



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LILIAN DEYSE PINTO DA SILVA

COMPARAÇÃO ENTRE ALTO-FORNO E TECNORED: Redução de Emissões de CO₂
na Produção Sustentável de Ferro Primário – Uma Análise Bibliográfica

ANANINDEUA-PA

2025

LILIAN DEYSE PINTO DA SILVA

COMPARAÇÃO ENTRE ALTO-FORNO E TECNORED: Redução de Emissões de CO₂
na Produção Sustentável de Ferro Primário – Uma Análise Bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito a obtenção do título de Bacharel na área de concentração em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Me. Alacid Neves.

Coorientadora: Prof^ª. Me. Rafaela Farinha

ANANINDEUA-PA

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo
com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

D111c da Silva, Lilian Deyse Pinto.

COMPARAÇÃO ENTRE ALTO-FORNO E TECNORED :
Redução de Emissões de CO₂ na Produção Sustentável de Ferro
Primário – Uma Análise Bibliográfica / Lilian Deyse Pinto da Silva.
— 2025.
xiii, 52 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
Coorientador(a): Prof^ª. MSc. Rafaela Farinha
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de
Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Siderurgia, Tecnoled, Emissões de CO₂, Alto-Forno. I. Título.

CDD 620.11


LILIAN DEYSE PINTO DA SILVA

COMPARAÇÃO ENTRE ALTO-FORNO E TECNORED: Redução de Emissões de CO₂
na Produção Sustentável de Ferro Primário – Uma Análise Bibliográfica


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito a obtenção do título de Bacharel na área de concentração em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: Ananindeua – PA, 28/03/2025


Conceito: EXCELENTE

Documento assinado digitalmente
 **ALACID DO SOCORRO SIQUEIRA NEVES**
Data: 12/04/2025 17:38:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMat/CANAN/UFPA – Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **RAFAELA FARINHA FELIPE**
Data: 11/04/2025 13:58:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª Me. Rafaela Farinha Felipe
(PPGCEM/DEMA/UFSCar - Coorientadora)

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS VINICIUS DA SILVA PAULA**
Data: 10/04/2025 09:26:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula
(FEMat/CANAN/UFPA - Membro Interno)

Documento assinado digitalmente
 **GEYNA EVELLYN SILVA DE JESUS**
Data: 12/04/2025 07:31:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Me. Geyna Evellyn Silva de Jesus
(PPGG/UFPA Membro Externo)

Á Deus, ao meu marido, filhos e ao meu orientador pelo apoio e força durante toda a trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, sabedoria e força para enfrentar cada desafio ao longo desta caminhada. Sua presença foi essencial nos momentos de dificuldade, guiando meus passos e fortalecendo minha Fé para que eu nunca desistisse dos meus objetivos.

Agradeço aos meus filhos (Gabriela Nalu e Marcus Vinícius) pela companhia durante o caminhar de período letivo, pelas sonecas em sala de aula, pela participação nas aulas, pelas aventuras em eventos...enfim, este trabalho também é de vocês. Não podendo faltar as minhas filhas Bianca Ramos e Sabrina Ramos que sempre me impulsionaram e dando-me forças a nunca desistir dos meus sonhos.

Agradeço ao meu marido Edi Andrade por sempre acreditar no meu potencial, sendo possível a realização dos meus sonhos.

Agradeço de forma especial ao meu professor, psicólogo, terapeuta, conselheiro e orientador Alacid Neves cuja orientação, paciência e persistência foram fundamentais para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sua dedicação, paciência e vasto conhecimento não apenas enriqueceram este estudo, mas também contribuíram significativamente para o meu crescimento acadêmico e profissional. Sou grata por cada oportunidade, aprendizado e por todas as bênçãos recebidas durante este percurso, sem a sua luz e apoio, esta conquista não teria sido possível.

Cada orientação, sugestão e feedback foram essenciais para aprimorar meu trabalho e superar os desafios encontrados ao longo do processo.

Agradeço ainda pela confiança depositada em mim e pelo incentivo constante, que foram determinantes para que eu concluísse esta etapa com êxito.

Por fim, agradeço a todas as instituições e fontes que forneceram dados e informações valiosas, tornando este trabalho possível.

Este TCC é o resultado de um esforço coletivo, e sou imensamente grata por cada contribuição, atenção, comprometimento e disponibilidade demonstrados durante esta longa jornada.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King

RESUMO

A indústria siderúrgica é uma das maiores fontes de emissões de CO₂, principalmente devido ao processo tradicional de produção de ferro-gusa no Alto Forno, que depende do carvão mineral. Esse processo contribui significativamente para a emissão de gases de efeito estufa. Com as crescentes demandas por redução de emissões, alternativas sustentáveis, como o Tecnoled, têm ganhado destaque. Este estudo comparou o processo tradicional de produção de ferro-gusa via Alto Forno com a tecnologia Tecnoled, considerando aspectos ambientais, operacionais e econômicos. Utilizou-se uma revisão bibliográfica da literatura com análise de estudos de bases como Web of Science, Scopus, Science Direct e Acadêmico, focando nas implicações ambientais de cada processo. A análise mostrou que, apesar da eficiência do Alto Forno em produção em grande escala, ele é um grande emissor de CO₂. Já o Tecnoled se destaca pela redução de até 50% das emissões, ao utilizar biomassa e resíduos industriais no lugar do coque, sendo também mais flexível e com menor necessidade de infraestrutura, o que o torna acessível para novas instalações. Este estudo reforça a necessidade de adoção de tecnologias de baixo carbono, como o Tecnoled, para que a siderurgia atenda às metas globais de descarbonização e sustentabilidade. No entanto, a adoção em larga escala depende de validações industriais e políticas públicas que incentivem a transição para práticas mais sustentáveis.

