



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**DESCARBONIZAÇÃO NA CADEIA PRODUTIVA DA PELOTA DE MINÉRIO DE  
FERRO: ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS PARA UMA PRODUÇÃO  
SUSTENTÁVEL**

**Denny Christian Santos da Costa**

**Belo Horizonte**

**2025**

**Denny Christian Santos da Costa**

**DESCARBONIZAÇÃO NA CADEIA PRODUTIVA DA PELOTA DE MINÉRIO DE  
FERRO: ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS PARA UMA PRODUÇÃO  
SUSTENTÁVEL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. Doutor Arnaldo Freitas de Oliveira Junior

Belo Horizonte

2025

Costa, Denny Christian Santos da.  
C837d Descarbonização na cadeia produtiva da pelota de minério de ferro : estratégias e tecnologias para uma produção sustentável / Denny Christian Santos da Costa. – 2025.  
71 f. : il.  
Orientador: Arnaldo Freitas de Oliveira Júnior.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Belo Horizonte, 2025.  
Bibliografia.

1. Engenharia ambiental e sanitária. 2. Descarbonização. 3. Hidrogênio verde. 4. Biomassa. 5. Siderurgia. I. Oliveira Júnior, Arnaldo Freitas de. II. Título.

CDD: 628



**Denny Christian Santos da Costa**

**DESCARBONIZAÇÃO NA CADEIA PRODUTIVA DA PELOTA DE MINÉRIO DE FERRO: ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS PARA UMA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 04 de Dezembro de 2025

Banca examinadora:

Assinado por:

**Arnaldo Freitas de Oliveira Júnior**

61B3E5A2663B469...

---

Arnaldo Freitas de Oliveira Júnior  
Presidente da Banca – Orientador / CEFET – MG

Assinado por:

*Júlio Henrique Germano de Souza*

439B504F77CE4C9...

---

Júlio Henrique Germano de Souza  
Instituto Politécnico de Bragança, Portugal

DocuSigned by:

*Anna Carolina Gastmaier Marques*

E7D9C7F8026E468...

---

Anna Carolina Gastmaier Marques  
VALE



## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço a Deus por me sustentar durante todo esse longo caminho da faculdade, sem Ele nada disso seria possível.

Agradeço a minha esposa e minha família por todo apoio, por todas as conversas e orientações, vocês são minha base.

Agradeço meus amigos de caminhada acadêmica, juntos superamos muitas coisas, sucesso a todos!

E por último, e não menos importante, agradeço ao meu professor orientador, Arnaldo, pela paciência, disponibilidade e correções.

Obrigado a todos!

## **Resumo**

Este trabalho analisa estratégias e tecnologias para a descarbonização da cadeia produtiva da pelota de minério de ferro, etapa crítica na indústria siderúrgica devido à sua alta intensidade de emissões de CO<sub>2</sub>. A pesquisa combina revisão bibliográfica e estudos de caso de empresas líderes do setor, como Vale, CSN Mineração, Usiminas, ArcelorMittal e J&F Mineração. Foram identificadas as principais fontes de emissão, concentradas na pelotização, e avaliadas soluções como hidrogênio verde, biomassa, eletrificação de processos e tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS). A análise qualitativa e quantitativa demonstra que não existe uma solução única, mas sim um conjunto de estratégias complementares que variam conforme a posição da empresa na cadeia de valor e sua capacidade de investimento. Conclui-se que a descarbonização da siderurgia depende da convergência entre inovação tecnológica, governança corporativa e políticas públicas, sendo um fator determinante para a competitividade futura do setor.

**Palavras-chave:** descarbonização, pelotização, hidrogênio verde, biomassa, siderurgia sustentável.

## **Abstract**

This study examines strategies and technologies to decarbonize the iron ore pellet production chain, a critical stage in the steel industry due to the high intensity of the CO<sub>2</sub> emissions. The research combines a literature review and case studies of leading companies such as Vale, CSN Mineração, Usiminas, ArcelorMittal, and J&F Mineração. The main emission sources, concentrated in the pelletizing process, were identified, and solutions such as green hydrogen, biomass, process electrification, and carbon capture and storage (CCUS) technologies were evaluated. Qualitative and quantitative analysis shows that there is no single solution but rather a set of complementary strategies that vary according to the company's position in the value chain and its investment capacity. The study concludes that decarbonization in steelmaking depends on the convergence of technological innovation, corporate governance, and public policies, becoming a key factor for the sector's future competitiveness.

**Keywords:** decarbonization, pelletizing, green hydrogen, biomass, sustainable steelmaking.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pelota de minério de ferro.	10
Figura 2: Extração de minério de ferro.	13
Figura 3: Simplificação do processo logístico da cadeia produtiva de minério de ferro.	15
Figura 4: Simplificação do processo logístico do hidrogênio verde.	16
Figura 5: Simplificação da captura e armazenamento de carbono.	18
Figura 6: Ciclo da energia através da Biomassa	20
Figura 7: Aplicações do biocarbono	20
Figura 8: Aplicações da eletrificação	22
Figura 9: Locomotiva 100% elétrica.	23
Figura 10: Forno elétrico a arco.	27
Figura 11: TLCD.	36
Figura 12: Metas de descarbonização da ArcelorMittal.	37
Figura 13: Metas de descarbonização CSN	38
Figura 14: Objetivos do Pilar da Descarbonização da Usiminas.	40
Figura 15: Usina Hidrelétrica (UHE) Quebra-Queixo	46
Figura 16: Caminhão fora de estrada movido a bateria elétrica.	48
Figura 17: Entrepasto de Iracemápolis - SP (Arcelormittal).	50

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Modelo comparativo entre as empresas do estudo.	30
Quadro 2: Análise das tecnologias de descarbonização	55
Quadro 3: Metas Quantitativas de Redução de Emissões de GEE	57
Quadro 4: Resumo das Análises comparativas	60

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
3.1 Cadeia Produtiva da Pelota de Minério de Ferro e Suas Emissões de Carbono.....	15
3.2 Tecnologias de Descarbonização.....	17
3.2.1 Hidrogênio Verde (H <sub>2</sub> V).....	17
3.2.2 Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS).....	19
3.2.3 Uso de Biomassa e Biocombustíveis.....	20
3.2.4 Eletrificação de Processos.....	22
3.3 Iniciativas e Estudos de Caso.....	24
3.3.1 Estratégias das Mineradoras Brasileiras.....	24
3.3.2 HYBRIT.....	28
3.3.3 H2 Green Steel (Stegra).....	30
3.4 Desafios e oportunidades na descarbonização da cadeia da pelota.....	30
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
4.1 Delineamento da Pesquisa.....	32
4.3 Coleta de Dados.....	32
4.3.1 Dados Secundários.....	32
4.3.2 Estudos de Caso.....	32
4.4 Análise de Dados.....	32
4.4.1 Análise Qualitativa.....	32
4.4.2 Critérios de análises de tecnologias de descarbonização.....	33
4.4.3 Análise Quantitativa.....	33
<b>5 RESULTADO E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
5.1 Mapeamento das fontes de emissão de CO <sub>2</sub> na cadeia produtiva da pelota.....	34
5.2 Estratégias na Descarbonização da Mineração e Siderurgia.....	37
5.2.1 Metas estabelecidas.....	39
5.2.2 Gestão Interna.....	43
5.2.3 Estratégias.....	44
5.2.4 Tecnologias em utilização.....	48
5.2.5 Tecnologias Emergentes.....	54
5.3 Análise Comparativa das Tecnologias e Práticas de Descarbonização.....	55
5.3.1. Análise Qualitativa.....	55
5.3.2 Critérios de Análise de Tecnologias de Descarbonização.....	57
5.3.3 Análise Quantitativa.....	59
5.3.4 Avaliação das Emissões de CO <sub>2</sub> e Metas de Redução.....	60

5.3.5 Avaliação de Custos e Benefícios.....	61
5.3.6 Análise de Impactos Econômicos e Ambientais.....	62
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A descarbonização das cadeias produtivas globais representa um dos desafios mais urgentes no contexto das mudanças climáticas e da busca por um desenvolvimento sustentável. Segundo a *International Energy Agency (IEA)*, dentre os setores industriais, a siderurgia se destaca como um ponto crítico, sendo responsável por aproximadamente 7% das emissões globais diretas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Diante dessa realidade, a indústria enfrenta a dupla pressão de reduzir drasticamente seu impacto ambiental enquanto precisa manter a eficiência operacional e a competitividade no mercado global, tornando a inovação tecnológica um pilar indispensável para sua sobrevivência e relevância futura.

Nesse cenário, a descarbonização da pelota de minério de ferro (figura 1), um insumo essencial para a produção de aço em altos-fornos, emerge como uma estratégia de alto impacto. O processo de pelletização é tradicionalmente intensivo em energia e dependente de combustíveis fósseis, consolidando-se como uma das principais fontes de emissões em toda a cadeia de valor do aço. Portanto, focar na transformação desta etapa inicial é crucial para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na origem e promover práticas mais sustentáveis em todo o ciclo produtivo.

Figura 1: Pelota de minério de ferro.



Fonte: Metso, 2025.

Em resposta a este desafio, diversas frentes tecnológicas estão sendo exploradas, com destaque para o uso de hidrogênio verde, biocombustíveis e a captura e armazenamento de carbono (CCS). Um exemplo de vanguarda é a iniciativa da Vale, uma das maiores produtoras



de minério de ferro do mundo, que, em parceria com a empresa sueca GreenIron, estuda a viabilidade da redução direta do minério de ferro utilizando hidrogênio verde. Esta tecnologia promete revolucionar o processo ao gerar apenas água ( $H_2O$ ) como subproduto, eliminando resíduos poluentes. Embora enfrente barreiras como elevado custos de implementação e o controle técnico da umidade, a colaboração sinaliza um movimento estratégico da indústria em direção a uma produção com baixa pegada de carbono.

Contudo, o avanço rumo à descarbonização efetiva encontra um obstáculo metodológico crucial: a falta de bases sólidas para a contabilização do carbono, especialmente no que tange às emissões de Escopo 3, que abrangem toda a cadeia de valor indireta. Conforme aponta a McKinsey & Company (2023), muitas empresas enfrentam dificuldades para obter dados precisos e padronizados de seus fornecedores e clientes, o que compromete a definição de metas realistas e o monitoramento de resultados. Essa lacuna na mensuração não é apenas uma falha contábil; ela limita a colaboração entre parceiros, dificulta a identificação dos reais focos de emissão e, conseqüentemente, retarda o avanço concreto na redução das emissões.

A superação desse desafio é fundamental para que o setor siderúrgico possa cumprir as metas estabelecidas em acordos internacionais, como o Acordo de Paris, e atender às crescentes demandas de mercado por produtos com rastreabilidade sustentável. Portanto, este trabalho tem como objetivo analisar as principais estratégias e tecnologias de descarbonização na cadeia produtiva da pelota de minério de ferro, com foco especial nos desafios e oportunidades relacionados à mensuração e gestão das emissões de carbono. Por meio de uma revisão bibliográfica e estudos de caso, pretende-se fornecer uma visão abrangente sobre as práticas atuais e futuras, contribuindo para o avanço do conhecimento e para a promoção de uma produção de minério de ferro mais sustentável.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Identificar as estratégias e tecnologias de descarbonização na cadeia produtiva da pelota de minério de ferro, com foco na redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e na promoção de práticas sustentáveis na indústria siderúrgica.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar as principais fontes de emissões de CO<sub>2</sub> na cadeia produtiva da pelota de minério de ferro.
- Identificar as tecnologias e práticas de descarbonização atualmente utilizadas no setor da siderurgia.
- Realizar um estudo comparativo entre empresas ou países que adotam práticas sustentáveis na produção de pelotas de minério de ferro.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

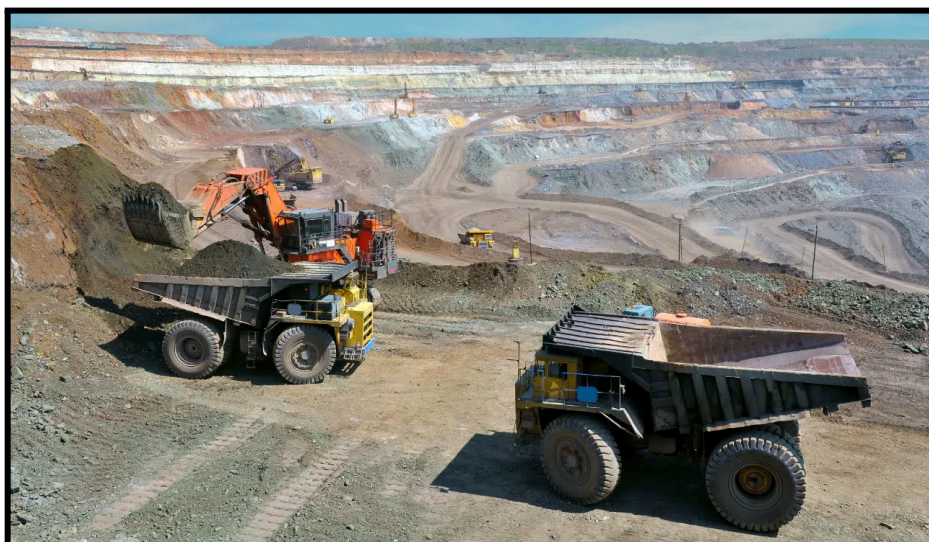
A revisão da literatura foi realizada para identificar e analisar as principais tecnologias e práticas de descarbonização na cadeia produtiva da pelota de minério de ferro. Foram consultados fontes acadêmicas, artigos científicos, relatórios técnicos e publicações de empresas do setor siderúrgico. As bases de dados utilizadas incluíram Google Scholar, Scopus, Web of Science e periódicos específicos da área de engenharia e sustentabilidade. Estudos como o de Findorák et al. (2025) sobre a redução de pelotas de óxido de minério de ferro com hidrogênio e o trabalho de Singh et al. (2023) sobre a cinética de redução de pelotas de minério de ferro-carbono serão fundamentais para embasar esta pesquisa.

#### 3.1 Cadeia Produtiva da Pelota de Minério de Ferro e Suas Emissões de Carbono

A cadeia produtiva da pelota de minério de ferro é composta por diversas etapas que, em conjunto, contribuem para as emissões de gases de efeito estufa da indústria siderúrgica. Desde a extração até a pelotização, cada fase apresenta fontes específicas de emissão que precisam ser compreendidas para uma mitigação eficaz.

A extração do minério (figura 2), geralmente a céu aberto, inicia o ciclo de emissões com o uso intensivo de equipamentos pesados movidos a diesel. A eficiência energética nesta etapa está diretamente ligada à fragmentação das rochas, em que um maior controle relacionado à eficiência de equipamentos pesados pode reduzir o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões (KOJOVIC, 2005).

Figura 2: Extração de minério de ferro.



Fonte: Mineração Brasil, 2025.

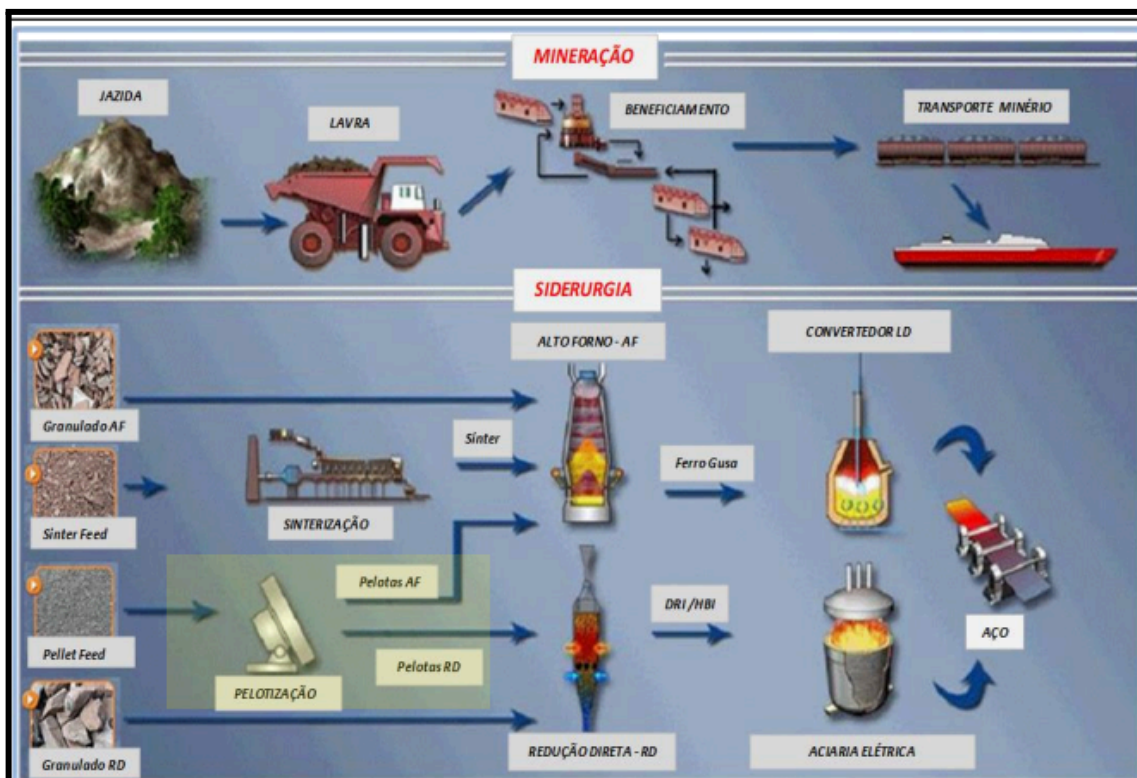
Em seguida, na fase de beneficiamento, que inclui britagem e moagem, o consumo de energia elétrica é o principal fator. Processos de cominuição são notoriamente intensivos, e a eficiência energética é influenciada por variáveis como as propriedades do minério e a otimização da carga dos moinhos (MORRELL, 2009).

