoting a transition to a low-carbon economy and ensuring that Brazil meets its international commitments to mitigate climate change. Furthermore, public policies that encourage steel recycling and the use of scrap can significantly contribute to a more sustainable steel industry in the long term.

Keywords: carbon dioxide, decarbonization, GHG emissions, greenhouse gases, steel industry, steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões globais de CO ₂ relacionadas à energia por setor em 2021.....	12
Figura 2 - Emissões globais de CO ₂ relacionadas com a energia.....	12
Figura 3 - Produção de aço bruto (toneladas/ano).....	18
Figura 4 - Fluxo de produção do aço.....	20
Figura 5 - Representação esquemática da interdependência da mineração de ferro e da siderurgia.	21
Figura 6 - Emissões de CO ₂ em uma usina siderúrgica integrada.....	23

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Produção e emissão específica de CO ₂ no setor siderúrgico global.....	27
Quadro 2 – Principais ações no setor privado para redução das emissões de CO ₂	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissão específica de CO ₂ no setor siderúrgico brasileiro.	26
Tabela 2 - Consumo de combustíveis de fontes não renováveis (GJ).	40
Tabela 3 - Consumo de combustíveis de fontes renováveis (GJ).	40
Tabela 4 -Reduções de emissões de GEE (t CO ₂ equivalente).	40
Tabela 5 -Reduções de consumo de energia obtidas em decorrência.	41
Tabela 6 - Consumo de energia dentro da organização.	42
Tabela 7 - Consumo de materiais provenientes de reciclagem (em toneladas).	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 ESCOPO DO TRABALHO	15
1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS	15
1.4.1 Objetivo geral	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 Ferro e aço	18
2.1 A APLICAÇÃO E USO DO FERRO E AÇO GLOBAL	18
2.2 PRODUÇÃO DE AÇO	19
2.2.1 Processo siderúrgico	20
2.2.1.1 <i>Matérias-Primas e Preparação</i>	20
2.2.1.2 <i>Redução</i>	22
2.2.1.3 <i>Refino (aciaria) e Produção de Aço</i>	23
2.3 EMISSÕES DE GEE PELA SIDERURGIA	24
3 AÇÕES	27
3.1 POLÍTICAS PÚBLICAS E A SUSTENTABILIDADE NA SIDERURGIA.....	28
3.1.1 Norma ISO 14401	29
3.1.1.1 <i>Limite de emissão de CO₂</i>	29
3.1.1.2 <i>Fluxo de massa e energia</i>	30
3.1.1.3 <i>Fatores de conversão</i>	30
3.1.1.4 <i>Fontes de emissões</i>	31
3.1.2 Geração de energia elétrica na siderurgia	32
3.2 REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO NA SIDERURGIA.....	33
3.2.1 Gás natural	35
3.2.3 Utilização de injeção de oxigênio	36
4 RESULTADOS	37
4.1 INICIATIVAS NA ESFERA PÚBLICA BRASILEIRA	37
4.2 INICIATIVAS NA ESFERA PRIVADA BRASILEIRA	39
4.2.1 Arcelor Mittal Brasil	39
5 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

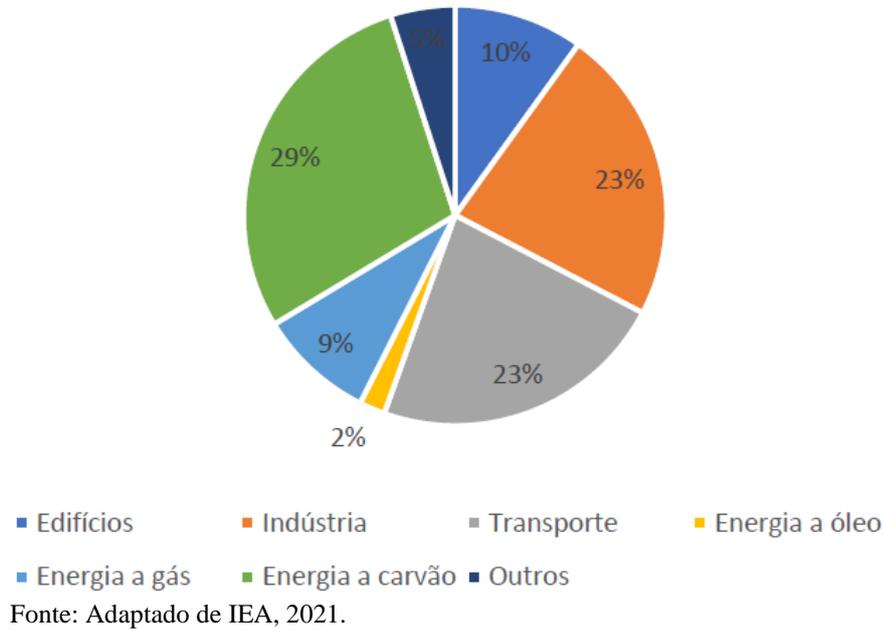
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As mudanças climáticas emergiram como um dos grandes desafios do nosso tempo, com possíveis implicações de longo alcance para o ambiente global e a sociedade. Desde a histórica Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro, a Eco-92, os esforços internacionais para abordar este fenômeno têm ganhado destaque. O Acordo de Paris, ocorrido em 2015, é um marco significativo, onde países se comprometeram a limitar o aumento da temperatura global em menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais, buscando esforços para limitar esse aumento a 1,5°C (*United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC, 2015). Este pacto representa uma abordagem coletiva e comprometida para mitigar os impactos das mudanças climáticas, promovendo adaptação e resiliência. Precedido pelo Protocolo de Kyoto, em 1997, o Acordo de Paris reforça a necessidade de cooperação global e ações concretas para enfrentar os desafios climáticos, destacando a importância da participação ativa de todas as nações na busca por soluções sustentáveis, ambos objetivando ações que reduzam a emissão de gases de efeito estufa (GEE).

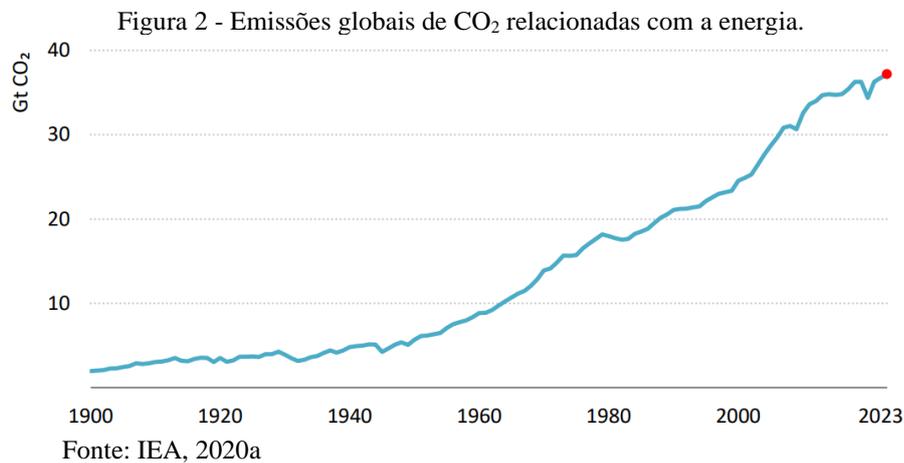
A questão climática depende de fatores e interações diversas, dinâmicas não lineares e seu comportamento no futuro é incerto. Sendo assim, é um grande desafio que necessita de ações robustas para ser enfrentado. A descarbonização das indústrias depende da adoção de medidas de menor emissão de GEE, como a implementação de tecnologias de baixo carbono, ainda em desenvolvimento e/ou de alto custo. Atividades de menor emissão de GEE devem crescer e há tendência de desaparecimento ou diminuição de outras que não se mostrarem capazes de implementar transformações tecnológicas de baixo carbono. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA) para uma redução de duas gigatoneladas de dióxido de carbono (CO₂) nas emissões de GEE de fontes industriais até 2030, seria necessário um aumento de US\$ 50 bilhões de investimento por ano, o que equivale a um custo 25 USD/t CO₂ (IEA, 2020a).

De acordo com os dados do IEA (2019), os setores que mais contribuem para as emissões de GEE seriam os de produção de energia (40%), transporte (23%) e indústria (23%). A Figura 1 indica a proporção das emissões de CO₂ por setor, no ano de 2021.

Figura 1 - Emissões globais de CO₂ relacionadas à energia por setor em 2021.



A geração de energia emitiu cerca de 37,4 gigatoneladas de CO₂ no ano de 2023, representando um aumento de 1,1% em relação ao ano de 2022 (IEA, 2024), maior valor registrado na história desde 1900, como pode ser visto na Figura 2.



As emissões industriais configuram parte significativa e que não pode ser ignorada como fonte relevante. Dentre as indústrias, a produção de ferro e aço é o maior emissor de GEE, sendo responsável por cerca de 39% das emissões dos GEE no Brasil (SEEG, 2020). As emissões de GEE pela siderurgia em 2020 totalizaram 2,6 bilhões de toneladas, representando cerca de 7 a 9% das emissões antropogênicas globais de CO₂ (*World Steel Association* - WSA, 2021). Em média são emitidas 1,89 toneladas de CO₂ por cada tonelada de aço produzido (WSA,

2021). Apesar da relevância em escala nacional e internacional, a produção do aço é um processo intensivo com relação ao consumo de matérias-primas e de insumos energéticos. Essas emissões são diretamente relacionadas ao processo produtivo, ocupando o segundo lugar em termos de consumo de energia geral. Além disso, a siderurgia é o maior utilizador de carvão de origem mineral dentre os setores industriais, o que representa 7% das emissões globais de GEE (IEA, 2020b). Esses dados destacam a necessidade da redução das emissões de GEE na siderurgia, o aumento da eficiência energética e a utilização avançada dos resíduos siderúrgicos gerados nos processos.

Para mitigar esses impactos, as empresas estão investindo cada vez mais em tecnologias de baixa emissão, reciclagem de resíduos e fontes de energia renovável (WSA, 2021). Apesar disso, os custos associados a uma produção de aço de baixo carbono foram estimados entre 10 a 50 % superiores aos padrões atuais (IEA, 2020b). Assim, essas medidas dependem de políticas públicas para incentivar uma transição de baixo carbono que mantenha a competitividade. Apesar da redução estimada em 60% no consumo energético por tonelada de aço nos últimos 50 anos, de acordo com Carvalho (2015), a siderurgia enfrenta o desafio de anular suas emissões de carbono entre 1950 e 2070 (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018*).

1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, aproximadamente 4,6% das emissões de GEE são associadas as indústrias, sendo 43% com a contribuição da siderurgia (RITTIL, 2019). O CO₂ representa cerca de 93% das emissões de GEE nas siderurgias (WSA, 2020).

O Brasil foi um dos países signatários do Acordo de Paris e assumiu o compromisso de reduzir a emissão de GEE por meio de suas contribuições nacionalmente determinadas (NDC). Devido a relevância da produção de ferro e aço neste cenário foi criado pelo governo um plano setorial específico para a siderurgia (BRASIL, 2020). Embora uma Política Nacional sobre Mudança do Clima tenha sido implementada em 2009, não há políticas públicas implementadas ou regulamentações que diretamente afetem a produção do setor de ferro e aço em termos de emissão de GEE.

Para atingir as metas, as estratégias de descarbonização abordadas no tratado incluem uma série de medidas, como a redução das emissões de GEE, o aumento do uso de energias renováveis, a melhoria da eficiência energética e a promoção de práticas sustentáveis nos setores de energia, transporte, indústria, agricultura e florestas (UNFCCC, 2015). A

precificação do carbono emergiu como uma ferramenta fundamental na redução das emissões de GEE, fornecendo incentivos econômicos para a transição para uma economia de baixo carbono. Esta abordagem envolve a imposição de um preço sobre as emissões de carbono, seja por meio de um imposto sobre o carbono ou de um sistema de comércio de emissões, como o Esquema de Comércio de Emissões da União Europeia (STIGLITZ, STERN e BÖHRINGER, 2017)

De acordo com relatório emitido pelo Banco Mundial, cerca de 23 % das emissões de GEE globais são cobertas por algum tipo de precificação de carbono, tendo gerado uma arrecadação de US\$100 bilhões em 2022, o que incentiva produtos de menor emissão de carbono tornarem-se mais competitivos e direcionar estratégias de descarbonização nas organizações (*International Chamber of Commerce - ICC Brasil, 2022*).