Palavras-chave: siderurgia; Tecnoled; emissões de CO₂; alto-forno.

ABSTRACT

The steel industry is one of the largest sources of CO₂ emissions, primarily due to the traditional blast furnace process used to produce pig iron, which relies on mineral coal. This process significantly contributes to greenhouse gas emissions. With increasing demands for emission reductions, sustainable alternatives such as Tecnoled have gained prominence. This study compared the traditional blast furnace iron production process with the Tecnoled technology, considering environmental, operational, and economic aspects. An integrative literature review was conducted, analyzing studies from databases such as Web of Science, Scopus, Science Direct, and acadêmico, focusing on the environmental implications of each process. The analysis showed that, despite the blast furnace's efficiency in large-scale production, it remains a major CO₂ emitter. In contrast, Tecnoled stands out for its ability to reduce CO₂ emissions by up to 50%, using biomass and industrial waste as substitutes for coke, and it is more flexible with lower infrastructure requirements, making it a viable option for new installations. This study emphasizes the need for the adoption of low-carbon technologies, such as Tecnoled, for the steel industry to meet global decarbonization and sustainability goals. However, large-scale adoption depends on further industrial validations and public policies that promote the transition to more sustainable practices.

Keywords: steel industry; Tecnoled; CO₂ emissions; blast-furnace.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - O ALTO-FORNO E SUAS DIVISÓRIAS	21
FIGURA 2 - TIPOS DE BRIQUETES PARA ALTO-FORNO.....	29
FIGURA 3 - TIPO DE BRIQUETE PARA TECNORED	30
FIGURA 4 - FORNO TECNORED	32
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA METODOLOGIA.....	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ETAPAS DO PROCESSO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
TABELA 2 - PUBLICAÇÕES SOBRE DESCARBONIZAÇÃO NO SETOR MINERO-METALÚRGICO (2020–2024)	44
TABELA 3– ARTIGOS FORA DO ESCOPO AMBIENTAL/TECNOLÓGICO E SEM REVISÃO POR PARES (2020–2024)	45
TABELA 4 – QUANTIDADE DE REFERÊNCIAS E DISSERTAÇÕES RELACIONADAS AO PROCESSO DE ALTO-FORNO E TECNORED (2020–2024)	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problematização	15
1.2	Questões Norteadoras	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivos Específicos	16
1.4	Justificativa e Relevância	16
1.5	Contribuição do Estudo	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	A Indústria Siderúrgica	18
2.2	O Alto-Forno	19
2.2.1	Processo químico do Alto-Forno	20
2.3	O Processo Tecnoled	24
2.3.1	Processo químico da tecnologia Tecnoled	25
2.3.2	Decomposição dos Fundentes	27
2.4	Fabricação de Briquetes	28
2.4.1	Uso de Briquetes no Alto-Forno	28
2.4.2	Uso de Briquetes no Processo Tecnoled	30
2.5	O Processo Tecnoled e suas Inovações	30
2.5.1	Tipos de Resíduos Gerados no Tecnoled	31
2.5.2	Comparação de Processos (Alto-Forno x Tecnoled)	32
2.3.2.1	Eficiência Energética e Emissões de CO ₂	33
2.3.2.2	Resíduos e Impacto Ambiental	33
2.3.2.3	Viabilidade Econômica e Operacional	33
2.3.2.4	Perspectivas Futuras	33
2.5.3	Processos do Alto-Forno	34
2.3.3.1	Coqueria no Processo Tradicional	34
2.3.3.2	Alto-Forno: Sinterização no Processo Tradicional	34

2.5.4	Processos Tecnoired.....	34
2.3.4.1	A Eliminação da Coqueria e Sinterização	34
2.3.4.2	Vantagens da Biomassa e da Sustentabilidade no Processo Tecnoired	35
2.6	Protocolo de Quioto.....	37
2.7	O Acordo de Paris	38
2.8	A Conferência das Partes (COP): Uma Análise Contemporânea	39
2.8.1	COP 29: Ambições Climáticas em um Contexto Geopolítico Desafiador	39
2.8.2	COP 30: Perspectivas Futuras e a Relevância do Brasil.....	40
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	Etapa 1: Identificação do tema e seleção da hipótese ou questão de pesquisa para a elaboração da revisão bibliográfica.	43
3.2	Etapa 2: Estabelecimento de critérios para inclusão e exclusão de estudos/ amostragem ou busca na literatura	43
3.3	Etapa 3: Definição das informações a serem extraídas dos estudos selecionados/ categorização dos estudos	46
3.4	Etapa 4: Avaliação dos estudos incluídos na revisão bibliográfica	47
3.5	Etapa 5: Interpretação dos resultados.....	47
3.6	Etapa 6: Apresentação da revisão/síntese do conhecimento.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Limitações Ambientais e Econômicas das Tecnologias tradicionais na Siderurgia: o caso do alto-forno	48
4.1.1	Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)	48
4.1.2	Uso de Recursos Naturais Não Renováveis	48
4.1.3	Custo Operacional Elevado	49
4.1.4	Impactos Ambientais Relacionados ao Processo de Coqueria e Sinterização.....	49
4.1.5	Baixa Eficiência Energética.....	49
4.2	Contribuição do Tecnoired para a redução das emissões de CO₂ no setor minero-metalúrgico	50
4.2.1	Substituição do Carvão Mineral por Biomassa.....	50
4.2.2	Eliminação da Coqueria e da Sinterização.....	50