A etapa de pelletização, contudo, é a mais intensiva em carbono, podendo responder por uma parcela significativa das emissões totais no processamento do minério. Tradicionalmente, os fornos de endurecimento das pelotas operam com a queima de combustíveis fósseis, como carvão ou gás natural, gerando grandes volumes de CO<sub>2</sub>. As condições de queima, como temperatura e atmosfera do forno, não apenas definem a qualidade metalúrgica das pelotas, mas também a magnitude das emissões geradas (UMAMAHESHWARAN et al., 2005). É nesta etapa que alternativas como o uso de hidrogênio verde são propostas para reavaliar o balanço energético e reduzir drasticamente a pegada de carbono do processo (FAN e LI, 2021).

A cadeia logística, que abrange o transporte do minério das minas aos portos e destes para os centros consumidores por ferrovias e navios, representa outra fonte relevante de emissões, majoritariamente pelo uso de combustíveis fósseis. A otimização de rotas e a transição para combustíveis de baixa emissão são estratégias-chave para a descarbonização desta etapa (WORLD ECONOMIC FORUM, 2021).

Portanto, a descarbonização da cadeia produtiva da pelota de minério de ferro exige uma abordagem integrada, que envolve desde melhorias na eficiência energética da extração e do beneficiamento até a substituição de combustíveis fósseis nos fornos de pelletização e a otimização da logística, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Simplificação do processo logístico da cadeia produtiva de minério de ferro.



Fonte: J.M. Mourão et alli.

### 3.2 Tecnologias de Descarbonização

Diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas e implementadas para reduzir as emissões de GEE na siderurgia, abrangendo desde a substituição de combustíveis fósseis até a captura do carbono gerado. Entre as mais relevantes, destacam-se o uso de hidrogênio verde ( $H_2V$ ), a tecnologia de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) e a substituição por biomassa.

#### 3.2.1 Hidrogênio Verde ( $H_2V$ )

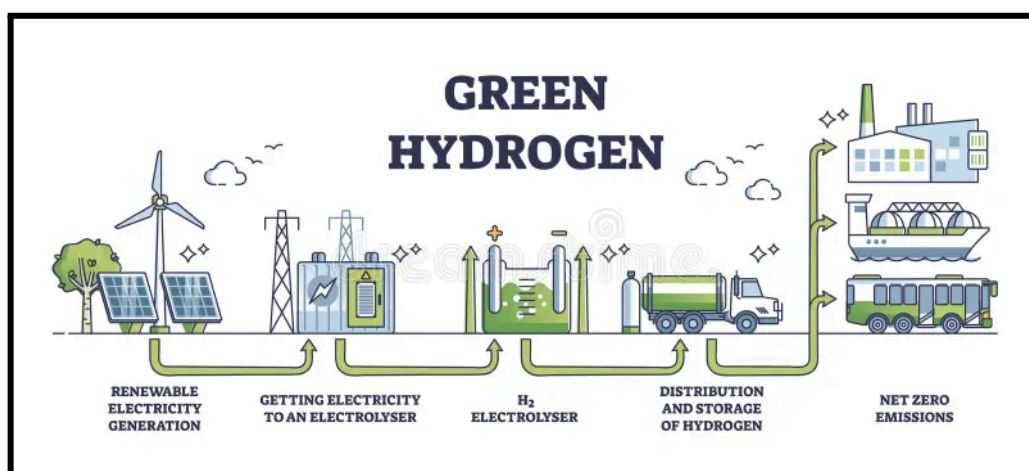
O hidrogênio verde tem se destacado como uma das soluções mais promissoras para a descarbonização profunda da siderurgia. Sua principal vantagem reside na capacidade de atuar como um agente redutor e energético, substituindo completamente os combustíveis fósseis no processo primário de produção de aço e gerando apenas água como subproduto (BAMBACH et al., 2022).

O hidrogênio ( $H_2$ ) não é uma fonte de energia primária, mas um vetor energético, pois precisa ser produzido a partir de outras fontes. O hidrogênio verde ( $H_2V$ ) é produzido pelo processo de eletrólise da água, que utiliza eletricidade de fontes 100% renováveis (eólica, solar, hidrelétrica) para separar a molécula de água ( $H_2O$ ) em hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ), sem emissão de gases de efeito estufa (IRENA, 2022).

Segundo o trabalho de Metolina (2024), no setor de pelletização e produção de aço, a tecnologia de Redução Direta utilizando hidrogênio (H-DR) tem se destacado como alternativa para reduzir as emissões de carbono. Nesse método, o hidrogênio assume o papel de agente redutor, substituindo o carvão-coque, e reage com os óxidos de ferro presentes nas pelotas, removendo o oxigênio e formando ferro metálico (ferro-esponja). Em seguida, esse ferro é processado em forno elétrico a arco, preferencialmente alimentado por fontes renováveis, para a fabricação do aço. A grande vantagem desse processo é que a reação principal ( $Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O$ ) gera apenas vapor d'água, eliminando a emissão de  $CO_2$  na etapa primária.

A viabilidade do hidrogênio verde na siderurgia já foi comprovada em escala piloto. O projeto HYBRIT, na Suécia, é a principal referência global, tendo produzido o primeiro aço sem a utilização de combustíveis fósseis do mundo em 2021. Além dele, outras grandes siderúrgicas estão investindo massivamente em projetos de P&D, como a Thyssenkrupp na Alemanha com seu projeto "tkH2Steel" e a ArcelorMittal, que está desenvolvendo plantas de hidrogênio verde na Espanha e no Canadá.

Figura 4: Simplificação do processo logístico do hidrogênio verde.



Fonte: Dreamstime, 2025.

### 3.2.2 *Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)*

A tecnologia de CCUS apresenta-se como uma rota de descarbonização para plantas siderúrgicas já existentes, permitindo a continuidade do uso de combustíveis fósseis em um primeiro momento. O processo consiste em capturar o CO<sub>2</sub> emitido nos gases de exaustão dos fornos, para então transportá-lo e armazená-lo em formações geológicas profundas ou utilizá-lo na produção de outros químicos e combustíveis (IEA, 2020). Embora tecnologias de captura possam remover mais de 90% do CO<sub>2</sub> de uma fonte pontual, os desafios residem no alto custo de capital, no consumo energético do próprio processo de captura e na necessidade de garantir a segurança e permanência do armazenamento geológico a longo prazo.

A Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) é considerada uma tecnologia estratégica para a descarbonização de setores industriais com emissões de processo inevitáveis, como a siderurgia. A tecnologia consiste em capturar o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) diretamente da fonte emissora, como os fornos de pelotização, evitando sua liberação na atmosfera (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023). No contexto da produção de pelotas, a rota tecnológica mais aplicável é a captura pós-combustão, onde o CO<sub>2</sub> é separado dos gases de exaustão do forno por meio de solventes químicos.

Uma vez capturado e purificado, o CO<sub>2</sub> é comprimido para transporte, que pode ser feito por dutos ou navios. O destino final pode ser o armazenamento (S) ou a utilização (U). No armazenamento, o gás é injetado em formações geológicas profundas e seguras, como aquíferos salinos, para isolamento permanente (IEA, 2022). Já na utilização, o CO<sub>2</sub> se torna uma matéria-prima para a produção de concreto, combustíveis sintéticos, plásticos ou outros produtos químicos, criando um modelo de economia circular que pode agregar valor econômico ao processo.

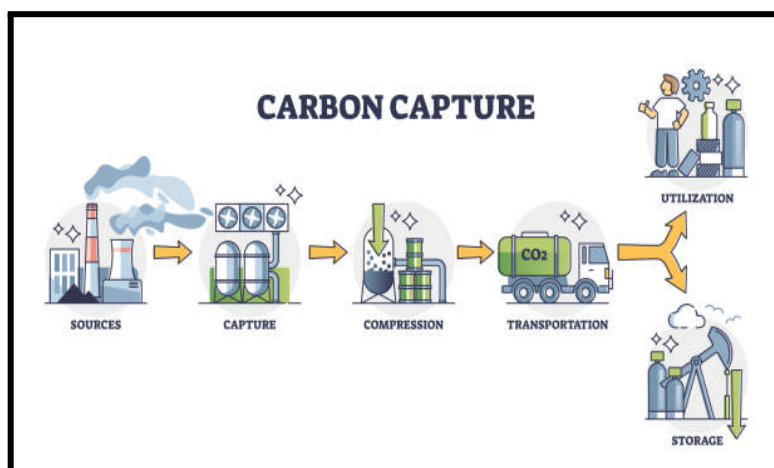
Apesar de seu potencial, a implementação do CCUS na indústria de pelotização enfrenta barreiras significativas. Os principais desafios são o alto custo de capital para a construção das plantas de captura e a energia adicional necessária para operá-las, o que pode aumentar o custo operacional da produção de pelotas. Além disso, a viabilidade de um projeto depende da existência de uma infraestrutura de transporte e de locais de armazenamento geologicamente adequados nas proximidades da planta industrial (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023).

Para superar esses obstáculos e acelerar a adoção da tecnologia, são necessários políticas públicas robustas e incentivos financeiros, alinhados aos compromissos globais como o

Acordo de Paris (BRASIL, 2017). O avanço do CCUS é visto como essencial para cumprir as metas de neutralidade de carbono até meados do século, especialmente em indústrias onde a descarbonização completa por outras rotas, como a eletrificação, ainda não é tecnicamente ou economicamente viável (IEA, 2022).

O número de projetos de CCUS em escala comercial está crescendo globalmente. Na Europa, o projeto Northern Lights, na Noruega, é um marco, desenvolvendo a primeira infraestrutura de transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub> de acesso aberto do mundo para descarbonizar diversas indústrias. No setor de aço, a ArcelorMittal, em sua planta em Dunquerque, na França, está desenvolvendo um dos maiores projetos de CCUS da indústria, com o objetivo de capturar CO<sub>2</sub> de seu alto-forno. Esses projetos demonstram que, apesar dos desafios, o CCUS é uma ferramenta indispensável no portfólio de soluções para a descarbonização industrial.

Figura 5: Simplificação da captura e armazenamento de carbono.



Fonte: iStock, 2025.

### 3.2.3 *Uso de Biomassa e Biocombustíveis*

O uso de biomassa e seus derivados, como o biocarbono, representa uma das rotas de descarbonização mais diretas e de alta maturidade tecnológica para a indústria siderúrgica. Diferente de outras fontes renováveis, a biomassa fornece um carbono de origem renovável, essencial para os processos metalúrgicos que dependem de um agente redutor sólido. Esta característica, aliada à vocação do Brasil no agronegócio e na silvicultura, posiciona esta tecnologia como uma alternativa estratégica para o contexto nacional.



O princípio da descarbonização via biomassa baseia-se no ciclo do carbono. As plantas, durante seu crescimento via fotossíntese, capturam CO<sub>2</sub> da atmosfera. Ao utilizar essa biomassa para fins energéticos, o mesmo CO<sub>2</sub> é liberado, resultando em um ciclo neutro em emissões, contanto que a biomassa seja de origem sustentável e seu volume consumido não exceda a capacidade de regeneração (SANTOS et al., 2021). Contudo, a biomassa *in natura* possui baixa densidade energética e alta umidade, sendo inadequada para fornos de alta performance. Para contornar isso, ela passa por um processo de pirólise (ou carbonização), que consiste no seu aquecimento em um ambiente com baixo teor de oxigênio. Este processo remove a água e compostos voláteis, resultando no biocarbono (também conhecido como carvão vegetal), um material sólido, denso em energia e com propriedades físico-químicas muito mais próximas às do carvão mineral.

Na cadeia do minério de ferro, o biocarbono atua como um substituto direto (*drop-in replacement*) para o carvão antracito nos fornos de pelotização. Ele fornece tanto a energia térmica necessária para o endurecimento das pelotas quanto o carbono que atua como agente redutor. O Brasil possui uma vantagem competitiva única nesta área, pois já detém a tecnologia de produção de aço via alto-forno a carvão vegetal em larga escala, principalmente em Minas Gerais. Essa expertise e a cadeia produtiva já existente podem ser adaptadas e expandidas para suprir a demanda das usinas de pelotização (VALE S.A., 2021).

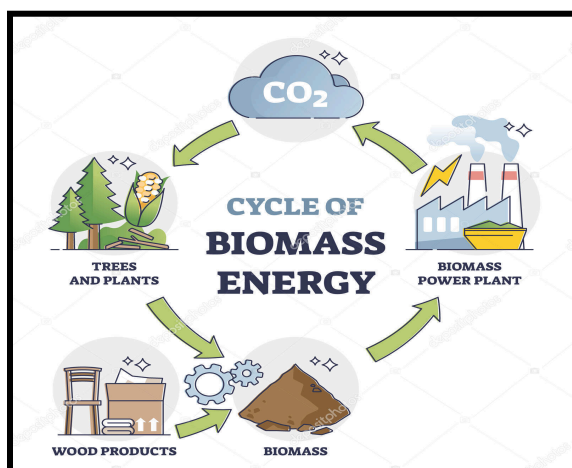
Neste campo, a Vale tem se posicionado como pioneira. Conforme anunciado pela empresa, testes industriais realizados na sua planta de pelotização de Vargem Grande, em Minas Gerais, alcançaram a substituição de 100% do carvão antracito por biocarbono, mantendo a qualidade comercial das pelotas (VALE S.A., 2021). O avanço é um marco para a descarbonização do setor, visto que o antracito é um dos principais responsáveis pelas emissões de CO<sub>2</sub> na pelotização, uma das etapas mais intensivas em carbono da cadeia do minério de ferro.

Segundo a mineradora, a adoção do biocarbono em suas operações tem o potencial de reduzir significativamente as emissões de Escopo 1. A empresa anunciou um plano de investimentos entre US\$ 4 bilhões e US\$ 6 bilhões com o objetivo de reduzir suas emissões diretas e indiretas (Escopos 1 e 2) em 33% até 2030 e atingir a neutralidade de carbono até 2050, em linha com os objetivos do Acordo de Paris (VALE S.A., 2022).

Apesar dos avanços, a implementação em larga escala ainda enfrenta desafios, como a necessidade de ampliar a infraestrutura de produção e logística da biomassa (Figura 4). É

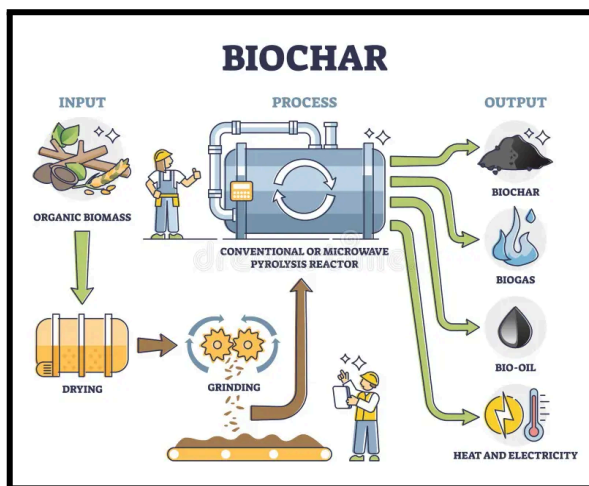
fundamental garantir a sustentabilidade de toda a cadeia de suprimentos, assegurando que o cultivo da biomassa não gere desmatamento ou impactos socioambientais negativos (SANTOS et al., 2021). A superação dessas barreiras será essencial para consolidar o biocarbono (Figura 5) como uma solução viável e sustentável para a indústria do aço.

Figura 6: Ciclo da energia através da Biomassa



Fonte: Depositphotos, 2025.

Figura 7: Aplicações do biocarbono



Fonte: Dreamstime, 2025.

### 3.2.4 Eletrificação de Processos

A eletrificação de processos industriais, que consiste na substituição de equipamentos movidos a combustíveis fósseis por sistemas elétricos alimentados por fontes renováveis, é uma estratégia central na transição para uma economia de baixo carbono (IEA, 2021). Na cadeia produtiva do minério de ferro, essa abordagem pode ser aplicada de duas formas

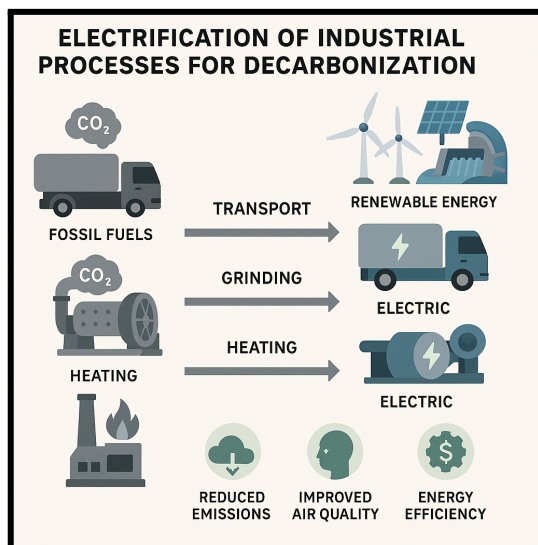
distintas: na eletrificação de equipamentos auxiliares e na eletrificação do processo térmico principal.