Em 2015, o G-20 sugeriu ao *Financial Stability Board*, levar em consideração as questões climáticas no setor financeiro das organizações, o que levou ao surgimento da *Task Force on Climate-related Financial Disclosures* (TCFD), em 2015 (TCFD, 2017). A TCFD surgiu como uma iniciativa global para promover a transparência e a divulgação de informações financeiras relacionadas ao clima por parte das empresas, desenvolvendo um conjunto de recomendações voluntárias destinadas a ajudar as organizações a identificarem, avaliar e divulgar os riscos e oportunidades financeiras associados às mudanças climáticas (TCFD, 2017). Essas recomendações abrangem áreas-chave, como governança, estratégia, gestão de riscos e métricas de desempenho, proporcionando uma estrutura robusta para a integração eficaz das considerações climáticas nas práticas de divulgação financeira (MORGAN, 2019; TCFD, 2017).

Investidores e clientes têm buscado cada vez mais informações sobre a sustentabilidade de produtos e serviços, o que torna a transparência da gestão de GEE nas organizações e no desempenho de suas emissões uma ferramenta de marketing que influencia no valor de mercado do empreendimento, bem como na atração e retenção de clientes. Outros fatores contribuem para a implementação de processos industriais de produtos de menor intensidade carbônica, como a precificação de carbono ou regulamentações que limitam emissões (BACKMA, VERBEKE e SCHULZ, 2017). Ademais a pandemia da Covid-19 que surgiu em 2020, mostrou que sociedade estaria mais sensível a temas de impacto e abrangência globais.

Outra justificativa que motivou o trabalho é o autor exercer função profissional na área de mineração e siderurgia há mais de 5 anos, apoiando em temas de meio ambiente com informações e dados de produção, sendo de seu interesse aprofundar e entender mais sobre o tema.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O presente estudo tem como objetivo principal examinar as emissões de GEE associadas ao setor siderúrgico, com ênfase no CO₂. Para isso, foi utilizada uma abordagem que envolve a análise de relatórios de mídias especializadas, documentos institucionais e referências bibliográficas relevantes. O trabalho cobriu desde o início das discussões sobre emissões e seus impactos ambientais, que remonta à Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992 (Eco-92), até as iniciativas mais recentes voltadas para o clima.

Apesar da sustentabilidade ser um termo amplamente discutido já há algum tempo, sua aplicação prática nas organizações ainda é recente. As principais limitações para o desenvolvimento do trabalho foram relativas à escassa base de dados aplicada ao contexto siderúrgico brasileiro. A indústria siderúrgica, responsável pela produção de ferro e aço, é uma grande fonte de emissões de CO₂ devido à sua dependência de processos intensivos em energia e a utilização de carvão como matéria-prima. Dessa forma foi entendido a importância e aplicação do ferro e aço no mundo, o fluxo produtivo na siderurgia, os principais materiais e insumos necessários e como estes contribuem para as emissões de GEE. Também se abordou as principais políticas e ações que vem sendo desenvolvidas pelo setor público e privado para incentivar a inovação no controle das emissões. Além da avaliação dos resultados das metodologias e alternativas já implementadas.

1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Apresentar a evolução de regulamentações e tecnologias para redução da emissão de carbono na siderurgia mundial e brasileira.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Apresentar conceitos técnicos sobre o processo siderúrgico;
- b) Caracterizar a indústria siderúrgica mundial e brasileira;
- c) Apresentar o processo de produção do aço;
- d) Apresentar a emissão de CO₂ pelas usinas siderúrgicas;

- e) Apresentar as regulamentações sobre redução da emissão de CO₂ no Brasil;
- f) Apresentar as tecnologias de neutralização de emissão de CO₂ utilizadas no Brasil.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

O presente estudo põe em foco a revisão da literatura das tecnologias utilizadas no fluxo produtivo da siderurgia para neutralizar a emissão de CO₂ e as políticas públicas relacionadas ao incentivo e desenvolvimento dessas ações.

Este trabalho pode ser enquadrado como natureza teórica, com uma abordagem qualitativa, empregando o método de uma revisão bibliográfica abrangente. As fontes consultadas são diversas, incluindo:

- Artigos Acadêmicos: Estudos publicados em revistas científicas especializadas proporcionarão uma visão detalhada sobre as tecnologias e políticas discutidas;
- Livros e Sites Especializados: Textos e plataformas dedicadas ao setor siderúrgico oferecerão informações contextuais e técnicas;
- Relatórios Institucionais: Documentos fornecidos por instituições de pesquisa e órgãos reguladores fornecerão dados e análises relevantes sobre as práticas e políticas atuais;
- Relatórios de Sustentabilidade: Relatórios publicados pelas indústrias serão utilizados para avaliar a implementação prática das tecnologias e políticas.

Esse conteúdo foi obtido através de plataformas acadêmicas, sites especializados, páginas institucionais e documentos públicos disponíveis na internet. A combinação dessas fontes permite uma visão abrangente das práticas atuais e das tendências emergentes no campo da neutralização de CO₂ na siderurgia.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é composta por cinco seções. A primeira seção consiste em uma introdução e contextualização do assunto, seguido por um referencial teórico que apresenta um breve panorama mundial e nacional da produção de aço, a caracterização do setor siderúrgico, com base na literatura e na análise de dados setoriais e institucionais de setores ligados a siderurgia. Em seguida, a mesma seção, apresenta e discute os dados de emissão de gases de efeito estufa, em específico de CO₂, pela siderurgia e os principais desafios de redução das

emissões de GEE em uma esfera mundial de produção de aço. A seção posterior apresenta e discute a evolução da regulamentação mundial e brasileira acerca do controle de GEE. Por fim, a quarta seção discute sobre as tecnologias de mitigação das emissões de CO₂, apresentando sua evolução, desafios e limitações. Já a última seção apresenta conclusão sobre o tema.

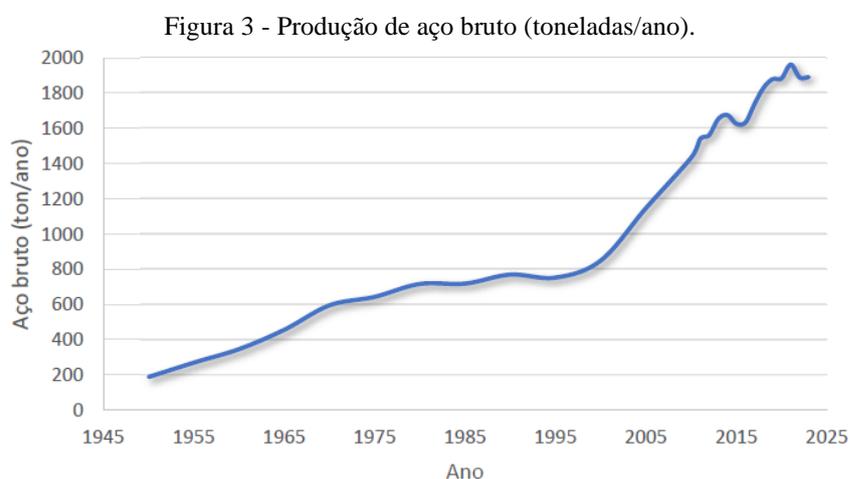
2 FERRO E AÇO

A evolução da produção de ferro e aço desempenhou um papel central no desenvolvimento da sociedade, desde sua utilização inicial na antiguidade até sua ascensão durante a Revolução Industrial e sua relevância no mundo contemporâneo. Ao longo dos séculos, o ferro e, posteriormente, o aço se tornaram indispensáveis para o avanço de setores como a agricultura, a construção civil, a infraestrutura e a fabricação de equipamentos. No Brasil, a extração de minério de ferro e o estabelecimento de usinas siderúrgicas contribuíram significativamente para o crescimento do setor industrial. Hoje, a produção global de aço continua a crescer, enfrentando novos desafios ambientais relacionados às emissões de CO₂, o que impulsiona a busca por inovações tecnológicas e soluções sustentáveis para o futuro.

2.1 A APLICAÇÃO E USO DO FERRO E AÇO GLOBAL

O uso do ferro surgiu em 1.200 A.C., promovendo profundas mudanças na sociedade, principalmente na produção de novos utensílios na agricultura e na confecção de armas mais modernas, possibilitando a expansão territorial (IABr, 2024). Na antiguidade, o ferro era muito utilizado por artesãos, principalmente na China e na Índia, porém sua ascensão se deu com a Revolução Industrial no século XIX, na Europa e na América do Norte. A aplicação da tecnologia de transformação de ferro gusa em aço, material mais resistente, ocorreu em 1956 viabilizando o aumento da produção e a ampliação de aplicações (IABr, 2024).

A produção de aço global tem crescido desde 1950, legitimando a sua posição de material relevante para a sociedade, conforme apresentado no gráfico da Figura 3.



Fonte: Adaptado de WSA, 2024.

Em 2021, foi registrada uma produção de 1,9 bilhões de toneladas de aço bruto, cerca de 10 vezes superior à produção de 1950 (WSA, 2024). A produção de aço mundial é de aproximadamente 1.887,2 milhões de toneladas de aço por ano, sendo o maior produtor de aço a China, com uma produção anual de 1019,1 milhões de toneladas em 2023 (WSA, 2024). O Brasil contribui com cerca de 1,8% na produção mundial, o que equivale a cerca de 34,1 milhões de toneladas ocupando a 9ª posição (IABr, 2022).

A venda anual de produtos de aço é estimada em US\$ 2,5 trilhões, gerando cerca de 6 milhões de empregos e um valor adicionado bruto de US\$ 500 bilhões, o que representa 0,7% do PIB global (WSA, 2019). Os principais setores consumidores de aço são a construção civil e infraestrutura, com 52% de consumo, seguido dos setores de fabricação de equipamentos mecânicos e de automotivos, com 16% e 12%, respectivamente (WSA, 2020, 2024).

No Brasil, a extração do minério de ferro em Minas Gerais possibilitou a instalação de usinas siderúrgicas a partir de 1917. Na década de 1930, com a construção da Usina Barbanson na cidade de João Monlevade, o país já apresentava uma capacidade instalada de produção de 50 mil toneladas por ano (IABr, 2013). Atualmente, o Brasil possui 31 usinas siderúrgicas, sendo 15 integradas e 16 semi-integradas, que são controladas por onze grupos empresariais: Arcelor Mittal Brasil, Gerdau, Ternium Brasil, Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Usiminas, SIMEC, Aperam, Vallourec, Sinobras, Aço Verde do Brasil e Villares Metals (IABr, 2022).

2.2 PRODUÇÃO DE AÇO

O setor siderúrgico brasileiro é bastante diversificado, possuindo os seguintes tipos de usinas: integrada a coque, integrada à redução direta, integrada a carvão vegetal, produtor independente de ferro-gusa à base de alto-forno e semi-integrada (CGEE, 2010). Sendo as duas rotas tecnológicas principais: as usinas integradas e as usinas semi-integradas.

Nas usinas integradas a produção é dividida em três fases: a redução (produção de ferro propriamente dito), o refino (produção e resfriamento do aço) e a conformação mecânica ou laminação (Figura 4). As usinas semi-integradas não contemplam a etapa de redução, portanto, seu processo se inicia na aciaria, onde são alimentadas por sucatas de ferro e ferro gusa (IABr, 2012). Nesse tipo de usina, a carga metálica é fundida à temperaturas elevadas com o uso de fornos elétricos a arco (EAF) (Carvalho, 2015).

Figura 4 - Fluxo de produção do aço.



Fonte: IABr, 2021.