4.2.3	Melhoria da Eficiência Energética.....	51
4.2.4	Uso de Resíduos Siderúrgicos e Materiais Recicláveis.....	51
4.2.5	Alinhamento com as Metas de Sustentabilidade e Descarbonização	52
4.3	Barreiras para a adoção em larga escala de tecnologias inovadoras como o Tecnoled...	52
4.3.1	Alto Custo Inicial de Implementação.....	52
4.3.2	Falta de Infraestrutura Adequada	53
4.3.3	Dependência de Políticas Públicas e Incentivos Governamentais	53
4.3.4	Resistência à Mudança e Conservadorismo Industrial.....	53
4.3.5	Desafios Técnicos e Necessidade de Capacitação.....	54
4.3.6	Escalabilidade e Acesso à Biomassa.....	54
5	EXPANSÃO DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA NO PARÁ: O DESENVOLVIMENTO DA NOVA ACIARIA DE MARABÁ.....	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A busca pela sustentabilidade vai muito além de preocupações relativas apenas com o meio ambiente. Segundo Ferreira *et al.* (2014), ela deveria ser considerada como um grande guarda-chuva de proteção à sociedade, sendo uma cadeia de ações que eleva os padrões ambientais, econômicos e sociopolíticos da população.

Os efeitos das mudanças climáticas são cada vez mais evidentes, o que têm motivado acordos de descarbonização globais. O Brasil, por exemplo, no acordo de Paris, comprometeu-se a reduzir até 2025 suas emissões de gases de efeito estufa em até 37%, estendendo essa meta para 43% até 2030 (WWF BRASIL, 2020).

Assim, com o aumento da cobrança e das novas regulamentações de redução de gases de efeito estufa, reafirmados na 26ª Conferência das Partes (COP26) da Convenção da Federação das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, tem-se impulsionado a transformação no setor minero-metalúrgico, como é visto no estudo da Agência Internacional de Energia – IEA (2021, p.13).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021, p. 11), a indústria minero-metalúrgica é altamente dependente de combustíveis fósseis, com 80% da produção global baseada na rota primária, cujo consumo energético é oito vezes maior que o da rota secundária, que utiliza sucata. Por sua dependência do carvão mineral, o setor se destaca como um dos principais emissores de gases de efeito estufa, sendo responsável por 7% das emissões globais de CO₂ relacionadas ao uso de energia e processos industriais. Sem iniciativas de mitigação, a demanda global por aço pode crescer mais de 30% até 2050, resultando em um aumento significativo nas emissões atuais de CO₂ (IEA, 2021, p. 11).

Para atender às metas globais de redução de emissões, a indústria do aço deve reduzir sua pegada de carbono em pelo menos 50% até 2050. Esse desafio exige a adoção de novas tecnologias de eficiência energética, além da busca por matérias-primas e fontes energéticas alternativas. A intensidade energética da produção siderúrgica depende de fatores como a proporção de sucata utilizada e a qualidade do minério de ferro empregado no processo (IEA, 2021, p. 12).

A contribuição das usinas siderúrgicas é significativamente importante para a economia mundial, mas é altamente intensiva na emissão de gás de CO₂ e no consumo de energia, uma vez que a rota de carvão mineral é dominante na produção de ferro, tornando-se uma indústria

contribuinte para mudanças climáticas. Além da utilização eficiente dos gases da siderurgia para fornecimento de energia e calor, a implantação de captura de carbono e a utilização de energia renovável são uma necessidade urgente para a transição da indústria siderúrgica carbono neutro, para a neutralidade de carbono produzido no processo siderúrgico (Xi *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021).

O alto-forno, tecnologia tradicional na produção de ferro-gusa, apresenta uma alta eficiência em larga escala. Contudo, suas limitações incluem a necessidade de coque como matéria-prima proveniente do carvão mineral, como insumo principal, elevando custos e emissões de CO₂. Apesar de adaptações como enriquecimento de hidrogênio e captura de carbono, o processo tradicional enfrenta desafios crescentes diante das metas globais de redução de emissões (Haifeng *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2023). Adicionalmente, estudos destacam que, mesmo com avanços, a eficiência ambiental do alto-forno ainda é insuficiente para atender às demandas contemporâneas (Miyake *et al.*, 2022).

Por outro lado, o processo TecnoRed apresenta-se como uma alternativa promissora, eliminando a necessidade de coque e permitindo o uso de biomassa como combustível, além de resíduos industriais, o que contribui para a redução das emissões de carbono na siderurgia (BNDES, 2024). Essa abordagem promove maior sustentabilidade ao setor e está alinhada às diretrizes de transição energética justa para as indústrias no Brasil (Cebri, 2025)

Este método reduz significativamente as emissões, alcançando até 50% menos CO₂ em comparação ao alto-forno tradicional. Além disso, sua flexibilidade operacional e menor necessidade de infraestrutura tornam-no mais acessível para novas instalações (Costa *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2023). Contudo, a escalabilidade do TecnoRed ainda depende de maior aceitação industrial e validações em larga escala, embora os benefícios ambientais e econômicos sejam inegáveis (Matsuo *et al.*, 2021).