Na primeira frente, que abrange principalmente equipamentos de mineração e logística, os avanços já são concretos. Motores elétricos apresentam maior eficiência energética e menor custo de manutenção em comparação com motores a combustão, além de eliminarem as emissões locais de poluentes (IRENA, 2023). A Vale, por exemplo, tem investido na eletrificação de sua frota, com a aquisição de caminhões elétricos de grande porte e o desenvolvimento da primeira locomotiva 100% a bateria para suas ferrovias, visando reduzir as emissões de Escopo 1 em suas operações (VALE S.A., 2022).

A segunda frente, mais desafiadora e de maior impacto, é a eletrificação direta dos fornos de pelotização, que tradicionalmente utilizam a queima de carvão e gás. Esta é uma fronteira tecnológica que envolve o desenvolvimento de fornos elétricos capazes de atingir as altas temperaturas necessárias para o endurecimento das pelotas, utilizando tecnologias como aquecimento por plasma ou micro-ondas. Embora represente um alto custo de investimento e demande uma oferta massiva de energia renovável, a eletrificação direta dos fornos eliminaria a principal fonte de emissões de GEE do processo de pelotização (IEA, 2021).

Na prática, a indústria mineral já avança significativamente na eletrificação de frotas e equipamentos de mina. Esta é vista como uma solução com benefícios duplos: além de reduzir as emissões de GEE (Escopo 1), elimina a emissão de poluentes locais (material particulado, NOx), melhorando a qualidade do ar e a saúde ocupacional. Já a eletrificação dos fornos de pelotização ainda está em estágio de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D). O sucesso dessa rota transformaria completamente a pegada de carbono da produção de pelotas, mas sua viabilidade em escala industrial ainda não foi comprovada.

Figura 8: Aplicações da eletrificação



Fonte: Autoria própria, 2025.

### 3.3 Iniciativas e Estudos de Caso

#### 3.3.1 Estratégias das Mineradoras Brasileiras

A indústria mineral brasileira tem se mobilizado para a agenda de descarbonização, com as principais empresas do setor estabelecendo metas e implementando projetos concretos. As estratégias, em geral, combinam otimização de processos existentes com a incorporação gradual de novas tecnologias.

A Vale S.A., como uma das maiores mineradoras do mundo, tem adotado uma postura de liderança na agenda de descarbonização, refletida em metas ambiciosas e um portfólio de investimentos robusto. A empresa comprometeu-se publicamente a reduzir suas emissões absolutas de Escopos 1 e 2 em 33% até 2030 (tendo 2018 como base) e a atingir a neutralidade de carbono até 2050. Para suportar esta jornada, foi anunciado um investimento dedicado de US\$ 4 a US\$ 6 bilhões. A estratégia da Vale é notavelmente abrangente, atuando em três pilares tecnológicos principais para atacar suas maiores fontes de emissão: biocarbono, eletrificação e hidrogênio verde (VALE S.A., 2024).

O primeiro pilar, focado no uso de biocarbono, ataca diretamente as emissões do processo de pelotização. A empresa desenvolveu, por meio de sua subsidiária TecnoRed, uma tecnologia que permite a produção de um biocarbono a partir de biomassa, como eucalipto, que pode

substituir o carvão antracito. O marco desta iniciativa foi a conclusão bem-sucedida de testes em escala industrial na planta de Vargem Grande (MG), onde se alcançou a substituição de 100% do combustível fóssil no forno de pelotização sem comprometer a qualidade final do produto. Este avanço é crucial, pois oferece uma solução de curto a médio prazo, com tecnologia de alta maturidade e alinhada à vocação do Brasil em biomassa (VALE S.A., 2021).

O segundo pilar é a eletrificação de equipamentos de mina e ferrovia, visando mitigar as emissões provenientes do consumo de diesel (Escopo 1). A Vale tem implementado projetos-piloto para substituir sua frota de caminhões de mina por veículos elétricos a bateria de 77 toneladas. O projeto de maior destaque, no entanto, é a introdução da primeira locomotiva 100% elétrica da indústria ferroviária brasileira (figura 9), desenvolvida em parceria com a Wabtec e operando na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). Além da óbvia redução de GEE, a eletrificação gera benefícios de eficiência energética e reduz os custos operacionais com combustíveis e manutenção (VALE S.A., 2022).

Figura 9: Locomotiva 100% elétrica.



Fonte: Estado de minas, 2025.

O terceiro pilar, de caráter mais futurista, é a aposta no hidrogênio verde. A estratégia da Vale é dupla: internacionalmente, a empresa firmou parceria com a sueca *GreenIron* para estudar a viabilidade de usar hidrogênio para a redução direta de minério de ferro. Nacionalmente, a Vale estuda o desenvolvimento de "Mega Hubs" de hidrogênio verde e produtos de baixo carbono em seus complexos portuários, como o de Tubarão (ES), para futuramente oferecer aos seus clientes da siderurgia uma matéria-prima já descarbonizada.

Além de suas emissões diretas, a Vale também foi pioneira ao estabelecer uma meta para suas emissões de Escopo 3, que são as emissões da sua cadeia de valor, principalmente de seus clientes siderúrgicos. A empresa visa reduzir estas emissões em 15% até 2035, engajando-se com clientes para desenvolver soluções conjuntas e oferecendo produtos de maior qualidade que demandam menos energia no processo de fabricação do aço. Essa abordagem integrada, que combina soluções de curto prazo (biocarbono, eletrificação) com apostas de longo prazo (hidrogênio) e abrange todos os escopos de emissão, consolida a Vale como um estudo de caso central para a descarbonização do setor mineral.

A Mineração Usiminas, uma das principais empresas na extração de minério de ferro em Minas Gerais, formalizou seu compromisso com a agenda climática através de um Plano de Descarbonização. A seriedade da iniciativa é evidenciada pelo significativo aporte de capital destinado a projetos de sustentabilidade. Conforme seu Relatório de Sustentabilidade, a empresa investiu R\$ 2,5 bilhões entre 2019 e 2023 especificamente em melhorias ambientais, um sinal claro do alinhamento estratégico da companhia com a transição para uma economia de baixo carbono (MINERAÇÃO USIMINAS, 2023).

A estratégia tecnológica da Mineração Usiminas concentra-se em duas das rotas de maior maturidade e aplicabilidade no contexto brasileiro: o uso de biocarbono e a eletrificação de processos industriais. A empresa tem avançado nos estudos para substituir o carvão mineral por biocarbono de fontes renováveis, buscando não apenas reduzir sua pegada de carbono, mas também aproveitar as sinergias com as cadeias produtivas de biomassa locais. Em paralelo, a eletrificação é vista como um caminho para aumentar a eficiência energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis em suas operações fixas, como sistemas de bombeamento, britagem e transporte de correia.

Além das frentes de descarbonização, o plano da empresa engloba uma abordagem abrangente de gestão ambiental. Os investimentos reportados também foram direcionados para a modernização de equipamentos visando maior eficiência energética, para sistemas de controle de emissões atmosféricas e para projetos de economia circular, como o reaproveitamento de resíduos da mineração. Essa visão integrada demonstra que a estratégia da Usiminas não se limita a metas de CO<sub>2</sub>, mas busca uma melhoria contínua de sua performance ambiental geral.

Em síntese, o caso da Mineração Usiminas ilustra uma abordagem pragmática e focada no investimento direto para a modernização de seu parque industrial. Diferente de uma estratégia

de P&D em tecnologias de fronteira, a empresa parece direcionar seus esforços para a implementação de soluções comprovadas (biocarbono e eletrificação) que oferecem um caminho claro para a redução de emissões em suas operações existentes, respaldada por um forte compromisso financeiro.

A CSN Mineração, uma das maiores exportadoras de minério de ferro do Brasil, adota uma abordagem de descarbonização fortemente ancorada na maximização da eficiência operacional e na otimização de seus processos existentes. A estratégia da empresa, conforme detalhada em seu Relatório de Sustentabilidade, prioriza a construção de uma base sólida de gestão ambiental e ganhos de produtividade como o caminho mais pragmático para a redução de sua pegada de carbono (CSN MINERAÇÃO, 2023).

O foco principal da companhia está na implementação de projetos de eficiência energética em suas unidades de beneficiamento de minério. Isso inclui a modernização de equipamentos, a otimização de circuitos de moagem para reduzir o consumo de kWh por tonelada processada e a melhoria dos processos de recuperação de água, visando um ciclo mais fechado e com menor demanda energética. A gestão logística, especialmente em seu terminal portuário (TECAR) e na participação na malha ferroviária MRS, também é um ponto central, com iniciativas para otimizar o transporte e reduzir o consumo de diesel.

Em relação à sua matriz energética, a CSN Mineração tem buscado ativamente a transição para fontes mais limpas, principalmente para reduzir suas emissões de Escopo 2. A empresa tem investido na aquisição de energia elétrica de fontes renováveis certificadas, muitas vezes por meio de contratos de compra de longo prazo (PPAs - Power Purchase Agreements). Essa estratégia garante o abastecimento com energia de baixo carbono para suas operações, ao mesmo tempo em que estimula o desenvolvimento de novos projetos de geração eólica e solar no país.

A J&F Mineração, um player relevante no Corumbá, Mato Grosso do Sul, estrutura sua jornada de descarbonização com um forte foco na transição de sua matriz energética e no uso eficiente de recursos naturais. A estratégia da empresa, conforme seu relatório, é exploratória e sinérgica, buscando capitalizar o vasto potencial do Brasil em energias renováveis, especialmente a biomassa (J&F MINERAÇÃO, 2023).

O pilar central do plano de descarbonização da J&F é a exploração do biocarbono como substituto para os combustíveis fósseis. A empresa reporta estar em fase de estudo de

viabilidade técnica e econômica para a utilização de biomassa, avaliando diferentes matérias-primas e rotas tecnológicas. A abordagem parece capitalizar as sinergias com outras operações do grupo J&F, que tem forte presença no agronegócio, o que pode facilitar o acesso a resíduos agrícolas e florestais para a produção de biocarbono. O objetivo de longo prazo é diversificar a matriz energética de suas operações, reduzindo a exposição à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, diminuindo sua pegada de carbono.

Em resumo, a estratégia da J&F Mineração pode ser caracterizada como exploratória e de posicionamento estratégico. O foco da empresa no momento não está na implementação de projetos de capital intensivo já em larga escala, mas sim em construir o caso de negócio e a base técnica para uma futura transição energética baseada na biomassa.

### 3.3.2 *HYBRIT*

O projeto HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) é a iniciativa mais avançada e emblemática do mundo na produção de aço livre de combustíveis fósseis. Lançado em 2016, o projeto é uma joint venture entre três gigantes suecos: a siderúrgica SSAB, a mineradora LKAB e a companhia de energia Vattenfall. A visão do consórcio é revolucionária: criar a primeira cadeia de valor completamente livre de fósseis, desde a mina até o produto final, substituindo o carvão-coque, um insumo essencial na siderurgia tradicional, por hidrogênio verde (SSAB, 2024).

O sucesso do HYBRIT reside em seu modelo de parceria estratégica, que integra toda a cadeia de valor. A LKAB é responsável por fornecer o minério de ferro de alta qualidade na forma de pelotas. A Vattenfall, uma das maiores produtoras de energia livre de fósseis da Europa (hidrelétrica e eólica), lidera o desenvolvimento da produção de hidrogênio verde em escala industrial. Por fim, a SSAB utiliza sua expertise para desenvolver e otimizar o processo de redução direta com hidrogênio (DRI) e a subsequente fusão do ferro-esponja em um forno a arco elétrico, também alimentado por energia limpa. Essa colaboração verticalizada é fundamental para superar os desafios sistêmicos da descarbonização.



Figura 10: Forno elétrico a arco.



Fonte: EastCarb, 2021.

O projeto já atingiu marcos tecnológicos cruciais. Em 2021, a planta piloto de HYBRIT em Luleå, na Suécia, produziu com sucesso o primeiro ferro-esponja do mundo utilizando hidrogênio 100% verde. O cronograma prevê agora a construção de uma planta de demonstração em Gällivare, com início de operação em 2026. A ambição é tão grande que, quando totalmente implementada, a tecnologia HYBRIT tem o potencial de reduzir as emissões totais de CO<sub>2</sub> da Suécia em aproximadamente 10%, demonstrando o impacto transformador da iniciativa para a economia de um país inteiro.

O HYBRIT não é apenas um projeto de P&D; ele já possui validação comercial. A SSAB já produz e entrega lotes de seu "SSAB Fossil-free™ steel" para clientes estratégicos. O Grupo Volvo foi o primeiro a receber o material, utilizando-o para a fabricação de veículos, o que comprova a existência de uma forte demanda de mercado por produtos "verdes" e a disposição de grandes marcas em incorporar materiais de baixo carbono em suas cadeias de suprimentos. Isso cria um ciclo virtuoso, em que a demanda do mercado ajuda a justificar os altos investimentos na nova tecnologia, acelerando a transição. O projeto HYBRIT, portanto, serve como o principal paradigma global, provando a viabilidade técnica, o modelo de negócio e o impacto mercadológico da rota do hidrogênio na siderurgia.

### 3.3.3 H2 Green Steel (Stegra)

Seguindo a mesma rota tecnológica do hidrogênio, o projeto H2 Green Steel (H2GS) representa uma abordagem de mercado distinta e igualmente impactante. Em vez de ser uma iniciativa de empresas já estabelecidas, o H2GS nasceu como uma startup (*startup*) com a missão de construir, do zero, uma das primeiras e maiores plantas de aço verde do mundo. O projeto está sendo desenvolvido em Boden, no norte da Suécia, aproveitando o mesmo ecossistema rico em energia renovável, minério de ferro de alta qualidade e conhecimento técnico da região (H2 GREEN STEEL, 2024).

O diferencial do H2GS reside em seu modelo de negócio e operacional, baseado em uma planta *greenfield* totalmente integrada. A estratégia consiste em construir, no mesmo local, um dos maiores eletrolisadores da Europa para a produção de hidrogênio verde, uma planta de Redução Direta (DRI) e uma aciaria com forno a arco elétrico (EAF). Essa integração vertical em um único local foi projetada para maximizar a eficiência energética e logística. O modelo de negócio mostrou-se extremamente bem-sucedido em atrair capital, com a empresa garantindo bilhões de euros em financiamento e, crucialmente, assinando contratos de venda vinculativos (*off-take agreements*) de longo prazo com grandes consumidores de aço, como Mercedes-Benz, BMW, Scania e IKEA, anos antes do início da produção.

As metas do projeto são extremamente ambiciosas. O objetivo é reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em até 95% em comparação com a rota siderúrgica convencional de alto-forno. A tecnologia empregada, a redução direta com hidrogênio, é a mesma do projeto HYBRIT, cuja viabilidade e vantagens termodinâmicas são amplamente suportadas pela literatura científica (SUN et al., 2024). O início da produção da planta de Boden está previsto para o final de 2025 ou início de 2026, com uma capacidade inicial de 2,5 milhões de toneladas de aço verde por ano.

### 3.4 Desafios e oportunidades na descarbonização da cadeia da pelota

A transição para uma produção de pelotas de minério de ferro com baixa emissão de carbono é um processo complexo, que se situa na interseção de barreiras econômicas, tecnológicas e regulatórias, mas que também revela oportunidades estratégicas para a indústria.

O principal desafio para a descarbonização reside nos altos custos de capital (CAPEX) associados à transição. A implementação de tecnologias inovadoras, como a eletrificação de fornos ou a produção de hidrogênio verde em escala, exige investimentos massivos na

substituição de equipamentos e na construção de uma infraestrutura inteiramente nova (IEA, 2021). A viabilidade econômica do hidrogênio, por exemplo, está diretamente atrelada à expansão de eletrolisadores e redes de distribuição, cujo desenvolvimento ainda é incipiente na maioria dos países (SUN et al., 2024).

Paralelamente às barreiras financeiras, existem desafios metodológicos, com destaque para a falta de padronização na contabilização das emissões de Escopo 3. Essas emissões, que ocorrem ao longo de toda a cadeia de valor, são difíceis de mensurar, dificultando a comparação de desempenho entre empresas e a definição de metas corporativas transparentes e críveis. A ausência de uma metodologia unificada compromete a colaboração e a eficácia das estratégias de descarbonização (McKINSEY & COMPANY, 2023).

Apesar dos entraves, a descarbonização gera oportunidades significativas. A crescente pressão de investidores (através de agendas ESG), consumidores e reguladores está transformando a sustentabilidade em um fator de vantagem competitiva. Empresas que lideram a transição energética tendem a atrair mais capital, fortalecer sua reputação de marca e garantir acesso a mercados internacionais com barreiras tarifárias de carbono, como as que vêm sendo discutidas na União Europeia (IRENA, 2023).