2.2.1 Processo siderúrgico

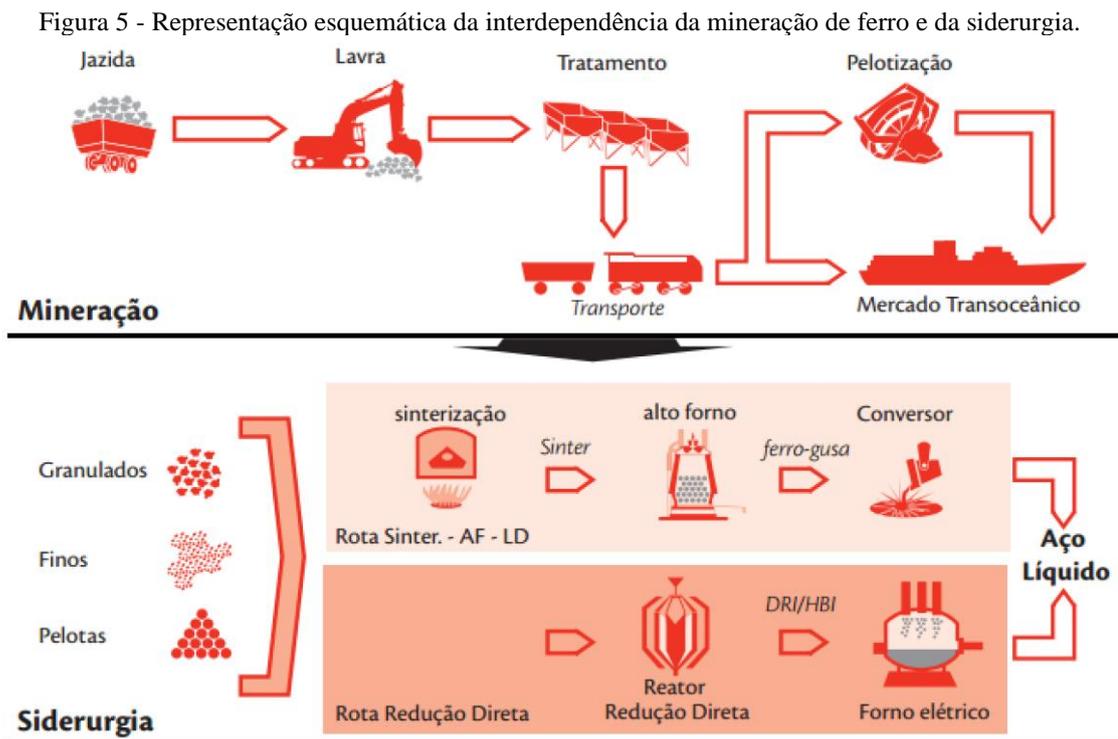
2.2.1.1 Matérias-Primas e Preparação

O processo siderúrgico começa com a seleção das matérias-primas, sendo os principais insumos o minério de ferro, o carvão e o calcário. O ferro pode ser encontrado na natureza na forma de óxidos, carbonatos e sulfetos. O minério de ferro é extraído de minas e passa por britagem e moagem para reduzir seu tamanho e aumentar a eficiência da fusão. O carvão é utilizado como fonte de energia e redutor na redução do minério de ferro, enquanto o calcário é adicionado para auxiliar na remoção de impurezas (IABr, 2021).

- **Ferro**

O Brasil possui a quinta maior reserva de minério de ferro mundial, além de se destacarem por serem as mais puras, mundialmente. Assim, as empresas desse setor estarão seguras quanto ao suprimento, em quantidade e qualidade, com benefícios para a sua competitividade (CGEE, 2010).

O minério de ferro é a matéria-prima básica da siderurgia, compondo as unidades metálicas (Fe) de alimentação dos reatores de redução, como o alto-forno e o módulo de redução direta. O minério dá origem ao ferro primário (ferro-gusa, *Direct Reduced Iron* - DRI e *Hot Briquetted Iron* – HBI) que após o tratamento nas aciarias é transformado em aço. Cerca de 97% do minério de ferro é utilizado na indústria siderúrgica, o restante é destinado às indústrias de cimento, química e outras. A Figura 5 apresenta as etapas de mineração.



Fonte: CGEE, 2010.

- **Carvão mineral**

O carvão é o nome dado a diversas rochas sedimentares que podem ser utilizadas como combustível, constituídas de um material heterogêneo originado de restos vegetais depositados em águas rasas, ao longo de milhões de anos, protegidos da ação do oxigênio do ar (de Paula,

2021). Os carvões caracterizam-se pelo alto teor de carbono, entre 55% a 95%. De acordo com esse teor, têm-se, em ordem crescente de teor de carbono: turfa, linhito, hulha (ou carvão betuminoso) e antracito (BRASIL, 2014).

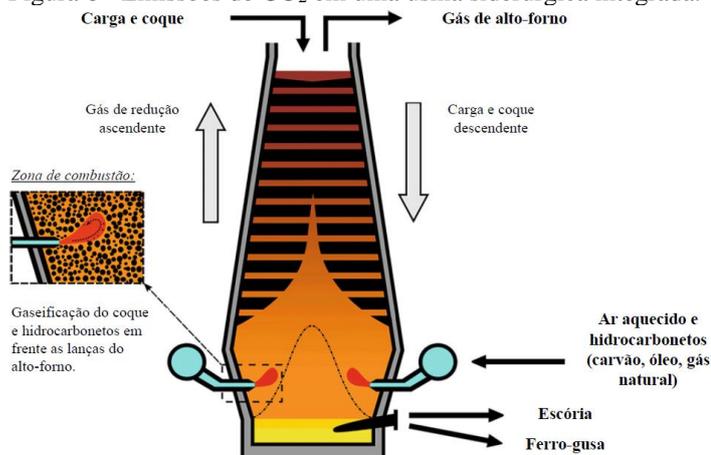
- **Carvão vegetal**

A atividade siderúrgica no Brasil iniciou-se no século 19 e até quase meados do século 20, o carvão vegetal era utilizado como biorredutor dos alto-fornos. Com o advento da operação das usinas siderúrgicas de grande porte, como a CSN, em 1946, Cosipa e Usiminas (anos 1960), Açominas e Tubarão (anos 1980), ele foi substituído pelo coque importado, devido às exigências tecnológicas, em função da escala dos novos altos-fornos (CGEE, 2015).

2.2.1.2 Redução

Nos alto-fornos (Figura 6) o minério de ferro é reduzido da sua forma metálica, geralmente um óxido de ferro, em uma liga metálica de ferro-carbono. O produto final desta etapa de alta-temperatura é o ferro gusa, que é a matéria-prima básica para a produção de aço (IABr, 2021). A redução do minério de ferro ocorre geralmente através do coque de carvão mineral, carvão vegetal ou gás natural. O minério de ferro e os fundentes são carregados pelo topo do alto-forno, enquanto é injetado ar quente pela sua base. O carbono do coque se combina com o oxigênio do minério, liberando o calor responsável pela fundição do metal. Na base do alto-forno então, se deposita o ferro gusa que posteriormente é retirado e levado aos convertedores para seu refino (IABr, 2021).

Figura 6 - Emissões de CO₂ em uma usina siderúrgica integrada.



Fonte: Adaptado de (SUOPAJARVI ET AL., 2018).

2.2.1.3 Refino (aciaria) e Produção de Aço

O processo de refino consiste na transformação do ferro gusa em aço líquido, onde ocorre também a retirada das impurezas da liga metálica e, por último, a redução do teor de carbono (IABr, 2021).

Existem diferentes métodos de refino, sendo o mais comum o processo de oxigênio básico (BOF) e o processo de forno a arco elétrico (EAF). No processo BOF, o ferro-gusa é combinado com sucata de aço, oxigênio puro é soprado na mistura para remover impurezas e ajustar a composição química do aço. No EAF, a sucata de aço é fundida usando energia elétrica gerada por arcos elétricos (CGEE, 2010).

2.2.1.4 Conformação e Acabamento

Antes da conformação mecânica, o material é levado ao forno de reaquecimento para que fique dúctil e possa ser laminado. Em seguida, na conformação, o aço líquido é moldado de acordo com as especificações do produto final. Isso pode envolver processos como laminação, forjamento, estiramento e extrusão, conforme vantagens específicas de cada método e no tipo de produto-final desejado, sendo a laminação a mais utilizada mundialmente (IABr, 2021). Nessa etapa, o aço é considerado um produto semi-acabado, podendo ser classificado como placa, bloco ou tarugo, de acordo com suas dimensões.

Após a conformação, o aço passa por processos de acabamento, como recozimento, têmpera e galvanização, para melhorar suas propriedades mecânicas e protegê-lo contra corrosão (IABr, 2021).

2.3 EMISSÕES DE GEE PELA SIDERURGIA

As emissões de GEE geradas pelo setor siderúrgico mundial representam um dos maiores desafios ambientais da atualidade. A produção de ferro e aço corresponde a 8% do uso de energia final global e a 7% das emissões globais de GEE, justificando sua relevância para as questões relacionadas à mudança climática (IEA, 2020a). A principal fonte das emissões de GEE nesta rota é o consumo de energia elétrica e, em menor proporção, o consumo de carburantes, como coque ou gás natural para produção de escória protetiva dos eletrodos. A WSA (2020) apresenta quanto à emissão de CO₂ por tonelada de aço bruto mundial, a média de 1,85 t CO₂/t aço bruto entre 2015 e 2020.

O setor siderúrgico chinês é o maior do mundo e uma das principais fontes de emissões de CO₂ globais. Responsável pela produção de 928 milhões de toneladas de aço em 2018, cerca de 54% da produção mundial de aço, a China desempenha um papel central nas emissões desse setor (WSA, 2023a). No mesmo ano, emitiu aproximadamente 10.065 megatoneladas de CO₂, sendo o maior emissor de gás CO₂ do mundo (*Global Carbon Atlas*, 2019). De acordo com a IEA (2024), as siderúrgicas chinesas emitiram aproximadamente 1,8 bilhões de toneladas de CO₂ em 2022, o que corresponde a cerca de 15% das emissões totais de CO₂ da China, país que é o maior emissor de CO₂ do mundo. O processo predominante na China para a produção de aço é o de altos-fornos, que é um método altamente intensivo em carbono, resultando em uma emissão média de cerca de 2 toneladas de CO₂ para cada tonelada de aço produzido, acima da média global (INSTITUTO GLOBAL DE SIDERURGIA, 2021). Além da dependência de combustíveis fósseis, o crescimento econômico acelerado da China nas últimas décadas, associado à urbanização e à construção civil em grande escala, impulsionou a demanda por aço. Diante desse cenário, a China tem adotado medidas para reduzir as emissões de CO₂ em seu setor siderúrgico. Entre as estratégias implementadas, destaca-se a modernização das instalações siderúrgicas com tecnologias mais eficientes, como EAF alimentados por energia renovável, como solar e eólica, e o aumento da utilização de sucata de aço reciclado, que pode reduzir as emissões em até 50% quando comparado à produção primária de aço (MAGAZINE, 2024). Além disso, a captura e armazenamento de carbono (CCS) e o desenvolvimento de

tecnologias de redução direta de ferro (DRI) com hidrogênio verde são considerados cruciais para reduzir as emissões de longo prazo (IEA, 2022a; WSA, 2022a).

A Índia é atualmente o segundo maior produtor de aço do mundo, responsável por cerca de 10% da produção global e responsável, por aproximadamente, 12% das emissões totais de CO₂ da indústria nacional. Isso se deve, principalmente, à alta dependência do carvão como fonte de energia e agente redutor no processo de fabricação de aço (WSA, 2023a). O método predominante utilizado na Índia para a produção de aço é o de altos-fornos, assim como na China (INSTITUTO DE SIDERURGIA DA CHINA, 2021). Além disso, a crescente demanda por aço na Índia, impulsionada pelo rápido desenvolvimento urbano e industrial, tem pressionado ainda mais as emissões do setor. Para mitigar as emissões de CO₂ na siderurgia, a Índia tem adotado algumas medidas, como o uso de tecnologias de eficiência energética, como o EAF e iniciativas de CCS e de hidrogênio verde como substituto do carvão são vistas como soluções promissoras para reduzir a pegada de carbono (IEA, 2023). No entanto, esses projetos ainda estão em fase inicial, enfrentando desafios significativos, como os altos custos de implementação e a necessidade de infraestrutura adequada.

A produção de aço nos EUA, que representa cerca de 4% da produção mundial segundo a WSA (2023), gerando aproximadamente 1,2 CO₂/t aço bruto, segundo dados da *American Iron and Steel Institute* (AISI, 2023), inferior à média global. O setor tem se modernizado significativamente nas últimas décadas, com a transição para o uso de EAF, que agora representam mais de 70% da capacidade de produção de aço no país. Apesar desses avanços, o setor siderúrgico dos EUA ainda enfrenta desafios significativos na redução de suas emissões de CO₂ (SMITH, 2020). A principal dificuldade está na dependência da matriz elétrica do país, que ainda é parcialmente baseada em combustíveis fósseis, como gás natural e carvão. O governo dos Estados Unidos tem incentivado essas inovações por meio de subsídios e políticas voltadas à energia limpa, especialmente no contexto das metas climáticas do Acordo de Paris e da Lei de Redução da Inflação (IRA) de 2022, que inclui incentivos para a indústria de baixo carbono (Departamento de Energia dos EUA, 2022).