1.1 Problematização

O setor minero-metalúrgico, essencial para a economia global, enfrenta um paradoxo crítico: sua dependência de combustíveis fósseis e o uso intensivo de energia geram emissões significativas de CO₂, contribuindo para as mudanças climáticas. Embora iniciativas globais, como o Acordo de Paris, pressionem pela descarbonização, tecnologias tradicionais, como o alto-forno, permanecem majoritárias, e assim contribuem como barreira no atendimento às

metas de redução de emissões. A urgência de novas abordagens tecnológicas e o uso de energias renováveis tornam-se imprescindíveis para mitigar impactos ambientais sem comprometer a produção de ferro primário.

1.2 Questões Norteadoras

1. Quais são as principais limitações ambientais e econômicas das tecnologias tradicionais na siderurgia, como o alto-forno?
2. De que forma o TecnoRed pode contribuir para a redução das emissões de CO₂ no setor minero-metalúrgico?
3. Quais barreiras existem para a adoção em larga escala de tecnologias inovadoras como o TecnoRed?

1.3 Objetivos

O objetivo deste estudo se propõe a realizar uma comparação entre o processo tradicional de produção de ferro gusa via Alto Forno e a tecnologia inovadora do TecnoRed, considerando aspectos ambientais, operacionais e econômicos.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Comparar a aplicabilidade do alto forno com o TecnoRed;
- Avaliar os modos de fabricação e uso do briquete em ambos os processos;
- Considerar os ganhos ambientais entre os dois processos: Alto forno x TecnoRed;
- Comparar as características econômicas entre o alto forno e o TecnoRed;
- Avaliar os processos operacionais da obtenção do ferro primário entre o alto forno e o TecnoRed.

1.4 Justificativa e Relevância

O estudo sobre alternativas sustentáveis no setor minero-metalúrgico é essencial para alinhar o processo produtivo industrial às metas globais de descarbonização. Com o aumento da demanda por aço até 2050 e a pressão por eficiência ambiental, a pesquisa sobre tecnologias

emergentes, como o TecnoRed, é de grande relevância para impulsionar uma transição industrial que balanceie necessidades econômicas e ambientais.

Além disso, sua análise pode fomentar políticas públicas e investimentos privados em inovação sustentável. Assim, a revisão de literatura apresentada será uma análise de tecnologias que usa fontes renováveis de combustíveis em relação a outro processo, cujo o uso não é rota principal.

1.5 Contribuição do Estudo

Este estudo amplia o entendimento sobre as limitações do alto-forno, identificando lacunas tecnológicas, possibilita oportunidades de inovação na rota tradicional, com o uso do TecnoRed e ao enfatizar o impacto das emissões e a viabilidade de alternativas, promove uma base científica para iniciativas de mitigação dos impactos ambientais.

A análise do TecnoRed como tecnologia emergente demonstra seu potencial para transformar a indústria siderúrgica, destacando benefícios ambientais, econômicos e operacionais. O estudo pode orientar estratégias industriais e políticas públicas, acelerando a transição para práticas de produção sustentável.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta fase são definidas as strings (descritores) utilizadas para busca na literatura e as bases de dados a serem pesquisadas. O levantamento bibliográfico deste trabalho foi feito em três etapas, conforme ilustrado na Tabela 1, e as bases de dados utilizadas foram: Web of Science, Google Acadêmico, Science Direct e Scopus.

Tabela 1 - Etapas do processo de revisão bibliográfica

<i>Etapa</i>	<i>Atividades</i>	<i>Bases de Dados</i>	<i>Referências Utilizadas</i>
Etapa 1: Identificação do tema e seleção da questão	Definir o foco do estudo e a hipótese principal sobre tecnologias no setor siderúrgico.	Web of Science, Science Direct, Scopus, Acadêmico	5
Etapa 2: Estabelecimento de critérios	Estabelecer critérios como ano de publicação, escopo ambiental e relevância ao tema.	Web of Science, Science Direct, Scopus, Acadêmico	6
Etapa 3: Busca e análise da literatura	Realizar buscas nas bases de dados selecionadas e categorizar os estudos com base em relevância.	Web of Science, Science Direct, Scopus, Acadêmico	14

Fonte: Elaborado pela autora

2.1 A Indústria Siderúrgica

Para Monteiro *et al.* (2023), a indústria siderúrgica desempenha um papel crucial na economia global, sendo uma das maiores responsáveis pela produção de aço, essencial para setores como construção civil, transporte e manufatura. Contudo, a siderurgia enfrenta desafios consideráveis, principalmente em relação às emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Estudo realizado por Jacomino *et al.* (2023) destaca que a indústria siderúrgica brasileira, por exemplo, é uma das principais fontes de emissões de CO₂ no país, o que exige uma adoção urgente de tecnologias e políticas públicas para reduzir essas emissões e alinhar-se aos compromissos do Acordo de Paris.

A redução da intensidade de carbono, de origem fóssil, na produção de aço é um desafio contínuo e uma área de grande interesse para a pesquisa. Monteiro *et al.* (2023) abordam que a injeção de oxigênio nos altos-fornos e o uso de gás natural na geração de energia elétrica são práticas tecnológicas que contribuem substancialmente para a diminuição das emissões.