A busca por soluções de baixo carbono é um poderoso motor de inovação. Além de mitigar o impacto ambiental, novas tecnologias frequentemente trazem ganhos de eficiência. A eletrificação, por exemplo, não apenas elimina emissões diretas, mas também aproveita a maior eficiência de motores elétricos, reduzindo o consumo total de energia e os custos operacionais a longo prazo. Da mesma forma, a economia circular promovida pelo uso de biocarbono ou pela utilização do CO<sub>2</sub> capturado (CCUS) pode criar novas fontes de receita e cadeias de valor mais resilientes (IEA, 2021).

A superação dos desafios e a maximização das oportunidades não ocorrerão de forma isolada. A colaboração entre o setor privado, governos e a academia é fundamental. A experiência de projetos como os da Suécia demonstra que políticas públicas claras, como a precificação de carbono, incentivos fiscais para tecnologias limpas e investimentos em P&D, são essenciais para criar um ambiente de negócios favorável à transição. É essa sinergia que pode transformar os altos custos de hoje nas oportunidades concretas de amanhã (SUN et al., 2024).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Delineamento da Pesquisa

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e quantitativa, combinando revisão bibliográfica, análise de dados secundários e estudos de caso. A metodologia foi estruturada em 2 etapas principais: coleta e análise de dados e estudo de casos práticos.

### 4.3 Coleta de Dados

#### 4.3.1 *Dados Secundários*

A coleta de dados secundários foi realizada por meio da análise de relatórios de sustentabilidade, publicações corporativas, estudos de caso e bases de dados públicas. Foram investigados metas de redução das emissões de CO<sub>2</sub>, resultados obtidos com tecnologias de descarbonização, custos e benefícios associados, bem como impactos econômicos e ambientais, comparando casos-base e casos com aplicação tecnológica.

#### 4.3.2 *Estudos de Caso*

Foram selecionados 5 estudos de caso das principais empresas mineradoras de minério de ferro atuantes no Brasil que têm se destacado na implementação de tecnologias de descarbonização, como a Vale, a Mineração Usiminas, CSN Mineração, Arcelormittal e a J&F Mineração. A seleção dos casos foi embasada na relevância e na disponibilidade de informações detalhadas sobre as práticas adotadas e os resultados obtidos. A Vale, por exemplo, tem investido em tecnologias de baixo carbono, como o uso de biocarbono na pelotização, que substitui o carvão antracito e reduz significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> (VALE, 2025).

### 4.4 Análise de Dados

#### 4.4.1 *Análise Qualitativa*

A análise qualitativa foi realizada por meio da revisão e interpretação dos dados coletados na revisão da literatura e nos estudos de caso. Foram identificadas as principais tecnologias e práticas de descarbonização, como o hidrogênio verde, a captura e armazenamento de carbono (CCS) e a utilização de biocombustíveis e a eletrificação dos processos industriais (MCKINSEY, 2025). Avaliando sua eficiência na etapa de operação, comparando os resultados obtidos.

#### 4.4.2 Critérios de análises de tecnologias de descarbonização

Inicialmente, os dados serão organizados em categorias temáticas, como:

1. **Tecnologias de descarbonização** (ex.: hidrogênio verde, CCS, biocombustíveis, eletrificação);
2. **Benefícios ambientais e econômicos** (ex.: redução de emissões, eficiência energética, retorno financeiro);
3. **Políticas e incentivos regulatórios.**

Utilizou-se quadros comparativos e matrizes de categorização para facilitar a visualização dos dados e a comparação entre diferentes estudos, conforme modelo abaixo:

Quadro 1: Modelo comparativo entre as empresas do estudo.

<b>Categoria Temática</b>	<b>Tecnologias de Descarbonização</b>	<b>Desafios de Implementação</b>	<b>Benefícios Ambientais e Econômicos (programas implementados)</b>	<b>Políticas e Incentivos Regulatórios</b>
<b>Vale</b>				
<b>ArcelorMittal Brasil</b>				
<b>CSN Mineração</b>				
<b>Usiminas</b>				
<b>J&amp;F Mineração</b>				

Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.4.3 Análise Quantitativa

A avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> foi realizada por meio da análise de inventários de emissões disponibilizados por empresas do setor e bases de dados ambientais, utilizando métricas como toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de pelotas produzidas.

Os custos e benefícios associados foram avaliados por meio de dados financeiros e operacionais disponíveis em estudos de caso e relatórios técnicos, considerando investimentos iniciais, custos operacionais, retorno sobre investimento (ROI).

Por fim, os impactos econômicos e ambientais foram analisados com base em modelos de avaliação multicritério ponderando diferentes quesitos ambientais, como geração de empregos, competitividade industrial, pegada de carbono e contribuição para metas de sustentabilidade corporativa e regulatória.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 Mapeamento das fontes de emissão de CO<sub>2</sub> na cadeia produtiva da pelota

A descarbonização eficaz de qualquer cadeia produtiva complexa exige, como primeiro passo fundamental, um diagnóstico preciso das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE), particularmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Compreender onde e como o CO<sub>2</sub> é gerado permite priorizar investimentos, direcionar o desenvolvimento tecnológico e avaliar o impacto real das estratégias de mitigação.

A jornada do minério de ferro começa na mina, geralmente a céu aberto. As principais fontes de emissão nesta fase estão associadas ao consumo intensivo de combustíveis fósseis, predominantemente diesel, em equipamentos de grande porte, tais como:

- **Perfuração e Desmonte:** Utilização de perfuratrizes e explosivos (embora a emissão direta de CO<sub>2</sub> dos explosivos seja relativamente menor).
- **Carregamento e Transporte:** Uso massivo de escavadeiras hidráulicas, pás-carregadeiras e caminhões fora de estrada para transportar o minério bruto (ROM - Run of Mine) da frente de lavra até a planta de beneficiamento primário. Estes veículos pesados são os maiores consumidores de diesel na etapa de mineração (IEA, 2020).
- **Infraestrutura de Mina:** Equipamentos auxiliares como tratores de esteira, motoniveladoras e geradores de energia a diesel também contribuem.

As emissões associadas ao diesel (combustão em motores) são classificadas como Escopo 1 (**emissões diretas a partir da combustão automotiva**) para a empresa mineradora. A magnitude dessas emissões depende da escala da mina, da distância de transporte interno e da eficiência da frota. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) indicam que a mineração e o transporte inicial podem responder por 5% a 15% da pegada de carbono total do minério de ferro entregue ao porto, dependendo das características da operação (Wyns et al., 2021).

Após a extração, o minério bruto passa por um processo de beneficiamento para aumentar o teor de ferro e adequar sua granulometria. Esta etapa é caracterizada pelo alto consumo de energia elétrica, nas seguintes fases:

- **Britagem e Peneiramento:** Redução do tamanho das rochas maiores em britadores (primários, secundários, terciários).

- **Moagem:** Etapa de maior consumo energético, em que o minério é moído em moinhos de bolas ou barras até atingir a granulometria fina necessária para a concentração. A energia consumida na moagem pode representar mais de 50% de toda a energia usada no beneficiamento (MORRELL, 2009).
- **Concentração:** Separação do minério de ferro dos minerais de ganga, frequentemente utilizando métodos magnéticos (para magnetita) ou de flotação (para hematita), que demandam energia para operar separadores, bombas e agitadores.
- **Filtragem:** Remoção da água da polpa de minério concentrado.

As emissões desta etapa são majoritariamente de Escopo 2 (**emissões indiretas pelo consumo de eletricidade**), e sua magnitude depende crucialmente do fator de emissão da matriz elétrica local.

No Brasil, com uma matriz predominantemente renovável (hidrelétrica, eólica, solar), as emissões de Escopo 2 do beneficiamento tendem a ser significativamente menores do que em países com matrizes baseadas em carvão (como China ou Austrália). No entanto, o consumo absoluto de energia é elevado, tornando a eficiência energética uma alavanca importante de descarbonização (IEA, 2020). Estudos indicam que o beneficiamento mineral é uma das etapas mais intensivas em energia na cadeia produtiva, podendo representar uma parcela significativa da pegada de carbono do concentrado de minério. Essa contribuição varia conforme o tipo de minério, tecnologia empregada e matriz energética utilizada. Relatórios como o Plano Nacional de Mineração 2050 e pesquisas acadêmicas reforçam que processos como moagem e flotação são os principais responsáveis por essas emissões (MME, 2020; UFOP, 2023; Nature, 2020).

A pelotização é o processo de aglomerar o minério de ferro fino (pellet feed) em esferas (pelotas verdes) e submetê-las a um tratamento térmico de alta temperatura (acima de 1200 °C) para endurecimento. Esta etapa é, inequivocamente, a principal fonte de emissões diretas (Escopo 1) na cadeia produtiva da pelota. As emissões se originam de combustão de combustíveis fósseis ou reações químicas:

- **Combustão de Combustíveis Fósseis:** Os fornos de pelotização (geralmente grelha móvel ou forno rotativo) requerem uma grande quantidade de energia térmica.

Tradicionalmente, essa energia é fornecida pela queima de combustíveis fósseis, principalmente:

1. **Carvão Mineral** (Antracito ou Coque): Frequentemente misturado à própria pelota verde ou queimado diretamente nos maçaricos do forno. É a fonte mais intensiva de carbono.
  2. **Gás Natural**: Uma alternativa com menor fator de emissão do que o carvão, mas ainda uma fonte fóssil significativa de CO<sub>2</sub>.
  3. **Óleo Combustível**: Menos comum, mas também utilizado em algumas plantas. A combustão desses fósseis libera volumes massivos de CO<sub>2</sub> diretamente na atmosfera
- **Reações Químicas (Calcinação)**: Dependendo da composição do minério, pode haver a presença de carbonatos (como a calcita, CaCO<sub>3</sub>) que se decompõem em altas temperaturas, liberando CO<sub>2</sub> adicional, conforme a reação:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . Esse processo ocorre tipicamente entre 850 °C e 900 °C e é relevante em minérios ricos em carbonatos, como calcário e dolomita. Embora geralmente menor que as emissões da combustão, essa fonte pode contribuir significativamente para as emissões totais em operações que envolvem calcinação (CAMPOS et al., 2018).

Estudos e relatórios da indústria (IEA, 2020; World Steel Association, 2021) são consistentes em apontar que a etapa de pelletização pode ser responsável por 60% a 80% das emissões totais de Escopo 1 e 2 na produção da pelota (considerando a cadeia desde a mina até o produto final). Essa concentração de emissões justifica o foco das principais estratégias de descarbonização (biocarbono, hidrogênio, CCUS) nesta etapa específica.

Após a produção, as pelotas são transportadas das usinas para os portos e, subsequentemente, para os clientes siderúrgicos ao redor do mundo. Esta etapa também gera emissões significativas, principalmente pelo consumo de diesel e óleo combustível nas seguintes fases:

- **Transporte Ferroviário**: Das plantas de pelletização (geralmente no interior) até os terminais portuários.
- **Transporte Marítimo**: Em navios graneleiros para exportação aos mercados consumidores (principalmente Ásia e Europa).

Estas emissões são geralmente classificadas como Escopo 3 (outras **emissões indiretas**) para a empresa produtora da pelota, pois ocorrem fora de suas instalações e após a venda do produto (ou em serviços contratados). No entanto, elas são parte integral da pegada de



carbono da cadeia de valor do aço. A magnitude dessas emissões é altamente dependente das distâncias percorridas (WORLD ECONOMIC FORUM, 2021).

## 5.2 Estratégias na Descarbonização da Mineração e Siderurgia

A transição para uma economia de baixo carbono representa o desafio estrutural mais urgente do século XXI. Os setores de mineração e siderurgia, embora fundamentais para a infraestrutura moderna e para a própria transição energética, fornecendo os materiais básicos para tecnologias como turbinas eólicas e painéis solares, encontram-se sob intensa pressão. Sendo classificadas como indústrias *hard-to-abate* (setores da economia que enfrentam grandes desafios técnicos e econômicos para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE)), estas operações são responsáveis por uma parcela globalmente significativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE), colocando-as no centro do debate climático e sob a análise de investidores, reguladores e da sociedade civil.

Diante deste contexto, esta pesquisa utiliza como fonte primária de dados os relatórios anuais e de sustentabilidade mais recentes (ciclo 2023-2024) das principais empresas do setor com operações no Brasil: Vale S.A., ArcelorMittal Brasil, CSN Mineração S.A., Usiminas S.A. e J&F Mineração S.A.

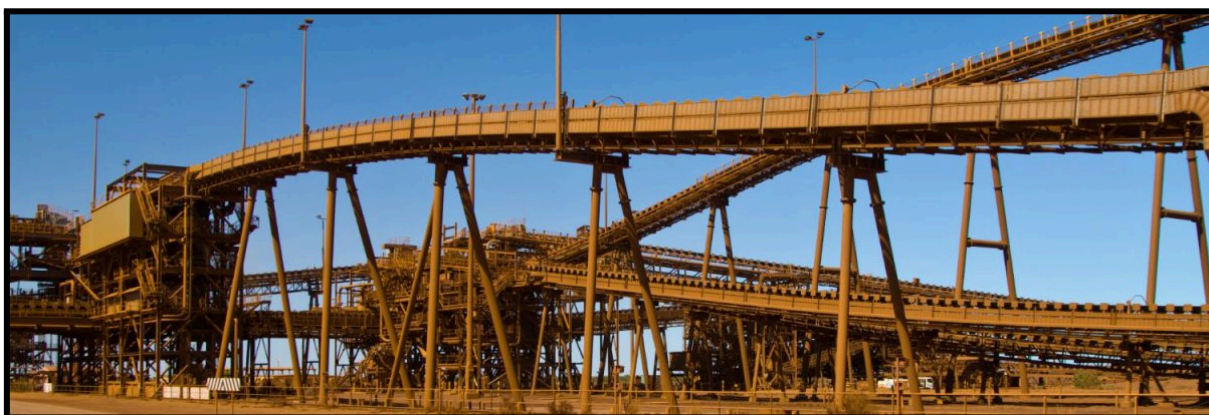
A análise aprofundada desses documentos permitiu uma avaliação comparativa de como cada corporação está respondendo publicamente a esses desafios. Estes relatórios representam a principal ferramenta de comunicação oficial das empresas com seus *stakeholders* (todas as partes interessadas em um projeto ou empresa, que podem ser afetadas por ele ou influenciar seus resultados), detalhando seus compromissos, investimentos e progressos na agenda de descarbonização.

A principal constatação desta análise é a inexistência de uma solução única ou de um roteiro único para a descarbonização setorial. O que emerge é um apanhado de estratégias, em que a abordagem de cada empresa é ditada por um conjunto único de variáveis. Fatores determinantes incluem a posição da empresa na cadeia de valor (seja como extrativista de minério ou como siderúrgica integrada), sua escala operacional e geográfica (global ou focada no mercado doméstico) e, crucialmente, sua maturidade tecnológica e seu apetite de capital para investir em inovação *versus* otimização de ativos existentes.

Este panorama comparativo revela, de fato, um espectro de abordagens cuja amplitude é proporcional à escala e maturidade de cada empresa. Em uma das extremidades, posicionam-se gigantes globais como a Vale S.A. e a ArcelorMittal. Estas corporações desdobram roteiros de descarbonização abrangentes, que atacam múltiplas frentes simultaneamente: investem em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias (como hidrogênio verde e CCUS), realizam investimentos de capital (CAPEX) multimilionários em geração própria de energia renovável, como o projeto de R\$ 5,8 bilhões da ArcelorMittal, e inovam no portfólio de produtos, como os briquetes da Vale. A magnitude de suas operações e seu acesso a capital permitem que atuem como definidoras de tendências, alocando recursos significativos para pilotar e escalar soluções que ainda não são comercialmente viáveis para competidores menores.

Do outro lado da escala de maturidade, encontra-se a J&F Mineração, que, através de seu primeiro Relatório de Sustentabilidade (2023), demonstra uma estratégia focada em ganhos de eficiência operacional e na construção de suas fundações ESG. As ações priorizadas são aquelas com impacto direto, mensurável e com retorno operacional claro, caracterizadas como *low-hanging fruits* (de fácil obtenção). O exemplo mais emblemático desta abordagem é o projeto de substituição de uma frota de 52 caminhões a diesel por um único Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD) eletrificado (Figura 11). Esta ação, embora pontual, gera um abatimento de emissões de Escopo 1 de alta relevância para a escala da operação, demonstrando um foco pragmático na eficiência antes de avançar para compromissos tecnológicos de longo prazo.

Figura 11: TLCD.



Fonte: Correias Mercúrio.

Ocupando um espaço estratégico intermediário, empresas como a CSN Mineração e a Usiminas traçam caminhos que podem ser definidos como objetivos e focados, alavancando seus diferenciais competitivos centrais. A CSN Mineração, por exemplo, não dispersa seus esforços em múltiplas frentes tecnológicas; ao contrário, concentra sua estratégia de descarbonização em seu produto, através de projetos como o P15, que visa à produção de *pellet feed* de altíssimo teor, matéria-prima essencial para as rotas siderúrgicas de baixo carbono. A Usiminas, por sua vez, sendo uma siderúrgica integrada, adota uma abordagem de otimização de seus ativos existentes, exemplificada pela reforma de R\$ 2,7 bilhões do Alto-Forno 3, visando maior eficiência energética e menor consumo de coque, combinada ao uso crescente de biomassa (carvão vegetal).