A siderurgia no Japão, sendo um dos maiores produtores de aço do mundo, cerca de 4,7% é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂ associadas à indústria global (WSA, 2023a). Grande parte dessas emissões deriva do uso intensivo de combustíveis fósseis, como o carvão, utilizado no processo de redução de minério de ferro nos altos-fornos. Diante desse cenário, a indústria siderúrgica japonesa tem se empenhado em desenvolver e implementar tecnologias de descarbonização, com o objetivo de mitigar suas emissões de CO₂.

Entre as soluções mais promissoras está a transição para processos de produção mais limpos, como o uso de hidrogênio em substituição ao carvão nos altos-fornos (IEA, 2023a). Além disso, o Japão tem investido em sistemas de CCS e na otimização do uso de energia (Agência de Energia do Japão, 2023). Apesar desses avanços, o caminho para uma siderurgia de baixo carbono no Japão ainda enfrenta desafios tecnológicos e econômicos, sendo essencial a continuidade de investimentos e políticas públicas robustas para apoiar essa transição sustentável.

O Brasil é responsável por cerca de 1,8% da produção de aço bruto mundial (WSA, 2023a), sendo a região Sudeste responsável por cerca de 93,6% da produção nacional (IABr, 2013). Embora a indústria siderúrgica brasileira tenha características diferenciadas em relação a outros países, principalmente pelo uso de carvão vegetal no processo de produção, ainda assim o setor responde por uma parcela importante das emissões nacionais de CO₂. Um aspecto que distingue a siderurgia brasileira é a utilização de carvão vegetal, proveniente de florestas plantadas, como alternativa ao carvão mineral em parte da produção de ferro-gusa, uma matéria-prima essencial para a fabricação de aço. Esse método, considerado menos intensivo em emissões, possibilita uma menor pegada de carbono quando comparado ao uso de carvão mineral. A emissão de CO₂ pela siderurgia nacional é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Emissão específica de CO₂ no setor siderúrgico brasileiro.

Emissão específica (t CO ₂ /t aço bruto)	2015	2016	2017	2018	2019	2020
WSA	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7
IPCC	1,8	1,9	1,8	1,8	1,7	1,6

Fonte: Adaptado de IABr, 2021, 2020.

Observa-se que a emissão de CO₂ no país vem reduzindo desde 2015. No entanto, a utilização de carvão vegetal é limitada, já que o Brasil ainda utiliza processos baseados em coque e carvão mineral, resultando em uma média de emissões de aproximadamente 1,6 toneladas de CO₂ por tonelada de aço produzido, valor abaixo da média global, que é de 1,85 toneladas. No ano de 2020, cerca de 51% do consumo de energia elétrica na siderurgia brasileira fora supridas pela autogeração, por meio de reaproveitamento dos gases de coqueria, altos-fornos e aciaria nas centrais termelétricas, ou por meio de usinas hidrelétricas próprias, caracterizando a Economia Circular na siderurgia (IABr, 2022). Apesar dessa menor intensidade média de emissões, o setor siderúrgico brasileiro ainda emitiu cerca de 70 milhões de toneladas de CO₂ em 2022, segundo dados do IABr. As siderúrgicas localizadas principalmente em Minas Gerais, onde o uso de carvão vegetal é mais comum, estão em

constante pressão para aumentar a eficiência dos processos e expandir o uso de tecnologias mais limpas. Contudo, a dependência de altos-fornos e a limitação da infraestrutura para a expansão do uso de energias renováveis ainda representam barreiras para uma redução mais expressiva nas emissões.

O resumo das emissões de CO₂ pela siderurgia de cada país encontra-se no Quadro 1.

Quadro 1 - Produção e emissão específica de CO₂ no setor siderúrgico global.

País	Produção de Aço (toneladas)	Participação na Produção Global	Emissão de CO ₂ por tonelada de aço (tCO ₂ /t)	Fatores de Emissão e Tecnologias
China	~928 milhões (2018)	54%	2,0 tCO ₂ /t	Uso predominante de altos-fornos (carvão), responsável por 15% das emissões totais da China. Investimentos em tecnologias de EAF e CCS em andamento.
Índia	~180 milhões (aprox. 2022)	10%	1,85 - 2,0 tCO ₂ /t	Alta dependência de carvão em altos-fornos. Investimentos iniciais em EAF, CCS e hidrogênio verde enfrentam desafios de custo e infraestrutura.
EUA	~74 milhões (aprox. 2022)	4%	1,2 tCO ₂ /t	70% da produção via EAF (mais eficiente). Desafios relacionados ao uso de combustíveis fósseis na matriz energética, incentivos via IRA.
Japão	~87 milhões (aprox. 2022)	4,70%	1,85 tCO ₂ /t	Uso intensivo de carvão em altos-fornos. Investimentos em tecnologias de descarbonização como hidrogênio e CCS enfrentam desafios tecnológicos.
Brasil	~36 milhões (2020)	1,80%	1,6 tCO ₂ /t (média em 2020)	Uso de carvão vegetal em parte da produção, contribuindo para menores emissões. Adoção de práticas de Economia Circular e autogeração de energia.

Fonte: Adaptado de IABr, 2022.

3 AÇÕES

A descarbonização do setor siderúrgico, essencial para mitigar os impactos das mudanças climáticas, demanda ações coordenadas tanto na esfera pública quanto na privada. No âmbito governamental, políticas regulatórias como a imposição de limites para emissões de CO₂, incentivos fiscais para adoção de tecnologias limpas e investimentos em pesquisa e

desenvolvimento desempenham um papel fundamental. Por outro lado, as empresas do setor devem assumir um compromisso com a inovação tecnológica, implementando processos mais eficientes e menos poluentes, como o uso de hidrogênio verde e reciclagem de sucata metálica. A sinergia entre políticas públicas robustas e iniciativas privadas responsáveis é crucial para que a siderurgia atinja metas de neutralidade de carbono sem comprometer sua competitividade econômica. A seguir apresentamos um panorama atual do que vem sendo feito em ambas as esferas, os resultados obtidos e as metas futuras para alcançar o objetivo da neutralidade de emissões de CO₂.

3.1 POLÍTICAS PÚBLICAS E A SUSTENTABILIDADE NA SIDERURGIA

São consideradas políticas públicas que incentivam redução da emissão de carbono na siderurgia a precificação de carbono, o suporte e financiamento de pesquisa e desenvolvimento, determinação de padrões de emissão como guias ou metas, códigos de construção de baixo carbono, divulgação de dados de mudança do clima, políticas de compras públicas associadas a *performance* do clima e incentivos a reciclagem.

Dentre os acordos e tratados que tratam sobre a redução da emissão de GEE, um dos mais atuais e relevantes para o setor siderúrgico é o Acordo de Paris, aprovado em 2015. Em vigor desde 2016, o acordo norteia medidas de redução de GEE a partir do ano de 2020. O tratado foi assinado por 197 países, e seu principal objetivo é limitar o aumento da temperatura do planeta em até 1,5 °C até 2100 (UNFCCC, 2015). Para que esse objetivo seja atingido é necessário que as emissões de carbono sejam anuladas entre 2050 e 2070, segundo o IPCC (2018). O Brasil assinou o acordo, assumindo o compromisso de (1) em 2025 estar com níveis de emissão de carbono em 37% abaixo do que em 2005 e (2) em 2030 estar com níveis de emissão de carbono em 43% abaixo do que em 2005.

Devido a necessidade de transparência socioambiental em suas atividades, as siderúrgicas precisaram apresentar informações, desenvolver indicadores capazes de analisar sua eficiência energética e realizar projetos que reduzam as emissões de GEE (BORDALLO, 2012). A WSA dispõe de parâmetros que orientam as siderurgias quanto ao monitoramento dos indicadores ambientais, sendo aplicados no setor siderúrgico nacional os seguintes (WSA, 2020):

- Emissão de gases de efeito estufa (t CO₂/tab);
- Intensidade energética (GJ/tab);
- Eficiência de materiais (porcentagem de materiais convertidos em produtos e subprodutos);
- Sistemas de gerenciamento ambiental (porcentagem de empregados e contratados trabalhando em instalações certificadas na ISO 14.001, ISO 45.001 (2018) ou EMAS.

É prática comum da gestão ambiental empresarial nas empresas a realização de um Inventário de Emissões de GEE, onde é realizado um mapeamento dos consumos energéticos e emissões por setor produtivo. Esses inventários podem ser publicados no Registro Público de Emissões do programa Brasileiro GHG *Protocol* (Registro de emissões, 2019).

3.1.1 Norma ISO 14401

A norma ISO 14401, amplamente conhecida por seu papel em definir diretrizes para a gestão ambiental, tem como um de seus focos principais a redução das emissões de CO₂ e a promoção de práticas sustentáveis em diversas indústrias. A norma foi elaborada pela WSA, que é a associação composta por cerca de 170 grandes produtoras de aço do mundo todo e orienta o método para cálculo de intensidade de emissões de CO₂ para siderúrgicas integradas. A ISO 14404-1 inclui a definição de limite, material e insumos, fluxo de energia e fatores de conversão de CO₂. O estabelecimento de limites claros para a emissão de dióxido de CO₂ nas operações industriais e comerciais visa mitigar os impactos negativos das atividades humanas sobre o meio ambiente. Nesse sentido, a norma proporciona um conjunto estruturado de recomendações e padrões que permitem às organizações monitorar, controlar e reduzir suas emissões de CO₂ de forma eficiente e mensurável.

3.1.1.1 Limite de emissão de CO₂

Como existem diversos tipos de siderúrgicas integradas com os mais variados *layouts*, disposições e equipamentos, em diversas condições ambientais, a ISO 14404-1 optou por aferir

a siderúrgica integrada sob a ótica de um volume de controle. Portanto, deve-se analisar tudo o que entra e tudo o que sai do mesmo.

A ISO 14404-1 caracteriza essas instalações por categoria:

- Categoria 1: instalações essenciais, como: Alto-Forno, Aciaria e Lingotamento;
- Categoria 2: instalações que operam dentro do limite ou podem ser terceirizadas, como: Sinterização, Coqueria, Fábrica de Cal, Pelotização, Fábricas de Oxigênio, Nitrogênio e Argônio, termoelétrica e caldeiras;
- Categoria 3: instalações não essenciais (ou linhas de acabamento), como Laminação a quente, Recozimento, Laminação a frio, Zincagem e Galvanização;
- Categoria 4: outras instalações para todas as atividades auxiliares.

3.1.1.2 Fluxo de massa e energia

Além do controle das emissões, a ISO 14401 também se preocupa com a gestão de fluxos de massa e energia. A análise desses fluxos permite que as empresas entendam melhor como os recursos materiais e energéticos são consumidos em suas operações, possibilitando a identificação de ineficiências e desperdícios. Esse entendimento detalhado dos fluxos de massa e energia é crucial para otimizar os processos produtivos, reduzir o consumo de energia e minimizar a geração de resíduos, o que contribui significativamente para o cumprimento das metas de sustentabilidade estabelecidas pela norma.

3.1.1.3 Fatores de conversão

Os fatores de conversão desempenham um papel essencial na implementação eficaz das diretrizes da ISO 14401, especialmente no que se refere ao cálculo das emissões de CO₂ e à gestão dos fluxos de energia. Fatores de conversão são coeficientes utilizados para converter diferentes formas de energia ou massa em uma unidade padronizada, permitindo comparações precisas e a mensuração correta das emissões associadas. Por exemplo, a conversão de kWh de eletricidade consumida para a quantidade de CO₂ emitido requer o uso de um fator de conversão específico que considera a matriz energética da região. Assim, todo insumo consumido e

entrante nos limites da planta deve ser multiplicado pelo seu respectivo fator de conversão contabilizando sua respectiva emissão de CO₂.

3.1.1.4 Fontes de emissões

A ISO 14404-1 identifica três tipos de fontes de emissão: emissões diretas, emissões indiretas (*upstream*) e emissões de créditos. Os itens a seguir descrevem o processo de identificação das fontes de emissões.