Monteiro *et al.* (2023) ainda afirmam que a injeção de oxigênio, por exemplo, pode gerar economias de até R\$ 94,00 por tonelada de gusa produzido, representando uma alternativa interessante para a redução de emissões e o aumento da eficiência da produção.

A eficiência energética também é um fator crítico no setor siderúrgico. A implementação de medidas para melhorar a eficiência energética pode reduzir o consumo de energia e diminuir as emissões de GEE. De acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2023), a indústria siderúrgica possui potencial de melhoria de sua eficiência energética em até 18%, o que pode contribuir significativamente para a sustentabilidade do setor e para os objetivos de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Além disso, as inovações tecnológicas têm impactado positivamente a indústria siderúrgica, com o uso de tecnologias digitais e automação. Radar do Futuro (2023) relata que a revolução digital tem otimizado processos industriais, reduzindo desperdícios e melhorado a eficiência operacional, além de contribuir para a sustentabilidade do setor, aumentando sua competitividade no cenário global.

Portanto, a indústria siderúrgica encontra-se em um processo contínuo de transformação, com o objetivo de reduzir seus impactos ambientais enquanto mantém sua relevância econômica. O desenvolvimento e a implementação de tecnologias inovadoras, juntamente com políticas públicas eficazes e práticas de eficiência energética, são fundamentais para garantir a sustentabilidade e a competitividade do setor siderúrgico a longo prazo.

2.2 O Alto-Forno

O alto-forno é um reator metalúrgico amplamente utilizado na siderurgia para a produção de ferro-gusa, o qual é posteriormente transformado em aço. Entre 2020 e 2025, diversos estudos científicos buscaram aprimorar os aspectos técnicos e ambientais desse processo.

Nakayama (2020) analisa a complexidade das reações químicas e físicas que ocorrem no alto-forno, destacando a interação entre os estados sólido, líquido e gasoso. O autor sugere que a otimização dessas reações pode aumentar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais do processo.

Carvalho (2021) explora o uso sustentável da escória de alto-forno, um subproduto do processo siderúrgico, para a correção da acidez do solo. A autora argumenta que essa aplicação agrônômica não apenas promove a reciclagem de resíduos industriais, mas também contribui para a redução do impacto ambiental causado pela siderurgia.

Por outro lado, Hebeda *et al.* (2023) discutem alternativas para reduzir o consumo de carvão mineral no alto-forno, uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa na siderurgia. O estudo destaca que o uso de fontes de carbono renováveis, como biomassa, pode ser uma solução viável para mitigar os efeitos ambientais associados ao processo.

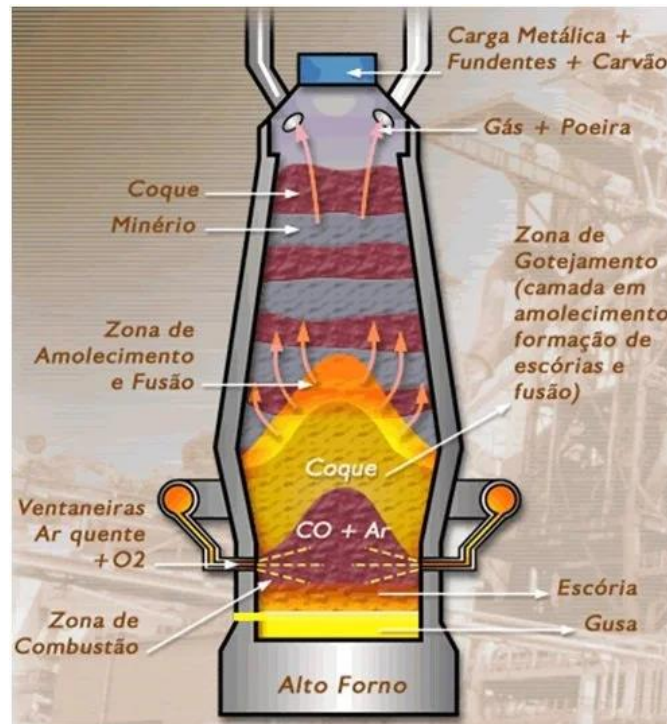
Esses estudos refletem o esforço contínuo da comunidade científica em aliar eficiência produtiva à sustentabilidade ambiental, tornando o processo de alto-forno mais alinhado aos objetivos globais de descarbonização.

Pesquisas recentes destacam as divisões fundamentais dessa estrutura, cada uma com funções específicas que otimizam o processo de redução e fusão dos materiais introduzidos no sistema (Studocu, 2023; SlideShare, 2023).

2.2.1 Processo químico do Alto-Forno

O processo de produção de ferro-gusa em um alto-forno é um procedimento complexo que transforma minério de ferro em ferro metálico por meio de uma série de reações químicas e físicas. Na Figura 1 destacaremos as principais partes do alto-forno e as reações químicas associadas a cada etapa (Souza *et al.*, 2022).

Figura 1 - O Alto-Forno e suas divisórias



Fonte: <https://bepex.com.br/como-e-feito-o-aco/>. 2025

a) Zona de Carga (Topo do Alto-Forno)

A zona de carga é a região superior do alto-forno, onde os materiais brutos são introduzidos em camadas alternadas. Esses materiais incluem o minério de ferro (na forma de sinter, pelotas ou granulado), o coque e os fundentes (calcário e dolomita). O objetivo dessa zona é garantir uma distribuição homogênea dos materiais, permitindo uma redução eficiente e um melhor fluxo dos gases no interior do forno (Souza *et al.*, 2022).