### 5.2.1 Metas estabelecidas

No campo da ambição de longo prazo, a análise dos relatórios revela um alinhamento claro das gigantes globais, Vale S.A. e ArcelorMittal (figura 12), com o consenso científico e político internacional. Ambas as corporações estabelecem formalmente a meta de atingir a neutralidade de carbono (*Net Zero*) em suas operações até o ano de 2050. Este compromisso vai além de uma declaração de intenção; ele sinaliza aos mercados financeiros, reguladores e clientes que suas estratégias de capital e portfólio de longo prazo estão sendo readequadas para serem compatíveis com um cenário de aquecimento limitado a 1,5 °C (Acordo de Paris), exigindo uma transformação fundamental de seus processos produtivos.

Figura 12: Metas de descarbonização da ArcelorMittal.



Fonte: Relato Integrado Arcelormittal, 2024.

Para que a meta de 2050 seja crível, ela necessita ser ancorada em marcos intermediários robustos. A Vale S.A. (2025) estrutura sua jornada de descarbonização com um dos compromissos de médio prazo mais agressivos do setor: a redução de suas emissões *absolutas* de Escopos 1 e 2 em 33% até o ano de 2030, utilizando 2017 como ano-base. Esta meta é particularmente notável por focar na redução absoluta, e não apenas na intensidade de carbono por tonelada produzida, o que significa que a empresa se compromete a reduzir suas emissões totais mesmo em um cenário de potencial crescimento da produção.

Este objetivo de 33% estabelecido pela Vale (2025) impõe uma cadência de execução acelerada, exigindo investimentos imediatos e substanciais na substituição de combustíveis fósseis e na eficiência energética de suas operações. A materialização dessa meta envolve projetos de alto impacto, como a eletrificação de sua frota de caminhões de mina, o desenvolvimento de biocombustíveis para suas ferrovias e a migração de sua matriz elétrica global para 100% de fontes renováveis. Dessa forma, a meta intermediária funciona como um mecanismo de governança e um vetor de alocação de capital, tornando a visão de longo prazo tangível e mensurável na presente década.

Em um movimento estratégico que a diferencia dos pares globais, a CSN Mineração S.A. (2025) estabelece um cronograma de neutralidade de carbono notavelmente mais arrojado (Figura 13). Enquanto o consenso setorial, adotado por gigantes como Vale e ArcelorMittal, converge para o ano de 2050, a CSN Mineração (2025) mira atingir o *Net Zero* em suas operações de Escopos 1 e 2 já em 2044. Esta antecipação de seis anos denota uma confiança significativa em seu roteiro tecnológico e, principalmente, na centralidade de sua estratégia de portfólio, que é menos diversificada e mais focada que a de seus concorrentes.

Figura 13: Metas de descarbonização CSN.



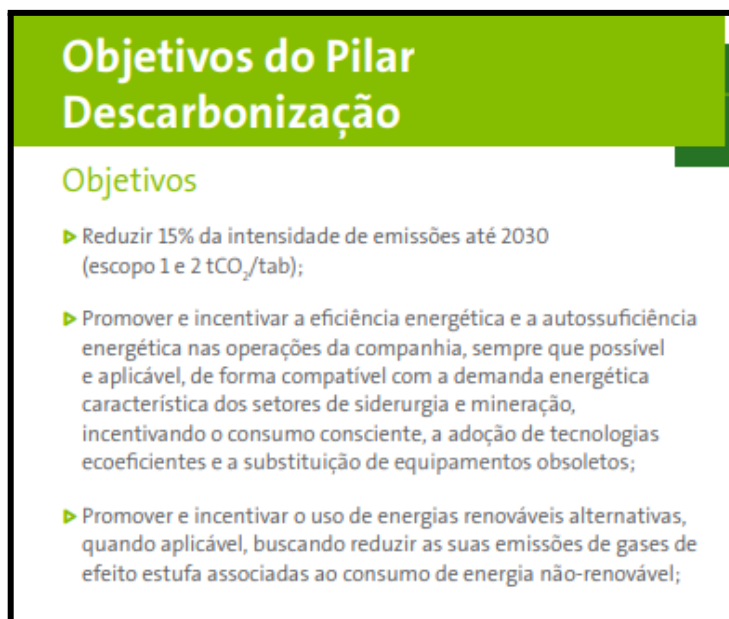
Fonte: Relato integrado CSN, 2025.

Esta meta de longo prazo é rigorosamente sustentada por um objetivo de médio prazo, que serve como principal balizador de sua performance na próxima década. A companhia compromete-se a reduzir sua intensidade de emissões em 30% por tonelada de produto até 2035, tendo o ano de 2020 como linha de base (CSN MINERAÇÃO, 2025). A adoção de uma métrica de *intensidade* (tCO<sub>2</sub>e/tonelada) é crucial, pois permite à empresa executar seu ambicioso plano de expansão de produção, ao mesmo tempo em que implementa ações de descarbonização em suas operações, dissociando o crescimento do volume de emissões por unidade produzida.

A viabilidade desse cronograma é um reflexo direto da estratégia diferencial da empresa, que está fundamentalmente concentrada na pureza de seu produto como o principal vetor de descarbonização. A CSN Mineração (2025) aposta seu futuro no Projeto P15, que visa à produção em larga escala de *pellet feed* de altíssimo teor (> 67% Fe). Este produto não é apenas uma *commodity*, mas sim uma matéria-prima essencial que habilita as rotas siderúrgicas de baixo carbono, como a de Redução Direta (RD). Ao focar em ser a principal fornecedora deste produto *premium*, a empresa alinha seu crescimento de receita diretamente à descarbonização da cadeia de valor (Escopo 3) de seus clientes, permitindo que seu próprio roteiro de descarbonização (Escopos 1 e 2) seja mais direto e focado em eficiência e eletrificação.

A Usiminas S.A. (2025), por sua vez, apresenta uma estratégia de descarbonização com um horizonte temporal focado no médio prazo. A companhia estabelece como meta principal a redução da *intensidade* de suas emissões de Escopos 1 e 2 em 15% até o ano de 2030, utilizando 2019 como ano-base. A escolha por uma métrica de intensidade (toneladas de CO<sub>2</sub>e por tonelada de aço) em vez de uma meta absoluta é uma decisão estratégica que reflete a natureza de seu negócio: ela permite que a empresa persiga o crescimento da produção, ao mesmo tempo em que investe na melhoria da eficiência de seus processos, dissociando o crescimento econômico do aumento proporcional das emissões.

Figura 14: Objetivos do Pilar da Descarbonização da Usiminas.



Fonte: Relato integrado Usiminas, pág. 96, 2025.

Esta abordagem é um reflexo direto dos desafios inerentes ao seu parque industrial, característico de uma siderúrgica integrada. Ativos centrais, como altos-fornos e coquerias, representam um capital imobilizado de valor extremamente elevado e possuem ciclos de vida operacionais que se medem em décadas. A substituição completa desses ativos por rotas tecnológicas inovadoras, como a Redução Direta (RD) baseada em hidrogênio, exigiria um CAPEX de tal magnitude que se tornaria inviável no curto e médio prazo. Portanto, a estratégia mais racional e economicamente viável para a Usiminas (2025) é a otimização, a modernização e o aumento da eficiência desses ativos existentes.

O principal vetor para o atingimento da meta de 15% é, consequentemente, a modernização de seus ativos. O exemplo mais emblemático desta estratégia é a reforma do Alto-Forno 3, um projeto central concluído em 2024 que representou um investimento de R\$ 2,7 bilhões (USIMINAS, 2025). Esta não foi uma simples manutenção, mas uma atualização tecnológica que resultou em um equipamento mais moderno, mais produtivo e, crucialmente, mais eficiente no consumo de coque metalúrgico. Esta maior eficiência energética se traduz diretamente em uma menor emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de gusa produzida, tornando-se assim a principal alavanca da empresa para ganhos de eficiência e cumprimento de sua meta de descarbonização para 2030.

### 5.2.2 Gestão Interna

A análise da estrutura de gestão das empresas (VALE, 2025; ARCELORMITTAL, 2025; CSN MINERAÇÃO, 2025) revela que o pilar da governança climática emerge, de fato, como um diferenciador crucial. Para além do estabelecimento de metas públicas, é a arquitetura de governança que determina a efetiva internalização da agenda climática na tomada de decisão e sua transformação de um discurso reputacional em uma prática gerencial. Observa-se a consolidação de Comitês de Sustentabilidade ligados diretamente aos Conselhos de Administração, conferindo à pauta o mais alto nível de supervisão e alinhamento estratégico, e transformando o risco climático em uma variável central na gestão de riscos corporativos, em linha com as recomendações da TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures).

O principal mecanismo de *accountability* (prestação de contas) identificado nas empresas líderes - Vale (2025), ArcelorMittal (2025) e CSN Mineração (2025) - é o atrelamento direto das metas de descarbonização à remuneração variável da alta liderança. Esta prática de governança, considerada uma das mais eficazes na gestão ESG, cria um alinhamento inequívoco entre os interesses financeiros de curto prazo dos executivos e os objetivos estratégicos de sustentabilidade de longo prazo da organização. Ao vincular indicadores-chave de desempenho (KPIs) climáticos ao bônus anual, o cumprimento das metas de redução de emissões deixa de ser uma externalidade e passa a ser um componente central da avaliação de performance gerencial.

A Vale S.A. (2025) demonstra um nível de profundidade ainda maior nesse pilar, estendendo o alinhamento de incentivos para além do nível executivo. A companhia reporta o vínculo de suas metas climáticas, notadamente o objetivo de redução de 33% das emissões absolutas até 2030, à remuneração variável de *todos* os seus empregados. Esta abordagem é um diferencial significativo, pois busca "cascatear" (desdobrar) a estratégia de descarbonização por toda a estrutura organizacional. Ao fazê-lo, a Vale (2025) fomenta uma transformação cultural, convertendo um objetivo corporativo de alto nível em uma responsabilidade compartilhada, incentivando a inovação e o engajamento na pauta climática desde a linha de operação até a alta gestão.

### 5.2.3 Estratégias

A análise comparativa revela uma divergência estratégica fundamental na alocação de esforços e capital, que é ditada pela posição da empresa na cadeia de valor: um foco na transformação do processo ou na qualificação do produto. Para as siderúrgicas integradas, como Usiminas (2025) e ArcelorMittal (2025), o desafio da descarbonização é primariamente interno. Suas emissões de Escopo 1, geradas pela queima de coque em seus altos-fornos, são a principal fonte de sua pegada de carbono. Consequentemente, suas estratégias concentram-se na otimização de processos existentes (como a reforma do Alto-Forno 3 da Usiminas) ou na substituição desses processos por novas rotas tecnológicas, como a Redução Direta (RD) com hidrogênio verde (a principal aposta da ArcelorMittal).

Em nítido contraste, as empresas de mineração, como a Vale S.A. (2025) e a CSN Mineração S.A. (2025), adotam a vanguarda da estratégia de "produto como solução". Embora estas empresas possuam metas robustas para seus Escopos 1 e 2 (focadas em eletrificação de frotas e energia renovável), elas compreendem que seu impacto climático mais significativo, e o maior risco para seu negócio no longo prazo, reside no Escopo 3. Esta categoria de emissões é esmagadoramente dominada pelo uso de seu produto por seus clientes siderúrgicos no processo de fabricação do aço.

Desta forma, a alavanca mais eficaz para estas mineradoras abaterem suas emissões de Escopo 3 e, simultaneamente, garantir sua competitividade futura é investir na qualidade de seu portfólio. Ao fornecerem aos clientes uma matéria-prima de qualidade superior (com alto teor de ferro e baixos contaminantes) elas habilitam diretamente os processos siderúrgicos de baixo carbono. O *pellet feed* de alto teor ( $> 67\%$  Fe) da CSN Mineração (2025) ou os briquetes e pelotas de alta qualidade da Vale (2025) não são apenas *commodities*, mas soluções técnicas essenciais para a viabilidade da rota de Redução Direta (RD). Esta estratégia alinha o sucesso comercial da mineradora à descarbonização de seu cliente, como evidenciado pela meta da Vale (2025) de reduzir suas emissões líquidas de Escopo 3 em 15% até 2035.

Neste contexto, o projeto de expansão da CSN Mineração S.A. (2025), conhecido como P15, é a personificação literal da estratégia de "produto como solução". Trata-se do principal vetor de crescimento e de descarbonização da companhia, sendo um projeto de capital intensivo projetado para adicionar 16,5 milhões de toneladas por ano de *pellet feed* à capacidade



produtiva da empresa. O diferencial competitivo deste projeto não reside apenas no volume, mas fundamentalmente na qualidade do produto final: um minério beneficiado para atingir um teor de ferro superior a 67%, com baixíssimos níveis de contaminantes. Este movimento representa um pivô estratégico, direcionando o portfólio da empresa para um produto de altíssimo valor agregado.

A especificação técnica deste *pellet feed* é crucial, pois ele é projetado para ser a matéria-prima ideal para a rota de Redução Direta (RD), internacionalmente conhecida como *Direct Reduction* (DR). Processos siderúrgicos tradicionais, como o alto-forno, são mais flexíveis e conseguem lidar com minérios de menor qualidade, porém, ao custo de altíssimas emissões de CO<sub>2</sub>. A rota de RD, por sua vez, é quimicamente menos intensiva e exige um minério de alta pureza para funcionar eficientemente. O produto do P15, com seu teor de 67% de ferro, atende precisamente a essa exigência técnica, posicionando-se como um insumo *premium* essencial para a nova geração de usinas siderúrgicas.

O impacto final desta estratégia reside na habilitação do "aço verde". A rota de Redução Direta, quando alimentada por gás natural, já é menos intensiva em carbono que o alto-forno. No entanto, quando o agente redutor (gás natural) é substituído pelo hidrogênio verde (H<sub>2</sub> produzido por eletrólise com energia renovável), o processo de produção de aço primário torna-se virtualmente livre de emissões de carbono. Conforme apontam os relatórios e estudos setoriais (ARCELLORMITTAL, 2025; VALE, 2025), esta combinação tecnológica tem o potencial de reduzir as emissões da produção de aço em mais de 90%. Portanto, a estratégia da CSN Mineração (2025) é se consolidar como uma fornecedora indispensável deste insumo crítico, capturando o valor da descarbonização de seus clientes.

A Vale S.A. (2025), em linha com sua escala global e diversidade de clientes, amplia essa mesma lógica de "produto como solução" ao desenvolver um portfólio abrangente de soluções em minério de ferro. Diferente de uma estratégia única, a Vale (2025) atua em múltiplas frentes para atender siderúrgicas em diferentes estágios de maturidade tecnológica. A empresa continua a fornecer minério de alta qualidade e pelotas para a rota de Redução Direta (RD), posicionando-se para o futuro. Contudo, reconhecendo que a rota tradicional de Alto-Forno (BF-BOF) ainda dominará a produção global de aço por décadas, a companhia inovou ao desenvolver produtos que descarbonizam também este processo existente.

A principal inovação neste portfólio é o briquete de minério de ferro, um produto desenvolvido internamente após anos de pesquisa. Este aglomerado de minério de alta qualidade pode ser carregado diretamente no alto-forno, substituindo parcialmente a sínter ou pelotas tradicionais. A sua vantagem competitiva central é a capacidade de reduzir as emissões de GEE do processo siderúrgico convencional em até 10% (VALE, 2025). Este produto ataca a maior barreira à descarbonização da siderurgia: a inércia do capital, pois ele não exige que seus clientes realizem investimentos massivos para adaptar ou substituir seus altos-fornos.

A empresa já materializou esta inovação em escala industrial, demonstrando seu compromisso em prover soluções de transição imediatas. Conforme seu último relatório (VALE, 2025), a companhia já possui duas plantas de briquetes em operação em seu complexo de Tubarão, no Espírito Santo. Juntas, essas unidades têm capacidade para produzir 6 milhões de toneladas anuais deste produto. Esta capacidade produtiva não é apenas um piloto, mas uma oferta comercial robusta que permite à Vale (2025) fortalecer suas parcerias com clientes, ajudando-os a cumprir metas de descarbonização de curto prazo e a gerar valor imediato enquanto as novas tecnologias, como o hidrogênio verde, ainda amadurecem.

Posicionadas no outro lado da cadeia de valor, as siderúrgicas integradas, como a ArcelorMittal S.A. (2025) e a Usiminas S.A. (2025), enfrentam um desafio de descarbonização fundamentalmente endógeno. Diferentemente das mineradoras, cujo principal impacto climático reside no Escopo 3 (uso do produto), a pegada de carbono das siderúrgicas é dominada por suas emissões diretas de Escopo 1. Estas emissões são inerentes ao processo químico de redução do minério de ferro com coque metalúrgico (um combustível fóssil) em seus altos-fornos. Consequentemente, suas estratégias não podem se basear apenas na compra de energia limpa ou na eficiência logística; elas exigem uma profunda e custosa transformação de seus próprios processos produtivos centrais.

A ArcelorMittal (2025) adota a postura mais agressiva, apostando abertamente na modernização tecnológica como caminho para a neutralidade de carbono. A estratégia da empresa é multifacetada e ataca em duas frentes principais. A primeira é a aposta de longo prazo, alinhada à vanguarda tecnológica global: a adaptação de suas plantas industriais para a rota de Redução Direta (RD) alimentada por hidrogênio verde. Esta rota substitui o agente redutor fóssil (coque) pelo hidrogênio ( $H_2$ ), o que, em tese, elimina as emissões de  $CO_2$  do processo primário de fabricação do aço.