- **Emissões diretas**

A primeira fonte significativa de emissão de CO₂ é a queima direta de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, durante o processo de fabricação. Esses combustíveis são amplamente utilizados em diversas fases produtivas, especialmente em indústrias de grande escala como a siderúrgica, em que são essenciais para alcançar as altas temperaturas necessárias para a fusão e transformação dos materiais. A queima desses combustíveis libera grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera, sendo uma das principais preocupações com os possíveis efeitos relacionados às mudanças climáticas.

Outro aspecto relevante abordado pela ISO 14404-1 é o uso de energia elétrica proveniente de fontes não renováveis. A eletricidade, quando gerada a partir de combustíveis fósseis, também contribui de maneira significativa para as emissões de CO₂. Nos processos industriais, muitas vezes a eletricidade é utilizada em larga escala, e sua origem impacta diretamente o balanço de emissões. Portanto, a norma incentiva a adoção de fontes de energia renováveis ou a eficiência energética como meios de minimizar o impacto ambiental.

- **Emissões indiretas**

As emissões indiretas são aquelas resultantes do transporte de matérias-primas e produtos acabados. A logística industrial, quando depende de caminhões e outros meios de transporte movidos a combustíveis fósseis, gera emissões adicionais de CO₂. Assim, a ISO 14404-1 oferece uma visão abrangente das emissões relacionadas à produção industrial,

promovendo a adoção de práticas sustentáveis para a redução das emissões em toda a cadeia produtiva.

- **Emissões de créditos**

As emissões de créditos são emissões de CO₂ correspondentes aos materiais ou insumos exportados, por exemplo, óleos de descartes, alcatrão gerado na coqueria, coque excedente de produção, eletricidade excedente ou vapor, entre outros.

Nesse contexto, a definição de limites para as emissões de CO₂ não trata apenas de restringir o volume absoluto de gases emitidos, mas também de promover o uso eficiente da energia e a implementação de tecnologias mais limpas. A ISO 14401 incentiva as organizações a adotar uma abordagem sistêmica, integrando o gerenciamento ambiental com a eficiência energética e o uso racional dos recursos. Essa abordagem não só reduz a pegada de carbono, mas também gera benefícios econômicos, como a redução dos custos operacionais e o aumento da competitividade no mercado.

É importante destacar que a norma ISO 14401 não é prescritiva, ou seja, não define medidas obrigatórias, mas oferece uma estrutura flexível que pode ser adaptada às necessidades específicas de cada organização. Isso permite que empresas de diferentes setores, tamanhos e localizações geográficas implementem as diretrizes de maneira compatível com suas realidades operacionais e seus objetivos de sustentabilidade. No entanto, o sucesso dessa implementação depende da capacidade da organização em monitorar continuamente seus processos e em investir na capacitação de sua equipe para interpretar corretamente os dados sobre fluxos de massa e energia.

Por fim, a relevância da ISO 14401 no cenário global está ligada ao crescente compromisso das nações e indústrias com a mitigação das mudanças climáticas. Ao estabelecer padrões claros para a redução das emissões de CO₂ e a gestão eficiente de recursos, essa norma se alinha aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável, oferecendo às organizações uma ferramenta poderosa para contribuir com a transição para uma economia de baixo carbono. A implementação eficaz dessas práticas é, portanto, fundamental para a construção de uma industrial mais sustentável.

3.1.2 Geração de energia elétrica na siderurgia

As usinas integradas possuem uma área de geração de energia elétrica chamada de central termoelétrica (CTE), onde é feita a transformação térmica dos gases para energia elétrica. São utilizados os gases gerados nos processos de coqueria (GCO), alto-forno (GAF) e aciaria (GAC). Eles são levados para as caldeiras e adicionado o gás natural para enriquecer o PCI (Poder Calorífico Inferior) dos gases, onde é feita a queima para produção de vapor que movimentará as pás de uma turbina para gerar energia elétrica (WSA, 2022). As CTE desempenham um papel crucial na geração de energia para grandes processos industriais, como a produção de aço e outros metais.

Nas usinas integradas, a necessidade de grandes quantidades de energia é suprida em parte por essas centrais, que convertem a energia térmica proveniente da queima de combustíveis fósseis, como carvão ou gás natural, em eletricidade. Esse tipo de instalação é especialmente importante em regiões onde a disponibilidade de fontes renováveis é limitada, tornando as termelétricas uma solução viável para garantir o fornecimento energético contínuo. Os gases são capturados e redirecionados para a cogeração de eletricidade e calor, o que não apenas aumenta a eficiência energética da usina, mas também contribui para a redução de emissões de poluentes, diminuindo o impacto ambiental da operação industrial (Associação Brasileira de Energia, 2022). Esse modelo de integração entre geração de energia e produção industrial reflete uma tendência global em direção à maior sustentabilidade no setor siderúrgico.

No entanto, apesar de sua relevância e eficiência, as CTE enfrentam desafios consideráveis relacionados às emissões de gases de efeito estufa, sobretudo de CO₂. Para mitigar esses impactos, muitas usinas estão investindo em tecnologias de CCS (captura de dióxido de carbono (CO₂)) e na modernização de suas centrais com foco em eficiência energética. Ao mesmo tempo, o desenvolvimento de fontes alternativas, como a biomassa, tem sido explorado como uma possível solução para substituir gradualmente o uso de carvão e outros combustíveis fósseis (ASSOCIAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2023; IEA, 2023b). Portanto, a modernização das centrais termelétricas integradas é fundamental para equilibrar a necessidade de produção energética em grande escala com as exigências contemporâneas de sustentabilidade ambiental.

3.2 REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO NA SIDERURGIA

Já é prática comum da gestão ambiental empresarial nas empresas a realização de um Inventário de Emissões de GEE, onde é realizado um mapeamento dos consumos energéticos

e emissões por setor produtivo. Esses inventários podem ser publicados no Registro Público de Emissões do programa Brasileiro GHG *Protocol* (Registro de emissões, 2019). As usinas mais eficientes demandam em média 19,6 GJ/t aço bruto (WSA, 2020).

Existem um grupo de medidas que podem ser adotadas para reduzir a emissão de CO₂ nas indústrias siderúrgicas, como (MCKINSEY, 2009):

- Medidas de eficiência energética;
- Troca de combustível;
- Processos onde há captura e sequestro de CO₂.

Diante da expectativa de reduzir as emissões globais de GEE, várias soluções tecnológicas têm sido propostas e implementadas. Entre elas, destacam-se a tecnologia CCS, o uso de hidrogênio verde como agente redutor no lugar do carvão e a transição para processos de fabricação de aço por meio de fornos elétricos alimentados por eletricidade renovável. Estima-se que, com o avanço dessas tecnologias, as emissões de CO₂ do setor siderúrgico possam ser reduzidas em até 30% até 2050 (IEA, 2023c; WSA, 2023b). Contudo, essas inovações ainda enfrentam desafios econômicos e técnicos, principalmente relacionados aos altos custos de implementação e à disponibilidade de fontes de energia renovável em escala global.

O Brasil foi o primeiro país a utilizar de carvão vegetal na siderurgia. O carvão vegetal é oriundo da madeira de florestas plantadas pelas indústrias siderúrgicas, 11,2% das indústrias do país utilizaram esse biorredutor no ano de 2020 (IABr, 2022). O carvão vegetal é uma fonte renovável e o sequestro de CO₂ pelas árvores durante o seu crescimento chega a anular as emissões do processo produtivo. Em 2022 foram utilizadas na produção de aço brasileira 8 milhões de toneladas de carvão mineral e antracito, 2 milhões de toneladas de coque e cerca de 320 mil toneladas de carvão vegetal, o que mostra a necessidade de ampliar a utilização de fontes renováveis nesse setor (IABr, 2024).

Além disso, algumas empresas já apresentaram metas de emissão em seus relatórios de sustentabilidade, como a Arcelor Mittal Brasil que lançou a meta de redução de emissão de CO₂ até 2030 por meio da maior utilização de sucatas, gás natural e carvão vegetal e a Gerdau, que passou a avaliar a utilização do hidrogênio em substituição ao carvão mineral como fonte de energia (Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - ABM, 2021; Adachi, 2020).

3.2.1 Gás natural

A utilização de gás natural na siderurgia tem se mostrado uma alternativa viável e mais ambientalmente sustentável em comparação com fontes tradicionais de energia, como o carvão coque. O gás natural, composto majoritariamente por CH₄, possui um menor teor de carbono, o que resulta em uma redução significativa das emissões de CO₂ durante o processo de produção de aço. Além disso, o uso do gás natural no alto-forno proporciona uma maior eficiência energética, devido à sua elevada capacidade calorífica, o que contribui para uma maior competitividade no setor siderúrgico (ABM, 2022; IEA, 2022b).

Do ponto de vista econômico, a adoção do gás natural como fonte de energia na siderurgia também traz benefícios, especialmente em países com fácil acesso a esse recurso. O custo operacional pode ser reduzido em função da maior eficiência energética e da menor necessidade de investimento em sistemas de controle de poluição atmosférica, em comparação com o uso de carvão (ABM, 2022; IEA, 2022b). No entanto, a transição para o gás natural exige adaptações nas infraestruturas industriais e, em alguns casos, pode demandar investimentos significativos em novas tecnologias. No longo prazo, essa mudança pode representar um passo importante para a descarbonização da indústria siderúrgica e para o cumprimento das metas globais de sustentabilidade.

3.2.2 Utilização de injeção de finos

A injeção de finos de carvão pulverizado (ICP) na siderurgia é uma técnica amplamente adotada para otimizar a operação de altos-fornos e reduzir custos de produção. O processo consiste na injeção de partículas finas de carvão diretamente no alto-forno, onde o material age como agente redutor, substituindo parcialmente o carvão coque utilizado tradicionalmente. Essa substituição não só diminui a dependência de coque, que é mais caro e tem um processo de produção intensivo em carbono, como também aumenta a flexibilidade operacional do forno, permitindo o uso de carvões de menor qualidade e custos mais baixos (ABM, 2021b; WSA, 2022c).

Além dos benefícios econômicos, a ICP também contribui para melhorias ambientais, uma vez que reduz o consumo de coque e, conseqüentemente, as emissões de dióxido de enxofre (SO₂) e de outros poluentes associados ao processo de coqueificação (ABM., 2021b;

WSA, 2022c). No entanto, para que essa técnica seja eficiente, são necessárias adaptações tecnológicas no sistema de injeção e um controle rigoroso dos parâmetros operacionais, como a granulometria dos finos e a taxa de injeção.

3.2.3 Utilização de injeção de oxigênio

A injeção de oxigênio na siderurgia, conhecida como processo de oxigênio enriquecido, representa uma inovação significativa na melhoria da eficiência e da produtividade dos altos-fornos. Essa técnica envolve a introdução de oxigênio puro ou enriquecido diretamente na câmara de combustão do alto-forno, o que acelera a reação de combustão e aumenta a temperatura interna do forno. A elevação da temperatura favorece a redução mais eficiente do minério de ferro, resultando em um aumento na qualidade do ferro gusa produzido e na capacidade do forno. Além disso, o uso de oxigênio reduz a necessidade de ar atmosférico para a combustão, o que diminui a formação de gases inertes e melhora a eficiência geral do processo (ABM, 2021c).

Adicionalmente, a injeção de oxigênio contribui para a sustentabilidade ambiental da siderurgia, uma vez que permite a redução do consumo de carvão e, conseqüentemente, diminui as emissões CO₂ associadas à produção de aço. Ao otimizar a combustão e melhorar a eficiência do forno, o processo de oxigênio enriquecido também resulta em menor geração de resíduos e uma maior economia de energia (ABM, 2021c). No entanto, a implementação desta tecnologia requer investimentos em sistemas de controle e monitoramento sofisticados, além de ajustes operacionais específicos para garantir a segurança e a eficiência do processo. Apesar dos desafios, os benefícios econômicos e ambientais da injeção de oxigênio fazem dela uma alternativa atraente para a indústria siderúrgica moderna.

4 RESULTADOS

A seguir as iniciativas e regulamentações na esfera pública e privada voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor siderúrgico brasileiro. No âmbito público, destaca-se a criação de políticas como a Lei Federal nº 12.187/2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), visando mitigar as emissões e adaptar o país às mudanças climáticas. Já no setor privado, empresas como ArcelorMittal, Gerdau, Ternium e CSN têm implementado estratégias para reduzir suas emissões de CO₂, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade e buscando tecnologias mais limpas e eficientes. Essas iniciativas são fundamentais para compatibilizar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental.