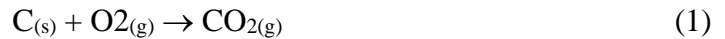
Os processos químicos na zona de carga envolvem a pré-redução dos óxidos de ferro pela ação do monóxido de carbono ascendente.



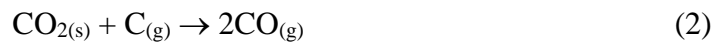
Essas reações ocorrem em temperaturas mais baixas, preparando o minério para as etapas seguintes (Lima e Ferreira, 2023).

b) Zona de Combustão

Localizada na parte inferior do alto-forno, nesta zona ocorre a injeção de ar quente através das ventaneiras, promovendo a combustão do coque (carbono). Essa reação exotérmica gera dióxido de carbono (CO₂) e libera calor intenso, elevando a temperatura para aproximadamente 2000°C (Silva *et al.*, 2023).



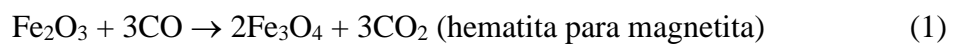
O dióxido de carbono produzido pode reagir adicionalmente com o carbono do coque para formar monóxido de carbono (CO), um agente redutor essencial no processo.



c) Zona de Redução Direta

A redução direta ocorre nas temperaturas mais elevadas da coluna do alto-forno e envolve a conversão do ferro em estado sólido para ferro metálico sem passar por um estágio gasoso intermediário. O carbono presente no coque atua diretamente como agente redutor:

Os gases ascendentes ricos em monóxido de carbono entram em contato com o minério de ferro descendente, provocando a redução dos óxidos de ferro em diferentes estágios, tais como:



Nesta etapa, o monóxido de carbono atua como agente redutor, convertendo os óxidos de ferro em ferro metálico (Almeida e Santos, 2021).

d) Zona de Amolecimento

Na zona de amolecimento, ocorre a fusão parcial dos materiais à medida que a temperatura aumenta. O ferro ainda não está totalmente fundido, mas começa a perder sua rigidez estrutural. Durante essa fase, as reações químicas de redução continuam ocorrendo, preparando o minério para a fusão completa. Essa reação evidencia a redução direta, onde o ferro se forma sem a necessidade de passar por um estado intermediário gasoso. (Costa *et al.*, 2022).



e) Zona de Fusão

O ferro metálico formado na zona de redução desce para regiões de maior temperatura, onde ocorre sua fusão, resultando no ferro-gusa líquido. Simultaneamente, os fundentes adicionados, como calcário (CaCO_3), se decompõem e reagem com as impurezas presentes, formando a escória líquida (Costa *et al.*, 2022):



O óxido de cálcio (CaO) reage com a sílica (SiO_2) presente no minério, formando silicato de cálcio (CaSiO_3)



f) Zona de Escorificação

A escória líquida, menos densa, flutua sobre o ferro-gusa líquido. A escória atua como uma camada protetora, prevenindo a oxidação do ferro-gusa e facilitando a remoção de impurezas como silício, manganês e fósforo (Rodrigues e Pereira, 2024).

g) Zona de Resfriamento

Após a separação da escória, o ferro-gusa líquido é extraído pela parte inferior do alto-forno e direcionado para moldes ou para a aciaria, onde será refinado para a produção de aço. A escória também é retirada e pode ser utilizada em diversas aplicações, como na produção de cimento (Fernandes, 2025).

h) Coleta de gases e poeira

O alto-forno gera uma grande quantidade de gases e partículas durante o processo. Para minimizar impactos ambientais e melhorar a eficiência energética, os gases são coletados e tratados. O gás de alto-forno contém CO, CO₂, N₂ e pequenas quantidades de poeira metálica. Ele é purificado por meio de ciclones e lavadores para remoção de partículas e posteriormente utilizado como combustível em outros processos siderúrgicos (Mendes e Alves, 2023).

2.3 O Processo TecnoRed

A TecnoRed é uma empresa brasileira que desenvolve soluções tecnológicas inovadoras no campo da siderurgia, com foco na sustentabilidade e redução das emissões de carbono na produção de ferro-gusa. O principal objetivo da empresa é promover a descarbonização do setor siderúrgico por meio do uso de biomassa e outros combustíveis renováveis, substituindo processos tradicionais que geram altas emissões de gases de efeito estufa (VALE, 2025).

Diferentemente do alto-forno tradicional, que depende do coque como agente redutor, o TecnoRed permite o uso de fontes alternativas de carbono, como biomassa e carvão vegetal, reduzindo em até 100% as emissões líquidas de CO₂, especialmente quando o carvão vegetal é proveniente de fontes renováveis (Santos e Oliveira, 2024). Além disso, essa tecnologia possibilita a utilização de resíduos industriais, promovendo a economia circular na indústria siderúrgica.

Outro aspecto relevante é a eficiência energética do processo. De acordo com Costa *et al.* (2025), o TecnoRed opera em temperaturas mais baixas que o alto-forno convencional, resultando em menor consumo energético e custos reduzidos na produção do ferro-gusa.