Paralelamente, a ArcelorMittal (2025) utiliza de forma intensiva uma vantagem competitiva brasileira: a biomassa. A empresa avança em sua "bio-siderurgia", um conceito que envolve a substituição parcial ou total do coque fóssil por carvão vegetal renovável, proveniente de florestas plantadas e certificadas. Esta não é uma solução marginal; o relatório da companhia (ARCELORMITTAL, 2025) quantifica esta prática, reportando o uso de mais de 3,6 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal por ano. Esta abordagem híbrida permite à ArcelorMittal (2025) obter reduções de emissões significativas no presente, através da biomassa, enquanto prepara seu parque industrial para a implementação futura do hidrogênio.

A Usiminas S.A. (2025), em contrapartida às estratégias de inovação tecnológica, opta por um caminho deliberado de otimização incremental e pragmatismo. Esta abordagem foca na maximização da eficiência e na redução da pegada de carbono de seu parque industrial siderúrgico integrado existente. A lógica subjacente é que os ativos centrais, como os altos-fornos, representam um capital imobilizado de altíssimo valor e longa vida útil, tornando sua substituição completa inviável no médio prazo. Portanto, a empresa concentra seus esforços e investimentos na modernização tecnológica desses ativos para extrair a máxima performance ambiental e operacional possível dentro do paradigma tecnológico vigente.

O exemplo mais representativo e de maior magnitude desta estratégia é a já mencionada reforma do Alto-Forno 3, concluída em 2024. Este projeto foi o maior investimento da companhia na década, totalizando R\$ 2,7 bilhões (USIMINAS, 2025). É crucial notar que esta não foi uma mera manutenção, mas uma atualização tecnológica substancial que visa, primariamente, reduzir o consumo específico de coque metalúrgico por tonelada de gusa produzido. Ao diminuir a necessidade deste combustível fóssil, a Usiminas (2025) ataca diretamente sua principal fonte de emissões de Escopo 1 e estabelece esta eficiência de processo como a principal alavanca para atingir sua meta de redução de intensidade de 15% até 2030.

Adicionalmente à modernização dos ativos primários, a Usiminas (2025) complementa sua estratégia de otimização com um foco crescente na economia circular, especificamente através do aumento do consumo de sucata metálica. A sucata atua como uma matéria-prima alternativa que, ao ser reintroduzida no processo siderúrgico, desloca a necessidade de ferro-gusa primário (produzido no alto-forno), reduzindo a intensidade de carbono do aço final. A empresa quantifica o impacto desta ação, reportando que o aumento no uso de sucata já representou uma economia de mais de 72 mil toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente apenas no ano

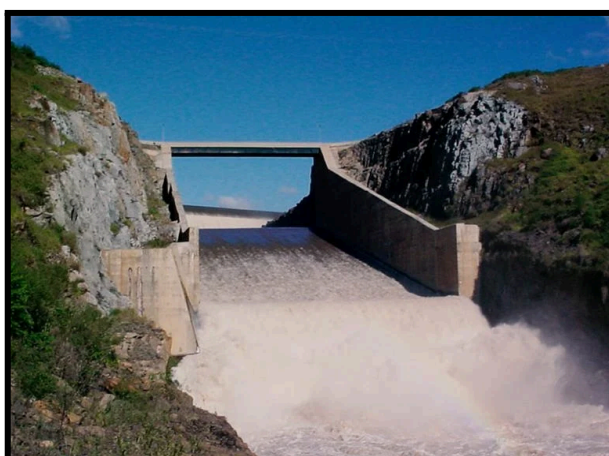
de 2024, demonstrando ser esta uma alavanca relevante e imediata em seu portfólio de descarbonização.

#### 5.2.4 Tecnologias em utilização

A análise das rotas tecnológicas revela que a transição da matriz energética é um pilar fundamental e um pré-requisito para a viabilidade da maioria das estratégias de descarbonização. A eletrificação de frotas e processos, principal alavanca para o abatimento de emissões de Escopo 1 (oriundas do diesel), apenas transfere a fonte da emissão; sua eficácia climática depende intrinsecamente da pureza da fonte de eletricidade. Da mesma forma, a descarbonização do Escopo 2 (emissões indiretas pela compra de energia) é um passo basilar, e a viabilidade futura de tecnologias como o hidrogênio verde depende da disponibilidade de energia renovável em larga escala e a custo competitivo.

Neste quesito, a CSN Mineração S.A. (2025) apresenta um diferencial competitivo notável e já consolidado. A companhia reporta que 100% de sua energia elétrica consumida já é proveniente de fontes renováveis. Este patamar, que outras empresas ainda buscam atingir através de investimentos futuros - como o CAPEX de R\$ 5,8 bilhões da ArcelorMittal (2025) para geração própria até 2030, ou a meta global da Vale (2025) para a mesma data - , é alcançado pela CSN Mineração (2025) por meio de sua estratégia de autossuficiência energética, garantida principalmente pelo controle da Usina Hidrelétrica (UHE) Quebra-Queixo (Figura 15).

Figura 15: Usina Hidrelétrica (UHE) Quebra-Queixo.



Fonte: Brasil Energia, 2025.

Esta autossuficiência em energia limpa não é apenas um indicador de sustentabilidade, mas uma vantagem competitiva estrutural. Ela mitiga o risco de volatilidade de preços de energia (Escopo 2) e, mais importante, serve como uma plataforma que acelera e viabiliza economicamente outras frentes de descarbonização. A decisão da CSN Mineração (2025) de avançar rapidamente na eletrificação de sua frota de mina, em que já opera nove equipamentos de grande porte, é diretamente facilitada por esta base energética. O custo operacional (OPEX) desses equipamentos torna-se mais baixo e previsível, e o retorno sobre o investimento (ROI) da eletrificação é maximizado, pois a empresa garante que cada quilowatt-hora (kWh) consumido possui uma pegada de carbono zero.

A Vale S.A. (2025), em uma trajetória similar à da CSN Mineração no quesito energético, também reporta o atingimento do marco de 100% de seu consumo de energia elétrica no Brasil, sendo suprido por fontes renováveis. Este feito é um pilar central de sua estratégia de descarbonização, pois elimina a maior parte de suas emissões de Escopo 2 em sua principal geografia operacional. No entanto, dado sua pegada de carbono global, a companhia estende essa ambição, estabelecendo a meta de alcançar este mesmo marco de 100% de eletricidade renovável em suas operações globais até 2030, um desafio significativamente mais complexo que envolve atuar em diferentes matrizes energéticas e ambientes regulatórios ao redor do mundo.

Com esta base de energia limpa parcialmente assegurada, a Vale (2025) avança em uma das frentes mais desafiadoras para o abatimento do Escopo 1: a eletrificação de seus equipamentos móveis de grande porte. A empresa não se limita a adquirir soluções de prateleira, mas atua na fronteira tecnológica, reportando o avanço em testes com equipamentos como caminhões elétricos de 240 toneladas (Figura 16) e locomotivas movidas a bateria. Este esforço de pesquisa e desenvolvimento (P&D) é crítico, visto que a tecnologia de baterias para veículos deste porte ainda não está plenamente consolidada para as condições severas da mineração, e o sucesso desses pilotos é um pré-requisito para a descarbonização em larga escala de suas frotas.

Figura 16: Caminhão fora de estrada movido a bateria elétrica.



Fonte: Vale, 2025.

Em contraste com a abordagem de P&D de fronteira da Vale (2025), a J&F Mineração (2023) planeja uma intervenção de engenharia de alto impacto, utilizando uma tecnologia já madura. A empresa reporta em seu plano de descarbonização a substituição de uma frota inteira de 52 caminhões movidos a diesel por um único Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD) elétrico. Esta é uma solução estrutural que ataca diretamente um dos principais focos de emissão de Escopo 1 da operação (transporte interno de minério). O resultado projetado é a eliminação total do consumo de combustível fóssil neste trecho específico, demonstrando como uma decisão de engenharia de processo pode gerar um abatimento de emissões mais imediato e quantificável do que a renovação gradual de uma frota móvel.

No que tange especificamente ao suprimento de energia limpa, a ArcelorMittal S.A. (2025) se diferencia dos pares por seu robusto apetite de investimento direto em geração própria. Enquanto outras empresas, como a CSN Mineração (2025), garantem sua energia renovável através de ativos de autoprodução já existentes (hidrelétrica UHE Quebra-Queixo), ou, como a Vale (2025), atuam fortemente no mercado de compra de energia via contratos de longo prazo (PPAs), a ArcelorMittal (2025) adota uma estratégia de verticalização. Esta abordagem mitiga os riscos de longo prazo de volatilidade de preços no mercado de energia e, crucialmente, garante o controle total sobre a origem e a rastreabilidade da energia renovável consumida.

O comprometimento financeiro com esta estratégia é material e explícito. A companhia reporta um investimento de capital (CAPEX) da ordem de R\$ 5,8 bilhões destinado exclusivamente à construção de novos ativos de geração (ARCELORMITTAL, 2025). Este portfólio de investimentos não se limita a uma única fonte, mas inclui o desenvolvimento de um complexo híbrido (eólico e solar) de grande porte e um parque solar adicional. Esta diversificação de fontes renováveis (eólica e solar) otimiza a sazonalidade da geração e reforça a segurança energética da operação.

Os resultados quantitativos projetados para este investimento são de escala estratégica. Juntos, estes novos projetos de geração somam uma capacidade instalada de 835 MW (ARCELORMITTAL, 2025). O objetivo declarado da companhia é que esta nova capacidade seja suficiente para suprir 60% de toda a demanda elétrica de suas operações no Brasil até o ano de 2030. Esta autossuficiência parcial é um pilar central para a descarbonização de seu Escopo 2 e um habilitador indispensável para futuras rotas tecnológicas, como a produção de hidrogênio verde, que são eletrointensivas.

Paralelamente aos esforços em energia e eficiência de processo, a economia circular também se revela um campo fértil e de impacto imediato para a descarbonização, especialmente no setor siderúrgico. Diferentemente da mineração, onde a circularidade se concentra na recuperação de valor de rejeitos (como o programa "Waste to Value" da Vale), na siderurgia, a rota da reciclagem de sucata metálica é uma alavanca madura e altamente eficaz. A utilização de sucata em fornos elétricos a arco (EAF) ou mesmo como carga metálica em fornos a oxigênio (BOF) desloca a necessidade de produção de ferro-gusa primário, um dos processos mais carbono-intensivos da indústria.

Neste domínio, a ArcelorMittal (2025) demonstra liderança clara em suas operações brasileiras, integrando a reciclagem como um pilar central de seu modelo de negócio (figura 17). A companhia reporta que 22% de toda a sua produção de aço no Brasil já é originada a partir da reciclagem de sucata. Esta prática não é tratada como uma atividade acessória, mas sim como um dos fundamentos de sua marca de produtos de baixo carbono, a XCarb™ (programa global contínuo da ArcelorMittal de inovação na fabricação de aço, cuja meta é alcançar carbono zero até 2050), que se baseia justamente na produção de aço com energia renovável e conteúdo reciclado, atendendo a uma demanda crescente de clientes por materiais "verdes".

Figura 17: Entrepósito de Iracemápolis - SP (Arcelormittal).



Fonte: Arcelormittal Brasil, 2025.

Os benefícios desta abordagem de circularidade são duplos e quantificáveis. O primeiro é a óbvia redução de emissões, visto que o aço reciclado possui uma pegada de carbono drasticamente inferior à do aço primário. O segundo é a redução da pressão sobre os recursos naturais. A ArcelorMittal (2025) estima que este nível de utilização de sucata em seus processos diminui a necessidade de extração de 5,7 milhões de toneladas de minério de ferro primário anualmente. Esta prática, portanto, não apenas contribui para a meta de *Net Zero* da empresa, mas também fortalece sua resiliência operacional e reduz sua dependência de matéria-prima virgem.

Para as empresas de mineração, a economia circular assume uma conotação distinta da manufatura, concentrando-se não na reciclagem pós-consumo, mas na revalorização de seus próprios fluxos de resíduos operacionais. A via encontrada para a circularidade é, portanto, o reprocessamento de rejeitos, que historicamente eram vistos unicamente como um passivo ambiental e um risco geotécnico que exigia armazenamento perpétuo em barragens. Esta nova abordagem estratégica visa transformar este passivo em um ativo financeiro, utilizando tecnologias modernas de beneficiamento para recuperar o minério de ferro de baixo teor contido nesses depósitos.



A Vale S.A. (2025) apresenta o programa mais quantificado nesta frente, denominado "Waste to Value". Este programa não é apenas uma iniciativa de remediação, mas uma unidade de negócios emergente focada na mineração de seus próprios depósitos de rejeitos. A empresa reporta resultados operacionais notáveis, tendo recuperado 12,7 milhões de toneladas de minério de ferro a partir desses materiais apenas no ano de 2024. Este volume é significativo, pois representa uma produção de alta qualidade (concentrado) obtida sem a necessidade de novas lavras (*run-of-mine*), reduzindo o impacto ambiental e a pegada de carbono associada.

A estratégia é evidenciada pela meta de longo prazo estabelecida pela companhia. A Vale (2025) tem o objetivo de que 10% de sua produção total de minério de ferro seja originada de fontes circulares até 2030. Este é um indicador de desempenho (KPI) estratégico que demonstra, de forma inequívoca, a viabilidade econômica do processo. Ao monetizar um passivo e integrá-lo à sua cadeia produtiva principal, a empresa não apenas mitiga seus maiores riscos ambientais e de segurança, mas também cria um novo fluxo de receita resiliente e alinhado às demandas ESG.

A CSN Mineração S.A. (2025) destaca-se por uma abordagem dupla na gestão de rejeitos, que combina a mitigação de riscos futuros com a remediação de passivos históricos. Em suas operações correntes, a empresa reporta ser pioneira ao utilizar a tecnologia de filtragem e empilhamento a seco (*dry stacking*) para 100% dos rejeitos gerados em seu processo de beneficiamento. Esta é uma decisão estratégica de engenharia que elimina a necessidade de construção de novas barragens de rejeitos, mitigando o principal risco geotécnico e ambiental do setor de mineração no Brasil e atendendo às mais rigorosas exigências regulatórias.

Paralelamente à gestão de seus rejeitos atuais, a CSN Mineração (2025) também avança em projetos de reprocessamento de barragens antigas, adotando uma lógica de mineração circular similar à da Vale. A companhia reporta o desenvolvimento de projetos focados em suas estruturas de deposição de rejeitos mais antigas, que contêm minério de ferro de menor teor, mas que agora se tornaram economicamente viáveis devido às novas tecnologias de concentração e à alta demanda de mercado por produtos de qualidade.

O objetivo desta frente de remediação é explicitamente comercial e alinhado à sua estratégia de produto *premium*. A empresa declara estar mirando uma capacidade produtiva de 6 milhões de toneladas anuais de *pellet feed* (produto de altíssimo valor agregado) a partir desses passivos (CSN MINERAÇÃO, 2025). Esta iniciativa é duplamente estratégica: ela

reprocessa e descomissiona estruturas antigas, reduzindo o risco geotécnico, ao mesmo tempo em que gera uma nova fonte de receita de alta margem, transformando um passivo ambiental em uma vantagem competitiva.

#### 5.2.5 *Tecnologias Emergentes*

Olhando para as tecnologias emergentes, a análise identifica um conjunto de soluções de fronteira que, embora ainda em estágio inicial de maturidade, são consideradas essenciais para o "salto" final em direção à neutralidade de carbono. A Vale S.A. (2025) e a ArcelorMittal S.A. (2025) são as empresas que mais explicitamente reportam investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) nessas soluções, notadamente a Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) e o uso de hidrogênio verde em escala industrial. Estas são apostas de longo prazo, de capital intensivo, vistas como necessárias para abater emissões residuais em processos onde a eletrificação ou o uso de biomassa não é tecnicamente viável.

A rota do hidrogênio, em particular, é vista como o principal vetor de inovação para a siderurgia, conforme já detalhado na estratégia de Redução Direta (RD) da ArcelorMittal (2025). No entanto, o desafio de sua implementação não se restringe apenas aos grandes reatores, mas também à sua aplicação em processos auxiliares. A ArcelorMittal (2025) oferece um exemplo concreto dessa exploração gradual, ao reportar que já estuda o uso de hidrogênio verde para substituir o gás natural em processos térmicos de menor escala, como no corte de placas de aço em sua unidade de Vega, em Santa Catarina.

Este tipo de projeto-piloto, embora de impacto modesto nas emissões totais, é fundamental para a curva de aprendizado tecnológico. Ele permite à empresa ganhar experiência operacional com o manuseio, a segurança e a eficiência de combustão do hidrogênio em um ambiente industrial real. Esta abordagem incremental, testando o H<sub>2</sub> em processos auxiliares enquanto se planeja a transformação dos processos centrais, reduz o risco de implementação e acelera a capacitação técnica interna, preparando a companhia para a adoção em larga escala quando a tecnologia se tornar economicamente viável.