4.1 INICIATIVAS NA ESFERA PÚBLICA BRASILEIRA

A regulação voltada ao setor siderúrgico resume-se às leis ambientais, que visam o controle das emissões atmosféricas. Destaca-se a Resolução CONAMA n.º 382/2006, que em seu anexo XIII define os limites de emissão para poluentes atmosféricos gerados nas indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelotização de minério de ferro (CONAMA, 2006).

A Lei Federal nº 12.187, sancionada em 29 de dezembro de 2009, institui Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) no Brasil. Essa legislação estabelece diretrizes e mecanismos voltados para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, assim como para a adaptação do país aos efeitos das mudanças climáticas. O principal objetivo da lei é compatibilizar o desenvolvimento econômico sustentável com a conservação ambiental, criando metas para a redução de emissões e incentivando a adoção de tecnologias limpas (Brasil, 2009).

Entre os instrumentos previstos, destacam-se o Plano Nacional sobre Mudança do Clima e a criação de mecanismos de captação de recursos financeiros para ações de mitigação e adaptação, reforçando o compromisso do Brasil com os acordos climáticos internacionais. Adicionalmente, a lei prevê a participação ativa de diversos setores da sociedade na implementação das políticas climáticas, incluindo o setor privado, os governos estaduais e municipais, e a sociedade civil. Ela também promove o incentivo à inovação tecnológica e ao uso de fontes renováveis de energia, visando à transição para uma economia de baixo carbono.

A lei destaca a importância da preservação dos biomas brasileiros, como a Amazônia, que desempenha um papel crucial na regulação do clima global. Com isso, a PNMC se configura como um marco normativo na luta contra as mudanças climáticas no Brasil, estabelecendo as bases para uma governança climática mais robusta e integrada com as metas globais de sustentabilidade.

O Decreto Federal nº 9.578, de 22 de novembro de 2018, que regulamentou a referida Lei Federal nº 12.187/ 2009, consolidou atos normativos editados pelo Poder Executivo federal que dispõem sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e a Política Nacional sobre Mudança do Clima e instituiu em seu Art. 17, o Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia (Brasil 2018).

O Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia é uma iniciativa que visa a diminuir as emissões de GEE no setor siderúrgico. O plano visa alinhar a atividade siderúrgica com as metas nacionais de sustentabilidade, promovendo a transição para tecnologias mais limpas e eficientes. Entre as principais estratégias, destacam-se a modernização de fornos, o aumento da eficiência energética e o incentivo ao uso de matérias-primas renováveis, como o carvão vegetal de florestas plantadas, em substituição ao carvão mineral (Brasil, 2018).

Uma das principais metas do Plano Setorial é a promoção de processos produtivos que reduzam significativamente as emissões de CO₂, incentivando o uso de tecnologias de baixo carbono. Para isso, incentiva-se a adoção de novas técnicas, como a produção de aço por meio de EAF, que utilizam sucata metálica em vez de minério de ferro, resultando em menores emissões. Além disso, o plano incentiva o desenvolvimento de tecnologias de CCS, que têm o potencial de neutralizar as emissões durante a combustão de combustíveis fósseis. Outro ponto relevante é o estímulo ao reflorestamento para a produção sustentável de carvão vegetal, buscando não apenas a redução de emissões, mas também a proteção e ampliação das áreas florestais (Brasil, 2018).

No entanto, a implementação efetiva do Plano enfrenta desafios consideráveis, tanto no que tange aos custos de modernização das indústrias quanto à viabilidade econômica de algumas tecnologias inovadoras. O setor siderúrgico brasileiro precisa de incentivos econômicos, políticas públicas claras e financiamento para investir em novas tecnologias. Ademais, a colaboração entre governo, indústria e sociedade é essencial para que as metas estabelecidas pelo plano sejam alcançadas, contribuindo, assim, para a consolidação de uma economia de baixo carbono e o cumprimento dos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil na mitigação das mudanças climáticas.

4.2 INICIATIVAS NA ESFERA PRIVADA BRASILEIRA

Atualmente, todas as companhias siderúrgicas brasileiras têm adotado ações na área de sustentabilidade com foco na redução das emissões de CO₂, em conformidade com as diretrizes globais de sustentabilidade e as metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris, reafirmando o seu compromisso com a descarbonização. A seguir são apresentadas as estratégias adotadas e os resultados apresentados nos Relatórios das companhias.

4.2.1 Arcelor Mittal Brasil

A ArcelorMittal Brasil, uma das maiores empresas siderúrgicas do mundo, tem adotado uma série de ações estratégicas para reduzir suas emissões de CO₂. A empresa possui diversos planos dentro da gestão ambiental, como o Plano Diretor de CO₂, Plano Diretor Atmosférico, Plano Diretor de Coprodutos e Plano Diretor de Biodiversidade (Arcelor Mittal, 2023).

O Plano Diretor de CO₂, estabelece as principais ações para atingir as metas do Grupo de reduzir globalmente em 25% sua intensidade de emissões de CO₂ dos escopos 1 e 2 até 2030 e atingir a neutralidade das emissões de carbono até 2050. Nos próximos anos, a energia usada para produzir aço irá mudar de combustíveis fósseis para energia de baixa pegada de carbono, como energia eólica, biomassa e hidrogênio verde. Também serão empregadas novas abordagens como formas circulares de carbono e tecnologias para Captura de Carbono para Uso e Estocagem (CCUS) (ARCELOR MITTAL, 2023; BRASIL MINERAL, 2022).

A companhia marcou participação da 27^a Cúpula das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP27), que ocorreu em novembro de 2022, na cidade de Sharm el-Sheikh, no Egito. Cerca de 120 chefes de estado e representantes de governos estiveram presentes para discutir alternativas e assumir compromissos para mitigar as mudanças climáticas. A companhia firmou o compromisso de investir R\$ 1,9 bilhões para desenvolver tecnologias de carbono neutro. No Brasil, estão previstas iniciativas para aumentar o uso de sucata como matéria-prima, aumentar a utilização de gás natural e otimizar o uso de carvão vegetal nas plantas, além de projetos de eficiência (ARCELOR MITTAL, 2023).

Em 2022, a Arcelor Mittal iniciou a utilização de gás natural na unidade de Tubarão, diminuindo as emissões de CO₂. Para atingir esse objetivo, a empresa elaborou cinco estratégias em seus Planos Diretores de CO₂: aumento do uso de sucata; busca por fontes de energia renovável; transformação da produção de aço; transformação do uso de energia e compensação de emissões remanescentes (ARCELOR MITTAL, 2023). A companhia vem ampliando

utilização de fontes-renováveis de energia em comparação as fontes não-renováveis como pode ser visto nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Consumo de combustíveis de fontes não renováveis (GJ).

Fontes não renováveis/Ano	2020	2021	2022
Antracito	2.342.978	1.595.373	842.731,29
Ar comprimido	690.618,50	866.290,26	872.844,22
Argônio	17.954,80	21.691,60	22.280,15
Carvão mineral para coque	97.817.409,85	108.053.881,88	112.910.348,74
Carvão para PCI	34.732.342,37	55.003.876,88	51.110.926,17
Gás natural	5.356.311,69	5.223.642,13	8.314.390,54
GLP	25.809,29	24.600,64	38.451,57
Nitrogênio	1.535.612,77	1.727.932,69	1.714.143,51
Oleo diesel	774.401,12	968.513,33	1.180.296,7
Oxigênio	5.712.270,86	7.530.185,16	7.262.107,56
Total	149.005.708,78	181.015.987,68	184.268.520,45

Fonte: Adaptado de Arcelor Mittal, 2023.

Tabela 3 - Consumo de combustíveis de fontes renováveis (GJ).

Fontes não renováveis/Ano	2020	2021	2022
Carvão vegetal	3.385.215,05	3.494.910,60	3.948.614,01
Carvão vegetal para PCI	709.872,80	717.800,67	968.540,88
Total	4.095.087,86	4.212.711,27	4.917.154,89

Fonte: Adaptado de Arcelor Mittal, 2023.

As fontes renováveis, em 2022, ainda apresentam uma pequena fração do total de consumo de combustíveis, cerca de 2,6%, mas apresentam-se como uma ótima alternativa para crescimento futuro.

A geração de energia e a emissão de GEE podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4 -Reduções de emissões de GEE (t CO₂ equivalente).

Escopo/Ano	2020	2021	2022
Reduções provenientes de emissões diretas (Escopo 1)	49.268,66	52.114,43	106.506,11
Reduções provenientes de emissões indiretas da aquisição de energia (Escopo 2)	240.076,65	333.880,18	232.029,91
Reduções provenientes de outras emissões indiretas (Escopo 3)	27.182,86	41.804,06	33.610,74
Total de reduções de emissões de GEE	316.528,17	427.798,67	372.146,76

Fonte: Adaptado de Arcelor Mittal, 2023.

Observa-se na tabela a redução emissão total de CO₂, o que mostra que as ações adotadas pela empresa vêm apresentando resultados. A ArcelorMittal assumiu a meta de utilizar 100%

de energia elétrica renovável certificada até 2030. Nesse sentido, a empresa busca fortalecer os negócios, reduzindo custos de energia e criando oportunidades comerciais por meio da reutilização de carbono. Além disso, a empresa vem priorizando a eficiência energética, reduzindo o seu consumo ao longo dos anos como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 -Reduções de consumo de energia obtidas em decorrência de melhorias na conservação e eficiência (GJ).

Ano	2020	2021	2022
Total	404.425	192.482	569.409

Fonte: Adaptado de Arcelor Mittal, 2023.

Na unidade de Tubarão, foram identificadas 21 oportunidades de otimização do processo, dentre as quais dez foram implementadas, que contribuíram para a redução de 35.000 MWh/ano e, de aproximadamente 8.200 toneladas de CO₂ por ano. Em 2023, a ArcelorMittal Brasil anunciou que formará uma *joint venture* com a Casa dos Ventos, uma das maiores desenvolvedoras e produtoras de projetos de energia eólica no Brasil, para o desenvolvimento de um projeto de energia eólica de 553,5 MW. O projeto de cerca de R\$ 4,2 bilhões pretende assegurar e descarbonizar uma parte considerável das necessidades futuras de eletricidade das atividades da empresa no Brasil (ARCELOR MITTAL, 2023).

4.2.2 Gerdau

A Gerdau, uma das maiores produtoras de aço do Brasil e do mundo, tem implementado uma série de iniciativas estratégicas para a redução das emissões de CO₂ em suas operações. Em 2022, a empresa investiu 639 milhões em práticas ecoeficiente a fim de minimizar os impactos ambientais da produção de aço. A companhia. Considera o investimento em fontes renováveis um dos pilares fundamentais para o crescimento econômico, 15% dos processos produtivos são supridos por de energia renovável (GERDAU, 2023). Em termos de energia elétrica, é atingido um percentual de 43% de fontes renováveis e de baixa emissão de CO₂. No Brasil, a Gerdau detém a participação na concessão da usina hidroelétrica Dona Francisca Energética S.A. (DFESA), no Rio Grande do Sul, com capacidade nominal de 125 MW. Por meio da autodeclaração de energia 100% renovável, a empresa consegue abater cerca de 8 mil toneladas das emissões de CO₂. Em 2022, a Gerdau aderiu ao modelo de Consórcio de Geração Compartilhada de fonte solar para 11 das unidades (GERDAU, 2023).

Além do uso de fontes renováveis como solar e eólica, a empresa utiliza em sua matriz energética o carvão vegetal, proveniente de floretas plantadas, sendo a maior empresa produtora do mundo de carvão vegetal, com 250 mil hectares de áreas próprias, entre florestas preservadas e plantadas. Em 2022, a área florestal da empresa estocou o total de 13,96 milhões de toneladas de CO₂ e a área de florestas nativas, um total de 11,54 milhões de toneladas CO₂, estoques mantidos por meio da manutenção das florestas. Esse valor não é abatido das emissões de gases de efeito estufa da produção de aço da siderúrgica, mas reforça o papel importante da base florestal e da conservação de áreas quanto aos ganhos ambientais desempenhados por meio de ativos florestais (GERDAU, 2023).

A Tabela 6 apresenta as fontes de energia utilizadas pela empresa nos anos de 2020, 2021 e 2022.

Tabela 6 - Consumo de energia dentro da organização.