O avanço dessa tecnologia no Brasil tem sido liderado por empresas como a Vale, que investe na implementação de plantas industriais baseadas no processo TecnoRed. A unidade

prevista para o segundo semestre de 2025, em Marabá (PA), representa um marco na descarbonização da siderurgia nacional, garantindo um suprimento mais sustentável de ferro-gusa para a indústria do aço (Sinobras, 2025).

A Tecnored surgiu com o intuito de transformar a indústria do ferro-gusa, utilizando uma tecnologia que permite o uso de diferentes matérias-primas, como finos de minério de ferro, resíduos siderúrgicos e lama de barragens. O processo desenvolvido pela empresa utiliza fornos compactos e flexíveis que aceitam tanto carvão térmico quanto biomassa carbonizada, como o bagaço de cana e o eucalipto. Esses combustíveis são convertidos em briquetes, que são usados para a produção de um ferro-gusa com menor impacto ambiental, conhecido como "gusa verde" (VALE, 2025).

A empresa possui um Centro Tecnológico de Pesquisa e Desenvolvimento localizado em Pindamonhangaba, São Paulo, onde realiza testes laboratoriais e industriais. Esse centro tem como objetivo aperfeiçoar as tecnologias desenvolvidas pela Tecnored e realizar estudos de viabilidade econômica e sustentabilidade para a aplicação das suas inovações na indústria siderúrgica (Tecnored, 2025).

Além disso, a Tecnored busca eliminar processos industriais tradicionais, como a coqueria e a sinterização, que são altamente intensivos em emissões de carbono, contribuindo assim para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A planta comercial da empresa, localizada em Marabá, Pará, é um exemplo do compromisso da Tecnored com a sustentabilidade, utilizando biomassa para a produção de ferro-gusa de baixo carbono (VALE, 2025).

Em 2020, a Vale adquiriu 100% das ações da Tecnored, reforçando o seu compromisso com a inovação e a sustentabilidade. Como parte dessa aquisição, a empresa instalou uma planta de demonstração industrial em Pindamonhangaba com capacidade de produção de 75 mil toneladas por ano, onde são realizados testes para validar a tecnologia e avaliar sua viabilidade econômica (Tecnored, 2025).

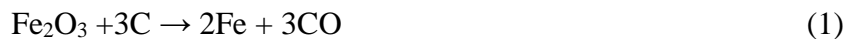
2.3.1 Processo químico da tecnologia Tecnored

O processo Tecnored é uma tecnologia alternativa ao alto-forno para a produção de ferro primário, utilizando carvão vegetal, biomassa ou finos de carvão mineral como redutor, o que reduz

significativamente as emissões de CO₂. Ele emprega uma rota de redução direta com a formação de um sínter autorredutor, eliminando a necessidade de coque e sínter tradicionais (Silva e Oliveira, 2023).

a) Redução dos óxidos de Ferro

O TecnoRed utiliza um sínter autorredutor contendo óxidos de ferro (Fe₂O₃, Fe₃O₄) misturados com um agente redutor sólido (carvão vegetal, biomassa ou finos de carvão). A reação principal ocorre conforme segue:



O monóxido de carbono (CO) gerado também atua como redutor secundário, promovendo reações adicionais (Ferreira e Costa, 2021).

b) Redução Indireta por Monóxido de Carbono

Além da redução direta pelo carbono sólido, há reações gasosas dentro do reator, onde o CO reduz os óxidos de ferro.



Esse processo ocorre a temperaturas menores que as do alto-forno, contribuindo para uma menor geração de carbono (Ferreira e Costa, 2021).

c) Geração de Gases Redutores pelo Boudouard

A reação de Boudouard desempenha um papel importante na geração de CO a partir de CO₂, aumentando a eficiência do processo.



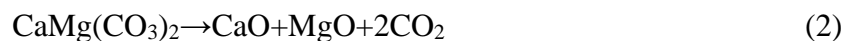
Essa reação mantém um ambiente redutor dentro do forno, essencial para evitar a oxidação do ferro metálico formado (Ferreira e Costa, 2021).

d) Controle da Escória e Formação do Ferro Metálico

- A formação controlada da escória ocorre com a adição de fundentes, garantindo a fluidez do processo.
- O ferro metálico produzido é separado da escória ao final do processo.

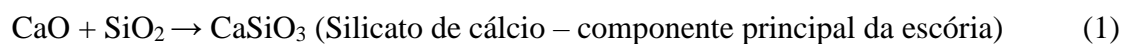
2.3.2 Decomposição dos Fundentes

Segundo Santos *et al.* (2022), os fundentes adicionados sofrem decomposição térmica. O óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO) resultantes ajudam a reagir com os compostos indesejáveis na ganga do minério.



a) Formação da Escória

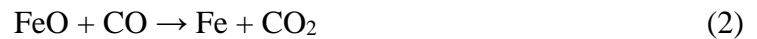
Os óxidos de ferro impuros e a sílica do minério interagem com os fundentes, formando silicatos e aluminatos, que compõem a escória (Santos *et al.* 2022)



Essa formação da escória garante que as impurezas sejam removidas do ferro líquido.

b) Formação do ferro metálico e separação

Almeida e Rocha (2024) em sua pesquisa relatam que, enquanto a escória flutua sobre o ferro fundido, a redução dos óxidos de ferro ocorre simultaneamente.



O ferro metálico denso se deposita no fundo do forno, enquanto a escória, mais leve, é separada e descartada ou reaproveitada para outros fins (ex.: cimento, pavimentação).