A jornada da J&F Mineração S.A. (2023), por sua vez, é de uma empresa que se encontra na fase de construção de suas fundações ESG. O seu primeiro relatório de sustentabilidade não apresenta metas de *Net Zero* ou apostas em tecnologias de fronteira, mas foca na estruturação da governança e na implementação de ações pragmáticas com impacto imediato. Esta abordagem, que prioriza o controle de riscos operacionais e a eficiência, é um passo essencial

e metodologicamente sólido para uma organização que estabelece sua linha de base de emissões e sua estratégia climática de longo prazo.

O foco inicial recai, portanto, sobre ganhos de eficiência logística, que representam as oportunidades de abatimento de carbono mais diretas para a operação. A empresa cita a ampliação da operação de transbordo em alto-mar como um desses ganhos (J&F MINERAÇÃO, 2023). Esta otimização logística permite o uso de navios de maior porte (como os *Capesize*), que são intrinsecamente mais eficientes, reduzindo o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de Escopo 3 (transporte e distribuição) por tonelada de minério movimentada. Esta ação se soma a outras intervenções estruturais, como a substituição de 52 caminhões por um TCLD elétrico, demonstrando um foco na engenharia de processo como vetor de descarbonização.

Paralelamente a esses ganhos de eficiência operacional, a J&F Mineração (2023) sinaliza sua estratégia de longo prazo através da inovação de produto. O desenvolvimento do *Natural Pellet*, um granulado de minério de alto teor, é o seu "bilhete de entrada" para o mercado de produtos de alto valor agregado. Este movimento é estratégico, pois posiciona a empresa para, no futuro, fornecer a matéria-prima necessária para as rotas siderúrgicas de baixo carbono (como a Redução Direta), alinhando seu crescimento futuro diretamente à tendência de descarbonização da indústria siderúrgica global.

### 5.3 Análise Comparativa das Tecnologias e Práticas de Descarbonização

A presente seção dedica-se à análise aprofundada das estratégias de descarbonização adotadas pelas empresas Vale S.A., ArcelorMittal Brasil, CSN Mineração S.A., Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. (Usiminas) e J&F Mineração S.A. A partir dos dados coletados em seus respectivos relatórios de sustentabilidade, realiza-se uma avaliação qualitativa e criteriosa das rotas tecnológicas, dos desafios inerentes à sua implementação e dos benefícios projetados.

#### 5.3.1. Análise Qualitativa

A análise qualitativa foi conduzida por meio da revisão e interpretação dos dados extraídos dos relatórios anuais de sustentabilidade publicados pelas empresas em 2024 e 2025. O foco desta análise reside na identificação das principais tecnologias e práticas de descarbonização, bem como dos desafios e oportunidades associados à sua implementação, conforme detalhado nos estudos de caso corporativos. Foram avaliadas, com base nas fontes primárias,

tecnologias como o hidrogênio verde, a captura e armazenamento de carbono (CCS), a utilização de biocombustíveis e a eletrificação dos processos industriais.

O hidrogênio verde emerge como a principal aposta tecnológica para a transformação de longo prazo, notadamente no setor siderúrgico. A ArcelorMittal (2025) posiciona explicitamente a rota de Redução Direta (RD) com hidrogênio ( $H_2$ ) como a solução definitiva para a produção de aço primário de baixo carbono. A Vale (2025), por sua vez, atua como uma empresa habilitadora dessa transição, estruturando sua estratégia na produção de minério de ferro de alta qualidade e no desenvolvimento de *Mega Hubs* industriais em localidades com potencial para a produção de hidrogênio a custos competitivos. O desafio preponderante, implicitamente reconhecido por todas as corporações, reside no elevado custo atual da tecnologia e na ausência de uma infraestrutura de produção e logística em escala industrial. A oportunidade vislumbrada é o potencial para a eliminação quase total das emissões de  $CO_2$  do processo siderúrgico.

A tecnologia de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) é tratada com maior cautela. A Vale (2025) e a ArcelorMittal (2025) reportam a existência de projetos em fase de estudo ou piloto, majoritariamente em suas operações internacionais. A análise qualitativa sugere que o CCUS é percebido como uma solução de transição ou para o abatimento de emissões residuais em processos industriais onde a substituição de combustíveis fósseis é tecnicamente inviável no curto e médio prazo. Os desafios para sua implementação são significativos, abrangendo elevados custos de capital (CAPEX), a necessidade de segurança geológica para o armazenamento de longo prazo e a obtenção de licença social para operar.

Os biocombustíveis e a biomassa representam a rota tecnológica de substituição de combustíveis fósseis mais madura e com aplicação prática em escala industrial. A Usiminas (2025) e a ArcelorMittal (2025) destacam-se pela utilização de carvão vegetal, uma biomassa sólida, em seus altos-fornos, prática que reduz a dependência do coque metalúrgico fóssil. A Vale (2025) reporta avanços em testes com biocombustíveis líquidos, como o biodiesel B100 (100% biodiesel) e o etanol, para aplicação em suas locomotivas e caminhões de mina. O principal desafio associado a esta rota é a garantia de escalabilidade e sustentabilidade na produção de biomassa. O benefício imediato reside na sua aplicabilidade direta em ativos existentes, com pouca ou nenhuma modificação.

A eletrificação consolida-se como a via mais direta e eficaz para a descarbonização das emissões de Escopo 1, especialmente nas operações de mina e na logística associada. A CSN Mineração (2025) demonstra liderança na implementação, com uma frota de nove equipamentos elétricos de grande porte já em operação (uma escavadeira, uma pá-carregadeira e 7 caminhões). A J&F Mineração (2023) apresenta um projeto de alto impacto como o Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD) eletrificado. A Vale (2025), por sua vez, foca em pesquisa e desenvolvimento para a eletrificação de equipamentos de ultragrande porte, como caminhões com capacidade para 240 toneladas cada. O principal desafio técnico reside na autonomia e na capacidade das baterias para veículos pesados.

### *5.3.2 Critérios de Análise de Tecnologias de Descarbonização*

Para a sistematização da análise, os dados foram organizados em quatro categorias temáticas, conforme o Quadro 2. A análise foi realizada com base em critérios de frequência, relevância e coerência dos argumentos apresentados nas fontes, permitindo identificar as tecnologias mais promissoras e os fatores que influenciam sua adoção. A triangulação de dados, por meio do cruzamento de informações entre os diferentes relatórios corporativos, foi utilizada para aumentar a confiabilidade dos resultados.

Quadro 2: Análise das tecnologias de descarbonização

<b>Relatórios</b>	<b>Tecnologias de Descarbonização</b>	<b>Desafios de Implementação</b>	<b>Benefícios Ambientais e Econômicos (programas implementados)</b>	<b>Políticas e Incentivos Regulatórios</b>
<b>Vale</b>	Eletrificação (caminhões de 240 t); Biocombustíveis (etanol/B100); Habilitadora de H <sub>2</sub> Verde (produtos premium); CCUS (em estudo).	Custo e maturidade do H <sub>2</sub> verde e CCUS; Escala da eletrificação de frota pesada; Logística de biocombustíveis.	Redução de Escopo 3 em 15% até 2035; Ganhos de eficiência com eletrificação; Liderança em mineração de baixo carbono.	Atuação em mercados com precificação de carbono; demanda crescente por produtos de baixo carbono.
<b>ArcelorMittal Brasil</b>	Hidrogênio Verde (rota RD); Biomassa (carvão vegetal); CCUS (pilotos na UE); Eletrificação (logística); Energia Solar/Eólica (geração própria).	Custo do H <sub>2</sub> verde; CAPEX para transformar altos-fornos em rota RD; Disponibilidade de sucata para economia circular.	Produtos "verdes" (XCarb™) com maior valor agregado; Redução de emissões; Autossuficiência energética (60% da demanda).	Influência da regulação europeia (e.g., CBAM); Incentivos para produção de H <sub>2</sub> verde; Mercado voluntário de carbono.
<b>CSN Mineração</b>	Eletrificação (frota em operação); Habilitadora de H <sub>2</sub> Verde (produto pellet feed > 67% Fe).	CAPEX do projeto P15; limitação tecnológica de baterias para frota de mina.	Produto premium para aço verde; Eliminação de barragens (100% rejeito a seco); Redução de Escopo 1 com eletrificação.	Demanda global por minério de alta qualidade; regulação de segurança de barragens.
<b>Usiminas</b>	Biomassa (carvão vegetal); Otimização de Processo (reforma AF3); Biogás; Energia Solar (parceria).	CAPEX para modernização de ativos; disponibilidade de biomassa sustentável; dependência do processo de alto-forno.	Redução de 15% na intensidade de emissões; Redução de custos com coque e energia; Transformação de rejeito em produto.	Adaptação a futuras políticas de precificação de carbono no Brasil; busca por linhas de financiamento verde.
<b>J&amp;F Mineração</b>	Eletrificação (TCLD); Habilitadora de H <sub>2</sub> Verde (Natural Pellet).	CAPEX para nova planta de filtragem e TCLD; necessidade de desenvolver mercado para o novo produto.	Redução drástica de Escopo 1 com TCLD; Produto de maior valor; Eliminação de barragens.	Benefício de regulações mais rígidas sobre barragens; posicionamento para futuras demandas de mercado.

Fonte: Autoria própria.

A análise dos dados apresentados no Quadro 1, sob o critério de frequência e relevância, indica que a eletrificação é a tecnologia com maior número de ações concretas reportadas para a redução de emissões de Escopo 1 na mineração. Na siderurgia, o uso de biomassa é a prática mais relevante no curto prazo, enquanto o hidrogênio verde é unanimemente apontado como a solução de maior relevância estratégica para o longo prazo.

Sob o critério de coerência dos argumentos, observa-se que as estratégias tecnológicas são consistentes com o modelo de negócios de cada empresa. As mineradoras (Vale, CSN Mineração, J&F Mineração) focam em fornecer um produto que habilita a descarbonização da cadeia de valor, alinhando seu crescimento à transição energética de seus clientes. As siderúrgicas (ArcelorMittal, Usiminas), por sua vez, concentram seus esforços na transformação de seus próprios processos produtivos.

A triangulação dos dados permite a identificação de tecnologias mais promissoras. A análise cruzada dos relatórios aponta que a combinação de minério de ferro de alta qualidade com a rota de Redução Direta a hidrogênio é o caminho tecnológico mais promissor para a produção de aço com emissões próximas a zero. No âmbito operacional da mineração, a eletrificação consolida-se como a solução padrão para frotas e equipamentos.

Finalmente, a análise dos fatores que influenciam a adoção revela que as decisões de investimento são primariamente guiadas pelo retorno financeiro e pelo posicionamento estratégico de mercado. A CSN Mineração (2025) investe em seu projeto P15 porque o *pellet feed* de alto teor comandará um prêmio no mercado de baixo carbono. A ArcelorMittal (2025) investe R\$ 5,8 bilhões em energia renovável para garantir custos competitivos e a viabilidade de seus produtos da linha *XCarb™*. Um segundo fator de influência relevante é a gestão de riscos regulatórios e operacionais, como evidenciado pela adoção universal de tecnologias de filtragem de rejeitos para a eliminação de novas barragens a montante.

### 5.3.3 Análise Quantitativa

Nesta seção, a análise das estratégias de descarbonização é aprofundada por meio de técnicas quantitativas. Os dados extraídos dos relatórios corporativos são analisados para identificar padrões, tendências e a eficácia das tecnologias implementadas. Embora estudos externos como os de Findorák et al. (2025) e Singh et al. (2023) ofereçam *benchmarks* setoriais, a presente análise se restringe aos dados primários disponibilizados pelas empresas objeto deste estudo, garantindo a fidelidade à sua performance e estratégia declaradas.

### 5.3.4 Avaliação das Emissões de CO<sub>2</sub> e Metas de Redução.

A avaliação quantitativa inicia-se pela análise dos inventários de emissões e das metas de redução, que representam o principal indicador de desempenho climático. As empresas apresentam metas com diferentes métricas com horizontes temporais, conforme detalhado na Tabela 1.

Quadro 3: Metas Quantitativas de Redução de Emissões de GEE

<b>Empresa</b>	<b>Métrica da Meta</b>	<b>Redução Almejada</b>	<b>Ano Base</b>	<b>Ano Alvo</b>	<b>Escopo</b>
<b>Vale S.A.</b>	Emissões Absolutas	33%	2017	2030	Escopos 1 e 2
<b>Vale S.A.</b>	Emissões Líquidas (Cadeia de Valor)	15%	2018	2035	Escopo 3
<b>Usiminas S.A.</b>	Intensidade de Emissões (tCO <sub>2</sub> e/t aço)	15%	2019	2030	Escopos 1 e 2
<b>CSN Mineração S.A.</b>	Intensidade de Emissões (tCO <sub>2</sub> e/t produto)	30%	2020	2035	Escopos 1 e 2
<b>ArcelorMittal Brasil</b>	Neutralidade de Carbono	100%	N/A	2050	N/A
<b>J&amp;F Mineração S.A.</b>	N/A	Meta não formalizada	N/A	N/A	N/A

Fonte: Autor.

A Vale (2025) apresenta a meta absoluta mais agressiva para o médio prazo, visando um corte de um terço de suas emissões diretas até 2030. A Usiminas (2025) e a CSN Mineração (2025) optam por metas de intensidade, que atrelam a performance de descarbonização ao volume de produção. A meta da CSN Mineração, de uma redução de 30%, é particularmente ambiciosa para o setor de mineração. A ausência de uma meta quantitativa de médio prazo por parte da ArcelorMittal Brasil em seu relatório foca a ambição na meta de longo prazo (2050), enquanto a J&F Mineração (2023) ainda se encontra em fase de estruturação de seu inventário e metas.

#### Análise Comparativa da Eficácia das Tecnologias Adotadas

A eficácia das soluções de descarbonização é avaliada com base em indicadores de desempenho energético e ambiental extraídos dos relatórios.



- **Eletrificação e Eficiência:** A CSN Mineração (2025) apresenta o caso mais avançado de implementação, com nove equipamentos de grande porte 100% elétricos em operação. A J&F Mineração (2023) projeta um impacto quantificável ao planejar a substituição de 52 caminhões a diesel por um único Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD), com potencial para abater uma parcela significativa de suas emissões de Escopo 1.
- **Biomassa e Biocombustíveis:** A ArcelorMittal (2025) reporta o uso de 3,6 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal por ano, um substituto direto do coque fóssil. A Usiminas (2025), por sua vez, quantifica o benefício do uso de sucata, uma forma de economia circular, que evitou a emissão de 72 mil toneladas de CO<sub>2</sub> em 2024.
- **Energias Renováveis:** A CSN Mineração (2025) já opera com 100% de sua matriz elétrica proveniente de fontes renováveis. A ArcelorMittal (2025) se destaca pelo investimento direto de R\$ 5,8 bilhões em um portfólio de geração própria, que adicionará 835 MW de capacidade instalada e suprirá 60% de sua demanda elétrica até 2030. A Vale (2025) também atingiu 100% de energia renovável no Brasil e busca a mesma meta globalmente até 2030.

### 5.3.5 Avaliação de Custos e Benefícios

A análise de custos e benefícios é limitada pela confidencialidade dos dados financeiros. No entanto, os investimentos de capital (CAPEX) em projetos-chave servem como um *proxy* para o comprometimento financeiro das empresas com a transição.

- **Investimentos Iniciais (CAPEX):** A ArcelorMittal (2025) lidera com o já citado investimento de R\$ 5,8 bilhões em energia renovável. A Usiminas (2025) reporta um investimento de R\$ 2,7 bilhões na reforma do Alto-Forno 3, um projeto focado primariamente em eficiência operacional e integridade de ativos, mas que acarreta benefícios de redução de emissões.
- **Benefícios Ambientais Mensuráveis:** O principal benefício é a contribuição para o atingimento das metas de redução (Tabela 1). Adicionalmente, a Vale (2025) quantifica o benefício de sua estratégia de economia circular ("Waste to Value"), que recuperou 12,7 milhões de toneladas de minério de ferro a partir de rejeitos em 2024. A CSN Mineração (2025) projeta a produção de 6 milhões de toneladas anuais de *pellet feed* a partir de rejeitos de barragens, transformando um passivo ambiental em

receita. Dados sobre retorno sobre investimento (ROI) para esses projetos não são publicamente disponibilizados.

### 5.3.6 *Análise de Impactos Econômicos e Ambientais*

Uma análise abrangente, baseada em um modelo de avaliação multicritério, permite ponderar os impactos para além da simples redução de emissões.

- **Competitividade Industrial:** A estratégia da CSN Mineração (2025), com seu projeto P15 para produzir 16,5 milhões de toneladas/ano de *pellet feed* de alto teor, visa capturar um prêmio de mercado e garantir competitividade em uma economia de baixo carbono. Similarmente, os produtos da linha *XCarb*<sup>TM</sup> da ArcelorMittal (2025), que utilizam 22% de sucata em sua composição no Brasil, são desenhados para atender a uma demanda crescente por aço de baixo carbono.
- **Redução da Pegada de Carbono:** O impacto mais direto é a redução da pegada de carbono, conforme as metas quantitativas estabelecidas. A meta da Vale (2025) de reduzir em 15% suas emissões de Escopo 3 até 2035 é particularmente impactante, pois visa descarbonizar sua cadeia de valor, majoritariamente composta pela siderurgia.
- **Eficiência no Uso de Recursos:** A adoção de tecnologias de filtragem de rejeitos, reportada por todas as mineradoras, além de mitigar riscos de barragens, permite a recirculação de água e a transformação de rejeitos em coprodutos. A CSN Mineração (2025) destaca-se ao operar com 100% de seus rejeitos filtrados e empilhados a seco.
- **Inovação Tecnológica:** Os investimentos em projetos-piloto de hidrogênio verde e CCUS (VALE, 2025; ARCELORMITTAL, 2025) e a eletrificação de equipamentos de ultragrande porte (VALE, 2025) representam uma contribuição para a inovação tecnológica setorial, ainda que seus impactos quantitativos não sejam mensuráveis no presente estágio.