Ano	2020	2021	2022
Combustíveis de fontes renováveis	13.905.307,00	18.429.702,21	15.847.694,00
Combustíveis de fontes não renováveis	97.629.276,94	101.064.890,70	93.110.247,52
Consumo de eletricidade	33.830.905,40	32.516.819,29	32.759.344,20
Consumo total de energia dentro da organização	145.365.489,34	152.011.412,21	141.717.285,72

Fonte: Adaptado de GERDAU, 2023.

Como pode ser visualizado na Tabela 6, cerca de 11,20% da matriz energética da companhia é constituída por fontes renováveis de energia, como o biogás de aterros sanitários, biomassa, carvão vegetal, etanol hidratado e madeira de fonte renovável (BEM). Além disso, a empresa é a maior recicladora de sucata ferrosa da América Latina, produzindo 71% do aço a partir de sucata reciclada (Tabela 6) (GERDAU, 2023). A sucata é de origem doméstica (fogões, geladeiras, carros velhos) e de resíduos industriais (rejeitos da indústria metalmeccânica, de infraestrutura, automobilística, de peças, de máquinas e equipamentos), coletada por sucateiros parceiros da empresa.

A Tabela 7 apresenta os materiais provenientes de reciclagem na empresa.

Tabela 7 - Consumo de materiais provenientes de reciclagem (em toneladas).

Material/Ano	2020	2021	2022
Gusa (interno e externo)	3.889.719,60	4.400.119,22	4.235.032,24
Ligas	211.926,81	211.128,08	240.866,4
Carburantes	170.237,72	175.477,45	177.036,76
Sucata	11.482.790,78	11.733.571,20	11.240.380,2
Total de matéria-prima consumida no período	15.754.674,91	16.520.295,95	15.893.315,59
Total de matéria-prima Proveniente de reciclagem (sucata)	11.482.790,78	11.733.571,20	11.240.380,2

Fonte: Adaptado de Gerdau, 2023.

A Gerdau também promove a Economia Circular por meio do reaproveitamento de gases e de coprodutos. Os resíduos gerados na produção de aço da Gerdau servem de matéria-prima para outras indústrias, evitando a sua disposição em aterros sanitários (GERDAU, 2023).

De 2021 para 2022, a intensidade de emissões de GEE reduziu de 0,89 tCO₂e/t de aço para 0,86 tCO₂e/t de aço, menos da metade da média global do setor, que é de 1,85 tCO₂/t de aço. A redução alcançada se deve à melhoria da eficiência nas operações e alguns projetos de redução de emissões de GEE. A meta é de reduzir esse número para 0,82 tCO₂/t aço até 2031 e neutralizar as emissões de CO₂ até 2050 (GERDAU, 2023). Para tal, a empresa investe em novas tecnologias e na inovação aberta. Além disso, há um grupo de trabalho com especialistas de diversas áreas, que se reúnem periodicamente para direcionar as possíveis tecnologias alinhadas à estratégia de descarbonização da companhia. Oportunidades como CCS, CCUS e hidrogênio fazem parte das análises do grupo.

A Gerdau é uma das companhias que apresentam melhores resultados em termos de intensidade de emissão de GEE pela *Worldsteel*. Em 2022, a empresa foi anunciada como uma das novas integrantes da edição 2022 do *Sustainability Charter*. O *Charter* reúne um grupo de empresas líderes na produção de aço que assinaram a mais recente Carta de Desenvolvimento Sustentável da associação para reafirmar seu compromisso com os nove princípios sustentáveis da indústria (GERDAU, 2023).

4.2.3 Ternium

Ternium, uma das maiores produtoras de aço da América Latina, que opera no Brasil, México, Argentina, Guatemala, Colômbia e EUA, tem implementado um conjunto de ações estratégicas voltadas para a redução das emissões de CO₂. Para tal a empresa investiu cerca de 19,4 milhões de dólares em projetos de descarbonização em todas suas unidades, no ano de 2022. Atualmente, as siderúrgicas do grupo emitem aproximadamente 1,7 tCO₂e/t de aço (TERNIUM, 2022).

A companhia possui as metas de reduzir 20% a taxa de intensidade de emissões de CO₂ até 2030 em comparação ao ano de 2018, objetivando neutralizar as emissões na produção de aço. Para tal a Ternium desenvolveu um roteiro abrangente com tecnologias maduras, com

recursos disponíveis, regulamentações locais e os compromissos assumidos no Acordo de Paris. A estratégia compreende seis principais eixos: aumentar o uso de DRI-EAF na produção, expandir a captura e uso de CO₂; aumentar o uso de fontes renováveis na matriz energética, avançando ainda no programa de eficiência energética, intensificar o uso de sucata na mistura metálica, e utilizar parcialmente o carvão com biomassa (TERNIUM, 2022).

O projeto DRI-EAF visa aumentar o uso de 29% para 39% até 2026, mudando do gás natural para o hidrogênio verde. A empresa também anunciou o investimento de US\$ 160 milhões em um projeto de parque eólico na Argentina, que futuramente será responsável por 65% da eletricidade que atualmente é comprada por terceiros, reduzindo o total de 95.500 toneladas de CO₂ emitido anualmente. A empresa também tem investido em projetos de pesquisa e inovação voltados para a utilização de hidrogênio em seus processos industriais, e em tecnologia de CCS (TERNIUM, 2022).

4.2.4 CSN

A CSN tem adotado uma série de medidas estratégicas robustas para reduzir suas emissões de CO₂, como o investimento na modernização de suas instalações industriais, com a implementação de tecnologias mais eficientes que visam a redução das emissões associadas à produção de aço. A companhia possui como meta a redução de 20% das emissões de CO₂ t/t aço até 2035; reduzir em 28% as emissões de CO₂ t/t cimento até 2030, reduzindo fator clínquer em 16% e reduzir em 30% as emissões de CO₂ t/t de minério de ferro até 2035, se tornando carbono neutro até 2044. Para atingir tais objetivos a empresa tem atuado na expansão da aplicação de hidrogênio verde (tecnologia UTIS) nos processos produtivos da companhia, o início do coprocessamento em arcos e o teste de utilização de caminhões elétricos (CSN, 2023).

O coprocessamento em arcos consiste no reaproveitamento de resíduos industriais para substituição de combustíveis fósseis, tradicionalmente utilizados no processo de fabricação do clínquer, proporcionando uma destinação final ambientalmente adequada para o resíduo. Desde sua implantação, em 2022, o projeto proporcionou uma redução de aproximadamente 50 kgCO₂/t cimento produzido na planta, colaborando para a redução em termos absolutos de aproximadamente 93 mil toneladas de CO. Além disso, o coprocessamento também proporcionou um aumento da taxa de substituição de biomassa de 6%, (2021) para 14,9% (2022). Nos próximos anos, a empresa planeja expandir e aumentar a estratégia de coprocessamento (CSN, 2023).

A CSN Mineração assinou com a multinacional chinesa Sany um acordo para testar dois caminhões fora de estrada, 100% elétricos, em suas operações, substituindo o óleo diesel por baterias recarregáveis. Desde 2020, 100% da energética elétrica consumida na companhia é proveniente de fontes renováveis. Estima-se que, aproximadamente, 279.261 toneladas de CO₂, em um período de dez anos (2025-2035), possa ser reduzido, além de redução de custos operacionais com a frota (CSN, 2023).

Em 2022, o aço verde representou 16,4% de todo o aço produzido pela CSN. A produção de aço verde acontece na unidade siderúrgica SWT, localizada na Alemanha, com uma intensidade de 327kg CO₂ por tonelada de aço. A SWT desenvolveu sua estratégia para produção do aço verde CSN com foco nas demandas de clientes que buscam reduzir a sua pegada de carbono. A estratégia englobou as seguintes ações: (1) consumo de 100% de energia renovável; (2) melhoria contínua de processos por meio da eficiência energética apoiados pela ISO 50.001; (3) logística neutra através de parcerias com fornecedores para transporte de aço via ferrovia para clientes em diversas regiões da Europa e (4) declaração ambiental do produto. Essa estratégia permite que a CSN se posicione como um player importante no fornecimento de produtos premium, capturando ainda mais valor na comercialização dos seus produtos. De forma a reduzir ainda mais as suas emissões, a SWT planeja uma substituição gradual do gás natural por hidrogênio verde (CSN, 2023).

Em 2022 a empresa emitiu cerca de 1,99 CO₂ t/t aço, acima da média global de 1,85 CO₂ t/t aço e da média nacional de 1,6 CO₂ t/t aço. Para reduzir as emissões e cumprir as metas estabelecidas, a empresa se compromete a investir em projetos de descarbonização, irá manter 100% da energia elétrica utilizada no grupo proveniente de fontes renováveis; estudar novas tecnologias que estão e estarão disponíveis para descarbonizar qualquer um dos segmentos de atuação da empresa, entre outras ações (CSN, 2023).

O Quadro 2 apresenta as principais ações descritas ao longo do texto pela indústria siderúrgica nacional.

Quadro 2 – Principais ações no setor privado para redução das emissões de CO₂.

Empresa	Principais Estratégias e Resultados	Emissões de CO₂ e Metas	Fontes de Energia e Iniciativas Sustentáveis
Arcelor Mittal Brasil	<ul style="list-style-type: none"> - Plano Diretor de CO₂ com metas para reduzir 25% das emissões até 2030 e neutralidade em 2050. - Uso de sucata, energia renovável (biomassa, eólica, hidrogênio verde). - Investimento de R\$ 1,9 bilhões em tecnologias de carbono neutro. - Participação na COP27. - Joint venture com Casa dos Ventos para projeto de 553,5 MW de energia eólica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissões reduzidas: 2020: 316.528 t CO₂ 2021: 427.798 t CO₂ 2022: 372.146 t CO₂ - Meta: neutralidade de carbono até 2050. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do uso de fontes renováveis (2,6% em 2022). - Energia 100% renovável até 2030. - 35.000 MWh/ano economizados e 8.200 toneladas de CO₂ evitadas em Tubarão.
Gerdau	<ul style="list-style-type: none"> - Investimento de 639 milhões em práticas ecoeficientes em 2022. - 43% da energia elétrica proveniente de fontes renováveis. - Produção de aço com 71% de sucata reciclada. - Economia circular e reaproveitamento de resíduos e gases na produção. - CCS, CCUS, e hidrogênio em estudos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissões: 0,89 tCO₂e/t de aço (2021) 0,86 tCO₂e/t de aço (2022). - Meta: 0,82 tCO₂e/t de aço até 2031 e neutralidade até 2050. 	<ul style="list-style-type: none"> - 11,2% da matriz energética com fontes renováveis. - Autossuficiência energética com 125 MW da usina hidrelétrica Dona Francisca. - Consórcio de Geração Solar para 11 unidades.
Ternium	<ul style="list-style-type: none"> - Investimento de 19,4 milhões de dólares em descarbonização. - Roteiro estratégico com 6 eixos, incluindo uso de DRI-EAF e captura de CO₂. - Investimento de US\$ 160 milhões em parque eólico na Argentina. 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissões: 1,7 t CO₂e/t de aço (2022). - Meta: reduzir 20% da intensidade de emissões até 2030 e neutralidade até 2050. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do uso de fontes renováveis na matriz. - Projeto de parque eólico para suprir 65% da eletricidade na Argentina.
CSN	<ul style="list-style-type: none"> - Investimentos em tecnologias eficientes e modernização de instalações. - Produção de "aço verde" (16,4% em 2022). - Projeto de caminhões elétricos em parceria com empresa chinesa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissões: 1,99 tCO₂e/t aço (2022). - Meta: reduzir 20% das emissões de aço até 2035 e neutralidade até 2044. 	<ul style="list-style-type: none"> - 100% de energia elétrica proveniente de fontes renováveis desde 2020. - Coprocessamento de resíduos para substituição de combustíveis fósseis.

Fonte: Adaptado de Arcelor Mittal (2023), Gerdau (2023), Ternium (2022), CSN (2023).

5 CONCLUSÃO

O Brasil tem o potencial de ser um líder global na transição para uma siderurgia de baixo carbono, dado o uso do carvão vegetal e a abundância de fontes renováveis de energia. No entanto, para reduzir as emissões de GEE no setor e futuramente neutralizar as emissões de CO₂, segundo as metas do Acordo de Paris, será necessário um esforço maior, incluindo o investimento em novas tecnologias, como CCS e o uso de hidrogênio verde. Para tal, o Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia apresenta-se como um importante instrumento. Porém, a implementação eficaz do Plano enfrenta desafios significativos, especialmente em relação aos custos de modernização das indústrias e à viabilidade econômica de certas tecnologias inovadoras.