Quadro 4: Resumo das Análises comparativas

<b>Empresa</b>	<b>Meta de Redução (Escopo)</b>	<b>Ano Base/ Ano Alvo</b>	<b>Tecnologias/Estratégias</b>	<b>Investimento</b>	<b>Benefícios Ambientais Mensuráveis</b>
Vale S.A.	33% (Escopos 1 e 2) / 15% (Escopo 3)	2017/2030; 2018/2035	100% energia renovável no Brasil; hidrogênio verde; CCUS; eletrificação	R\$ 1, 4 bilhões (2024)	Recuperação de 12,7 mi t de minério via ‘Waste to Value’
Usiminas S.A.	15% (Escopos 1 e 2)	2019/2030	Uso de sucata; reforma do Alto-Forno 3	R\$ 2,7 bilhões	Evitou emissão de 72 mil tCO <sub>2</sub> em 2024
CSN Mineração	30% (Escopos 1 e 2)	2020/2035	9 equipamentos elétricos; matriz elétrica 100% renovável; filtragem de rejeitos	R\$ 57,8 milhões (Capex) R\$ 23,7 milhões (Opex) (2024)	Produção de 6 mi t/ano de pellet feed a partir de rejeitos
ArcelorMittal	Neutralidade de carbono	N/A/2050	Carvão vegetal; portfólio renovável (835 MW); linha XCarb™.	R\$ 5,8 bilhões	Suprirá 60% da demanda elétrica até 2030; redução via biomassa
J&F Mineração	Meta não formalizada	N/A	Substituição de 52 caminhões por TCLD; filtragem de rejeitos.	Não divulgado	Redução significativa de Escopo 1 com eletrificação

Fonte: Autor

A análise quantitativa revela que, embora os dados financeiros detalhados sejam limitados, os indicadores de performance ambiental e os investimentos de capital demonstram um engajamento robusto e financeiramente material das empresas estudadas na agenda de descarbonização. A eficácia das estratégias pode ser mensurada pelo progresso em direção às ambiciosas metas de redução de emissões estabelecidas para a próxima década.

## 6 CONCLUSÃO

Em síntese, a análise comparativa dos relatórios (VALE, 2025; ARCELORMITTAL, 2025; CSN MINERAÇÃO, 2025; USIMINAS, 2025; J&F MINERAÇÃO, 2023) revela que o setor de mineração e siderurgia apresenta um sistema de descarbonização dinâmico e multifacetado.

No topo da complexidade e da alocação de capital, a Vale S.A. (2025) e a ArcelorMittal S.A. (2025) atuam como "inovadores abrangentes". Elas utilizam sua escala global para pilotar simultaneamente múltiplas rotas tecnológicas, desde biocombustíveis e CCUS até o hidrogênio, e são as únicas a endereçar formalmente o desafio do Escopo 3, como demonstra a meta da Vale (2025) de redução líquida de 15% até 2035.

Em nível de foco estratégico mais concentrado, a CSN Mineração S.A. (2025) posiciona-se como a "especialista focada". A companhia direciona sua estratégia não para a diversidade tecnológica, mas para a excelência de um único produto (*pellet feed* > 67% Fe), que possui o poder de habilitar a descarbonização de toda a cadeia siderúrgica. A Usiminas S.A. (2025), por sua vez, age como a "otimizadora pragmática", constrangida pelo capital imobilizado de seu parque industrial, ela foca na maximização da eficiência de seus ativos existentes (reforma do Alto-Forno 3) e no uso de soluções maduras (biomassa, sucata) para ganhos incrementais.

Finalmente, a J&F Mineração (2023) emerge como a "competidora ágil". Por estar em estágio inicial, a empresa pode construir sua nova infraestrutura (como o TCLD e a planta de filtragem) já alinhada com os preceitos de eficiência e baixo risco, evitando a obsolescência de ativos que afeta as empresas mais antigas. Este mosaico de papéis—inovador, especialista, otimizador e ágil—demonstra que não há uma única estratégia vencedora, mas sim uma coexistência de abordagens adaptadas à maturidade, posição na cadeia de valor e capacidade de investimento de cada empresa.

Portanto, a conclusão fundamental desta análise é que a descarbonização da indústria de base (mineração e siderurgia) não será fruto de uma única solução mágica (*silver bullet*). Pelo contrário, ela será o resultado da convergência de múltiplas estratégias operando em diferentes escalas de tempo: a otimização incremental de ativos existentes (USIMINAS, 2025), a aplicação de tecnologias de transição de impacto imediato (como os briquetes da

Vale e a biomassa da ArcelorMittal) e a implementação de inovações (eletrificação de frotas e rotas de RD).

O sucesso nesta jornada dependerá de um equilíbrio rigoroso entre três pilares fundamentais. Primeiramente, a inovação tecnológica deve ser acelerada via investimentos em P&D para viabilizar soluções de baixa emissão em escala. Em paralelo, exige-se uma disciplina na alocação de capital, priorizando projetos que unam descarbonização à rentabilidade e resiliência. A governança corporativa deve consolidar a pauta climática como eixo central da estratégia, garantindo que as metas de sustentabilidade estejam intrinsecamente conectadas aos incentivos de performance e à tomada de decisão no mais alto nível.

Em última análise, a pressão pela descarbonização, embora se apresente como o maior desafio do século para estes setores *hard-to-abate*, é também a principal oportunidade de diferenciação competitiva e liderança de mercado. As empresas que, através da governança, inovação e disciplina de capital, conseguirem se posicionar como fornecedoras de soluções de baixo carbono não estarão apenas gerenciando um risco existencial, mas sim capturando o valor que definirá a próxima era da indústria pesada.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, L.; MEDEIROS, R. Descarbonização industrial e tecnologias emergentes: uma revisão crítica. *Journal of Cleaner Production*, 2025.

ARCELORMITTAL BRASIL. Relatório de Sustentabilidade 2025. [S.l.]: ArcelorMittal Brasil, 2025. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/sala-imprensa/publicacoes-relatorios/brasil/relatorio-de-sustentabilidade-2025>. Acesso em: 30 set. 2025.

ASUENE. Net-Zero Supply Chains: Decarbonization Trends and CO<sub>2</sub> Management in Transportation and Logistics. 2 abr. 2025. Disponível em: <https://asuene.com/us/blog/net-zero-supply-chains-decarbonization-trends-and-co%E2%82%822-management-in-transportation-and-logistics>. Acesso em: 12 maio 2025.

BAMBACH, M. et al. A review on the use of hydrogen in the iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 379, 134734, dez. 2022.

CAMPOS, Antônio Rodrigues de; LUZ, Adão Benvindo da; BASTOS, Flávia de Freitas; NOGUEIRA, Igor. Calcinação. In: CETEM (Org.). Tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2018. p. 727-752. Disponível em: <https://cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2018/capitulo16.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.

CLARK, Sophia; ADAMS, Henry. Industrial Electrification: A Pathway to Decarbonization. *Energy Conversion and Management*, 2022.

CSN MINERAÇÃO. Relato Integrado 2025. Disponível em: <https://esg.csn.com.br/nossa-empresa/relato-integrado-gri/>. Acesso em: 10 set. 2025.

CSN MINERAÇÃO. Relatório de Sustentabilidade 2025. [S. l.]: CSN Mineração, 2025.

DEPOSITPHOTOS. Cycle of biomass energy as direct combustion in a power plant – outline diagram. 2025. Disponível em:

<https://depositphotos.com/br/vector/cycle-of-biomass-energy-as-direct-combustion-in-power-plant-outline-diagram-493844858.html>. Acesso em: 26 jun. 2025.

DIAS SCHENK, Ana Carolina. Vale e GreenIron vão desenvolver projetos de descarbonização no Brasil e na Suécia. Revista Mineração, 7 jan. 2025. Disponível em: <https://www.revistamineracao.com.br/2025/01/07/vale-e-greeniron-vao-desenvolver-projetos-de-descarbonizacao-no-brasil-e-na-suecia>. Acesso em: 1º maio 2025.

DOHERTY, Sean; HOYLE, Seb; MULANI, Narendra; FRANKLIN, Rod; URIBE, Edgar; SIMCHI-LEVI, David; SHEFFI, Yossi. Supply Chain Decarbonization: The Role of Logistics and Transport in Reducing Supply Chain Carbon Emissions. World Economic Forum, 2009. Disponível em: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_LT\\_SupplyChainDecarbonization\\_Report\\_2009.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_LT_SupplyChainDecarbonization_Report_2009.pdf). Acesso em: 12 maio 2025.

DREAMSTIME. Biochar, biogás, bio-óleo e produção de energia por reator de pirólise. 2025. Disponível em: <https://pt.dreamstime.com/biochar-biogás-bio-óleo-e-produção-de-energia-por-reator-pirólise-biocombustível-para-convencional-ou-micro-ondas-esquema-image231540474>. Acesso em: 26 jun. 2025.

DREAMSTIME. Diagrama geral da produção de hidrogênio verde a partir de fontes de energia renováveis. 2025. Disponível em: <https://pt.dreamstime.com/diagrama-geral-da-produção-de-hidrogênio-verde-partir-fontes-energia-renováveis-ecológicas-explicação-do-processo-image256924694>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ERSKINE, Amanda N. et al. Effect of Compression and Moisture on Fluid Flow Through Packed Particle Beds of Crushed Ore Studied by High-Resolution X-ray Computed Tomography and the Lattice Boltzmann Method. Mining, Metallurgy & Exploration, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/42461>. Acesso em: 25 jun. 2025.

FAN, Z.; LI, M. Hydrogen-based direct reduction of iron ore and its perspectives. Journal of Iron and Steel Research International, v. 28, p. 525-539, 2021.

FINDORÁK, Róbert; MIŠKOVIČOVÁ, Zuzana; LEGEMZA, Jaroslav; DZURŇÁK, Róbert; BULKO, Branislav; DEMETER, Peter; EGRYOVÁ, Andrea; MALIŇÁK, Róbert. Experiments and Simulations on the Low-Temperature Reduction of Iron Ore Oxide Pellets with Hydrogen. *Metals*, v. 15, n. 3, p. 289, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met15030289>. Acesso em: 1º maio 2025.

HYBRIT DEVELOPMENT. A fossil-free future. Disponível em: <https://www.hybritdevelopment.com>. Acesso em: 9 maio 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Iron and Steel Technology Roadmap. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Acesso em: 30 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 30 set. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Technology Review of Hydrogen Carriers. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Global-hydrogen-trade-to-meet-the-1-5C-climate-goal-Technology>. Acesso em: 30 set. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Innovation Outlook: Renewable Energy in Industry. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/May/Innovation-Outlook-Renewable-Energy-in-Industry>. Acesso em: 30 set. 2025.

ISTOCK. Ilustrações sobre captura de carbono. 2025. Disponível em: <https://www.istockphoto.com/br/ilustra%C3%A7%C3%B5es/carbon-capture>. Acesso em: 26 jun. 2025.

J&F MINERAÇÃO. Relatório de Sustentabilidade 2025. [S. l.]: J&F Mineração, 2025.



JIN, Jiaqi; WANG, Shijie. Effect of Ball and Powder Filling Rate on the Evolution Behavior of Particles in Stirred Mills. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/42461>. Acesso em: 25 jun. 2025.

KOJOVIC, T. Influence of blast fragmentation on downstream processing. In: *ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE*, 31, 2005, Orlando. Proceedings... Cleveland: International Society of Explosives Engineers, 2005. p. 1-11.

LI, Sai; CHEN, Dongxu. Microstructure and mechanical properties of iron ore pellets under different firing conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/11665>. Acesso em: 25 jun. 2025.

MCKINSEY & COMPANY. Creating the zero-carbon mine. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/creating-the-zero-carbon-mine>. Acesso em: 12 maio 2025.

MCKINSEY & COMPANY. Como realizar a descarbonização nas cadeias de suprimento. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/making-supply-chain-decarbonization-happen/pt-BR>. Acesso em: 1º maio 2025.

MCKINSEY & COMPANY. The decarbonization conundrum: How to win in metals while getting to net zero. 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-decarbonization-conundrum-how-to-win-in-metals-while-getting-to-net-zero>. Acesso em: 30 set. 2025.

MELLO, Alexandre Valadares; RODRIGUES, Cinthia de Paiva; DIAS, Cláudia Franco de Salles; FERREIRA, Julio Cesar Nery; RATES, Luisa Gouvêa. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor Mineral 2024. Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 2024. Disponível em: [https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/05/IBRAM\\_Inventario-Efeito-Estufa\\_web-3.pdf](https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/05/IBRAM_Inventario-Efeito-Estufa_web-3.pdf). Acesso em: 12 maio 2025.

MINERAÇÃO USIMINAS. Relatório de Sustentabilidade 2025. Belo Horizonte: Mineração Usiminas, 2025.

MORRELL, S. A method for predicting the specific energy requirement of autogenous and semi-autogenous mills and its application. *Minerals Engineering*, v. 22, n. 6, p. 554-563, maio 2009.

REDAÇÃO SIDERURGIA BRASIL. Descarbonização no Brasil e na Suécia. Portal Siderurgia Brasil, 8 Jan. 2025. Disponível em: <https://siderurgiabrasil.com.br/2025/01/08/descarbonizacao-no-brasil-e-na-suecia>. Acesso em: 9 maio 2025.

SANTOS, J. V. O. et al. The use of charcoal in the iron ore pelletizing process: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 149, 111393, out. 2021.

SCHAAP, Famke; KARAMIRA, Astrid; BELLOIS, Grégoire; RAMDOO, Isabelle; HENDRIWARDANI, Murtiani. Decarbonization of the Mining Sector: Scoping study on the role of mining in nationally determined contributions. Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development, 2024. Disponível em: <https://www.iisd.org/system/files/2024-08/igf-decarbonization-mining-sector.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

SINGH, Amit Kumar; SINHA, Om Prakash; SINGH, Randhir. Reduction Behavior and Kinetics of Iron Ore–Charcoal Composite Pellets for Sustainable Ironmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 54, p. 823-832, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-023-02729-0>. Acesso em: 10 maio 2025.

SSAB. HYBRIT – Fossil-free steel. 2024. Disponível em: <https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/hybrit>. Acesso em: 30 set. 2025.

SUN, H. et al. A review on hydrogen-based direct reduction of iron ores. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 29, p. 2353-2381, mar. 2024.

SUN, Y.; LI, X.; WANG, Z. Advances in Hydrogen-Based Ironmaking: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024.

TAYLOR, J.; BROWN, O. Electrification of Industrial Processes: Opportunities and Challenges. *Applied Energy*, 2023.

UMAMAHESHWARAN, K. et al. Effect of firing conditions on the quality of iron ore pellets. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 32, n. 3, p. 221-231, 2005.

VALE. Vale e GreenIron assinam acordo para explorar projetos de descarbonização no Brasil e na Suécia. 7 jan. 2025. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-e-greeniron-assinam-acordo-para-explorar-projetos-de-descarbonizacao-no-brasil-e-na-suecia>. Acesso em: 10 maio 2025.

VALE S.A. Relato Integrado 2025. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/aboutvale/reports/integrated-report-2025>. Acesso em: 10 set. 2025.

VALE S.A. Relatório de Sustentabilidade Integrado 2025. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2025.

VALE S.A. Vale avança na descarbonização com primeiro teste de uso de biocarbono em pelletização. 2021. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/w/vale-avanca-na-descarbonizacao-com-primeiro-teste-de-uso-de-biocarbono-em-pelotizacao-1>. Acesso em: 30 set. 2025.

VALE S.A. Vale Day 2022: Presentation. 2022. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/vale-day-2022>. Acesso em: 30 set. 2025.

VALE S.A. Vale terá a primeira locomotiva 100% elétrica do Brasil em 2022. 2022. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/w/vale-tera-primeira-locomotiva-100-eletrica-do-brasil-em-2022>. Acesso em: 30 set. 2025.

WANG, Xi; LIU, Kun; WANG, Lian-yu. Energy balance of the BOF converter during swirl-type oxygen lance blowing process. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/42243>. Acesso em: 25 jun. 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM. The Net-Zero Challenge: The Supply Chain Opportunity. Geneva: WEF, 2021. Disponível em: <https://www.weforum.org/reports/the-net-zero-challenge-the-supply-chain-opportunity/>. Acesso em: 30 set. 2025.

YANG, Hua-rui; ZHANG, Xiao-di. Numerical Investigation of Free-Surface Rock Breakage by Disc Cutter. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/42461>. Acesso em: 25 jun. 2025.

ZHANG, Y.; LIU, H.; WANG, J. Challenges and Opportunities in the Decarbonization of the Iron and Steel Industry. *Journal of Cleaner Production*, 2024.

ZHOU, Jia-ying et al. Nanopore-assisted rapid Cr diffusion in irradiated additive-manufactured steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/42243>. Acesso em: 25 jun. 2025.