O setor siderúrgico brasileiro necessita de incentivos econômicos, políticas públicas consistentes e acesso a financiamento para investir em novas tecnologias. Além disso, a cooperação entre governo, indústria e sociedade é crucial para alcançar as metas estabelecidas pelo plano, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono e cumprindo os compromissos internacionais do Brasil na mitigação das mudanças climáticas. Além disso, são necessárias políticas públicas que incentivem a reciclagem de aço e o uso de sucata, cuja produção emite menos CO₂, podem contribuir para uma indústria siderúrgica mais sustentável no longo prazo.

REFERÊNCIAS

ADACHI, V. **Gerdau vai atrelar bônus de executivos a ESG e prepara meta de corte de CO₂, diz CEO**, 2020. Disponível em: <<https://www.capitalreset.com/gerdau-vai-atrelar-bonus-de-executivos-a-esg-e-prepara-meta-de-corte-de-co2-diz-ceo/>>. Acesso em: 1 mai. 2024.

AGÊNCIA DE ENERGIA DO JAPÃO. Iniciativas de captura e armazenamento de carbono e otimização energética no Japão. **Relatório de Política Energética**, 2023, pp. 20-25.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Gás Natural como Alternativa ao Carvão Coque na Produção de Aço: Benefícios Ambientais e Competitividade**. 2022b. Disponível em: www.iea.org/reports/gasnatsteel2022. Acesso em: 12 set. 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Tecnologias para a Descarbonização da Indústria Siderúrgica na China: CCS e DRI com Hidrogênio Verde. **Relatório Técnico**, 2022a, pp. 45-47.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Tecnologias para Redução de Emissões no Setor Siderúrgico: CCS, Hidrogênio Verde e Fornos Elétricos. **Relatório de Sustentabilidade**, 2023c, pp. 85-90.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Tecnologias para Redução de Emissões no Setor Siderúrgico: CCS, Hidrogênio Verde e Fornos Elétricos. **Relatório de Sustentabilidade**, 2023c, pp. 85-90.

ARCELOR MITTAL. **Relatório de Sustentabilidade 2022**, 2023. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/relatorio-de-sustentabilidade/>>. Acesso em 2 de ago. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA. **A Cogeração de Eletricidade e Calor em Usinas Termoeletricas: Benefícios Ambientais e Eficiência Energética**. 2022. Disponível em: www.energia.org.br/cogeneracao2022. Acesso em: 12 set. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO (ABM). 2021. **ArcelorMittal Brasil lança meta de redução de emissão de CO₂ até 2030**. Disponível em: <<https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/arcelormittal-brasil-lanca-meta-de-reducao-de-emissao-de-co2-ate-2030>>. Acesso em: 12 mai. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA (ABM). Injeção de finos de carvão pulverizado (ICP) na siderurgia: eficiência e redução de custos. **Relatório Técnico**, 2021b, pp. 35-40.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA (ABM). O Uso de Gás Natural na Siderurgia: Eficiência Energética e Sustentabilidade. **Relatório Técnico**, 2022, pp. 50-55.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA (ABM). Processo de Oxigênio Enriquecido na Siderurgia: Aumento de Eficiência e Produtividade. **Relatório Técnico**, 2021c, pp. 48-53.

ASSOCIAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Tecnologias de Captura de Carbono e Alternativas à Biomassa nas Centrais Termoeletricas**. Disponível em: www.energia-renovavel.org/cte2023. Acesso em: 12 set. 2024.

BACKMAN, C. A.; VERBEKE, A.; SCHULZ, R. A. The Drivers of Corporate Climate Change Strategies and Public Policy. **Business & Society**, [s. l.], v. 56, n. 4, p. 545–575, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0007650315578450>>. Acesso em: 23 mar. 2024.

BORDALLO, L. P. **Avaliação dos indicadores de sustentabilidade usa dos na indústria siderúrgica brasileira para produção de aço**. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

BRASIL MINERAL. **Parceria na siderurgia para reduzir emissões de CO₂**. 2022. Disponível em: <<https://brasilmineral.com.br/noticias/parceria-na-siderurgia-para-reduzir-emissoes-de-co2>>.

BRASIL. Decreto Federal nº 9.578, de 22 de novembro de 2018. Consolida atos normativos editados pelo Poder Executivo federal que dispõem sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009, e a Política Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Presidência da República. **Diário Oficial da União**, Brasília – DF, 22 de novembro de 2018.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Presidência da República. **Diário Oficial da União**, Brasília – DF, 29 de dezembro de 2009.

BRASIL. P, de M. B. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais Serviço Geológico do Brasil (org.). **Carvão Mineral**. 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRMDivulga/CarvaoMineral2558.html>. Acesso em: 1 mar. 2024.

BRASIL. Sobre o Projeto PMR Brasil. **Ministério da Economia**. Brasília, DF: MME, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-externo/ptbr/assuntos/competitividade-industrial/pmr>. Acesso em: 20 abr. 2024.

CARVALHO, P. S. L. de. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **Siderurgia, BNDES Setorial** 41, p.181–236, 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**; 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Siderurgia no Brasil: subsídios para tomada de decisão, 2010**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

COMPANHIA NACIONAL SIDERÚRGICA (CSN). **Relatório de Ação Climática**, 2023. Disponível em <<https://www.csn.com.br/wp-content/uploads/sites/452/2023/08/Climate-Action-Report.pdf>>. Acesso em 25 ago. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 382, de 26 de dezembro de 2006. Dispõe sobre os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, 2 jan. 2007.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Incentivos Federais para Energia Limpa e Indústria de Baixo Carbono**. Disponível em: www.energy.gov/incentives/IRA-2022. Acesso em: 12 set. 2024.

GERDAU. **Relatório Anual 2022**, 2023. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Relatorio-Anual-Gerdau-2022.pdf>>. Acesso em 25 ago. 2024.

GLOBAL CARBON ATLAS. **CO2 emissions. 2019**. Disponível em <<http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>>. Acesso em: 21 fev. 2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Relatório de sustentabilidade 2012**. Rio de Janeiro: IABr, 2013. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/07/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf>. Acesso em 4 mai. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Relatório de sustentabilidade 2013**. Rio de Janeiro: IABr, 2013. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio_sustentabilidade_2013v3.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Análise Setorial**. Rio de Janeiro: IABR, 2022. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **História do Aço**. Rio de Janeiro: IABR, 2021. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/historia-do-aco/>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Parque Siderúrgico**. Rio de Janeiro: IABR, 2019. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/parque-siderurgico/>>. Acesso em: 28 mai. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: IABr, 2018. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/publicacao/relatorio-de-sustentabilidade-2018/>>. Acesso em: 28 abr 2020. 7.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Relatório de sustentabilidade**. Rio de Janeiro: IABR, 2020a. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Uma viagem pela indústria do aço**. Escritório de Histórias: Belo Horizonte, 2013. Disponível em:

<https://acobrasil.org.br/site/wpcontent/uploads/2019/10/LIVRO_ACO_BX.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2024.

INSTITUTO DE SIDERURGIA DA ÍNDIA. Produção de Aço na Índia: Métodos e Desafios. **Relatório Anual**, 2021, pp. 30-32.

INSTITUTO GLOBAL DE SIDERURGIA. Impactos Ambientais da Produção de Aço na China. **Relatório Técnico**, 2021, pp. 10-12.

INTERNATIONAL CHAMBER OF COMMERCE (ICC-BRASIL). Oportunidades para o Brasil em mercados de carbono. Disponível em: <https://www.iccbrasil.org/wp-content/uploads/2022/10/FACT_SHEET_ICCBR_2022_final.pdf>. Acesso em 24 mai. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **CO₂ Emissions in 2023**. IEA, Paris, 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>>. Acesso em 2 mai. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Desafios e Soluções para as Centrais Termoeletricas: CCS e Alternativas Energéticas. **Relatório Técnico**, 2023b, pp. 70-75.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy End-uses and Efficiency. Disponível em: <www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-end-uses-and-efficiencyindicators-data-explorer>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global energy-related CO₂ emissions by sector**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-andstatistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector>>. Acesso em: 2 abr. 2024

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Iron and Steel Technology Roadmap**. Paris: IEA, 2020b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>>. Acesso em: 2 mai. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Sustainable Recovery**. Paris: IEA, 2020a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery>>. Acesso em: 2 jul. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14001:2015 – Environmental management systems – Requirements with guidance for use**. Geneva: ISO, 2015.

MAGAZINE, 2024 <https://www.pv-magazine-brasil.com/2024/07/05/a-china-pode-levar-o-mundo-a-zero-emissoes-liquidas/>

MORGAN, M. G. The role of TCFD in enhancing corporate climate risk disclosure. **Review of Environmental Economics and Policy**, v.13, n. 2, p. 362-382, 2019.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais e respectivas trajetórias de emissão de gases de efeito estufa, no contexto do**

fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza. 2018. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>>. Acesso em 20 mai. 2024.

REGISTRO PÚBLICO DE EMISSÕES, **Revista pesquisa e debate.** 2019. Disponível em: <http://www.registropublicodeemissoes.com.br/sobre>. Acesso em: 1 mar. 2021. Rio de Janeiro, 2012.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Base de Dados de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil 1970-2020**, 2020. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/download>>. Acesso em: 2 mai. 2024.

SMITH, J. Modernização e Sustentabilidade no Setor Siderúrgico dos EUA. **Relatório da Associação Americana de Siderurgia**, 2020, pp. 15-18.

STIGLITZ, J. E., STERN, N., BÖHRINGER, C. The potential for carbon pricing. **Oxford Review of Economic Policy**, v. 33, n.4, p. 639-661, 2017.

SUOPAJÄRVI, H. et al. Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies. **Applied Energy**, v. 213, p. 384–407, 2018.

TASK FORCE ON CLIMATE-RELATED FINANCIAL DISCLOSURES (TCFD). **Final Report: Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures.** Switzerland, 2017. Disponível em: <<https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf>>. Acesso em 09 mai. 2024.

TERNIUM. **Sustainability Report 2022.** 2023. Disponível em: <<https://www.ternium.com/media/kc1p0rmf/sustainability-report-2022.pdf>>. Acesso em 1 set. 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). (2015). **The Paris Agreement.** EUA: Nova York, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf>. Acesso em 06 mai, 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION (WSA). **Climate change and the production of iron and steel.** Brussels: WSA, 2021. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:228be1e4-5171-4602-b1e3-63df9ed394f5/worldsteel_climatechange_policy%2520paper.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2024

WORLD STEEL ASSOCIATION (WSA). **The hole of steel manufacturing in the global economy.** Brussels: WSA, 2019. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:fd44918-de3b-455b-9083-f770afa4a214/OE%2520Executive%2520Summary.pdf>>. Acesso em: 21 mai. 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION (WSA). **O Papel da ICP na Redução de Custos e Dependência de Coque nas Siderúrgicas**. 2022c. Disponível em: www.worldsteel.org/reports/ICP2022. Acesso em: 12 set. 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION (WSA). **Redução de Emissões na Siderurgia: O Papel do CCS e do Hidrogênio Verde na China**. 2022a. Disponível em: www.worldsteel.org/reports/decarbonization2022. Acesso em: 12 set. 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION (WSA). **World Steel in Figures**. Brussels: WSA, 2020. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f7982217-cfde-4fdc-8ba0-795ed807f513/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202020i.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2024.

WORLDSTEEL ASSOCIATION (WSA). **Climate change and the production of iron and steel**, 2021. Disponível em: <<https://worldsteel.org/publications/policy-papers/climate-change-policy-paper/>>. Acesso em: 2 mar. 2024.

WORLDSTEEL ASSOCIATION (WSA). **Tecnologias de Geração de Energia nas Usinas Siderúrgicas**. 2022b. Disponível em: www.worldsteel.org/reports/energygeneration2022. Acesso em: 12 set. 2024.

WORLDSTEEL ASSOCIATION (WSA). Total production of crude steel 2022. 2023b. Disponível https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND Acesso em 15 mai. 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 30 de Setembro de 2024.

Ruel Rodrigues Noronha
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

201449009

Matrícula

Ruel Rodrigues Noronha
ASSINATURA

088018.936-39

CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.