2.4 Fabricação de Briquetes

A fabricação de briquetes envolve a compactação de materiais finos, como resíduos de biomassa ou carvão, para formar blocos densos que servem como combustíveis ou agentes redutores. O processo de briquetagem é influenciado por variáveis como pressão, temperatura e propriedades dos materiais utilizados, afetando diretamente a qualidade e eficiência dos briquetes produzidos. Estudos recentes destacam a importância de otimizar essas variáveis para melhorar a densidade energética e a resistência mecânica dos briquetes, tornando-os mais adequados para aplicações industriais (Furtado *et al.*, 2020).

2.4.1 Uso de Briquetes no Alto-Forno

No processo tradicional de alto-forno, o ferro-gusa é produzido pela redução do minério de ferro utilizando coque como principal agente redutor e combustível. A introdução de briquetes de biomassa ou carvão mineral não coqueificável como substitutos parciais do coque pode reduzir o consumo deste e as emissões de CO₂ associadas. Contudo, a eficiência dessa substituição depende das propriedades dos briquetes, como resistência à compressão e reatividade, que devem ser compatíveis com as condições severas do alto-forno. Pesquisas indicam que briquetes com alta densidade e resistência mecânica são essenciais para suportar as cargas e temperaturas elevadas do alto-forno, garantindo uma operação estável e eficiente (Furtado *et al.*, 2020).

Figura 2 - Tipos de Briquetes para Alto-Forno

Briquete Metalizado

Briquete Auto Redutor

Briquete Carvão

Fonte: <https://elloindustria.com/produtos-e-servicos>, 2025

- a) Briquete Metalizado: é um tipo de briquete com alto teor de ferro metálico, desenvolvido para uso em siderúrgicas. Este produto é projetado para aumentar a eficiência produtiva e o rendimento na carga metálica dos altos-fornos. De acordo com a Ello Indústria, o briquete metalizado é uma "solução customizada para aumento de rendimento produtivo e ganho de produção em carga metálica" (Ello Indústria, 2023);
- b) Briquete autoreductor: é um aglomerado que combina minério de ferro e agentes redutores, como carvão, em sua composição. Essa configuração permite que a redução dos óxidos de ferro ocorra internamente durante o processo de aquecimento, aumentando a eficiência energética e reduzindo a necessidade de combustíveis externos. A Ello Indústria destaca que o briquete autoreductor possui "propriedades de auto redução no alto-forno", oferecendo uma "solução customizada para redução em consumo de combustível e energia, tornando o processo mais eficiente como um todo" (Ello Indústria, 2023);
- c) Briquete de Carvão no Alto-Forno: é produzido pela aglomeração de partículas finas de carvão vegetal ou mineral, utilizando ligantes para formar blocos compactos. No contexto dos altos-fornos, esses briquetes podem substituir parcialmente o coque, contribuindo para a redução de custos e emissões. "O briquete é capaz de substituir com eficiência o gás, a energia elétrica, o carvão vegetal, o carvão mineral, a lenha e outros tipos de combustíveis" (Wikipédia, 2023).

2.4.2 Uso de Briquetes no Processo TecnoRed

O processo TecnoRed é uma tecnologia inovadora que utiliza aglomerados autorredutores, eliminando a necessidade de coque e permitindo o uso de uma variedade de combustíveis, incluindo biomassa. Os briquetes produzidos para o TecnoRed são projetados para serem autorredutores, combinando minério de ferro e agentes redutores em uma única unidade. Essa configuração permite uma redução mais eficiente e controlada do ferro, além de flexibilizar o uso de diferentes materiais carbonosos, desde carvão mineral não coqueificável até biomassa carbonizada. A flexibilidade do processo TecnoRed em aceitar diversos tipos de briquetes contribui para a sustentabilidade e eficiência energética da produção de ferro-gusa (Tecnogal, 2020).

Figura 3 - Tipo de Briquete para TecnoRed



Fonte: <https://www.tecnored.com.br/nossa-tecnologia,2022>

2.5 O Processo TecnoRed e suas Inovações.

O TecnoRed é um processo inovador de produção de ferro-gusa que utiliza finos de minério de ferro e carvão mineral não coqueificável como matérias-primas, eliminando a necessidade de coqueificação e sinterização. Este método oferece uma alternativa sustentável para a siderurgia convencional, com foco na redução de emissões de CO₂ e na flexibilização de combustíveis, incluindo o uso de biomassa (Noldin *et al.*, 2021).

O processo TecnoRed se distingue por suas etapas simplificadas e sua eficiência energética. Ele envolve três fases principais:

- 1) Secagem e Aquecimento: as pelotas aglomeradas, compostas por finos de minério de ferro e carvão, são aquecidas, permitindo a evaporação de umidade e o início das reações químicas (Silva *et al.*, 2022);
- 2) Redução: o carbono presente nas pelotas reage com óxidos de ferro também contido nas pelotas, formando ferro metálico e gases como monóxido de carbono (CO). Esta etapa é conduzida em um forno de cuba vertical, otimizando a eficiência térmica (Li *et al.*, 2023);
- 3) Fusão: o ferro metálico é fundido, resultando em ferro-gusa líquido, que é coletado na base do forno para posterior uso (Zhang; Wang, 2023);

2.5.1 Tipos de Resíduos Gerados no TecnoRed

Embora o TecnoRed seja projetado para minimizar impactos ambientais, ele ainda gera resíduos que demandam tratamento adequado, tais como:

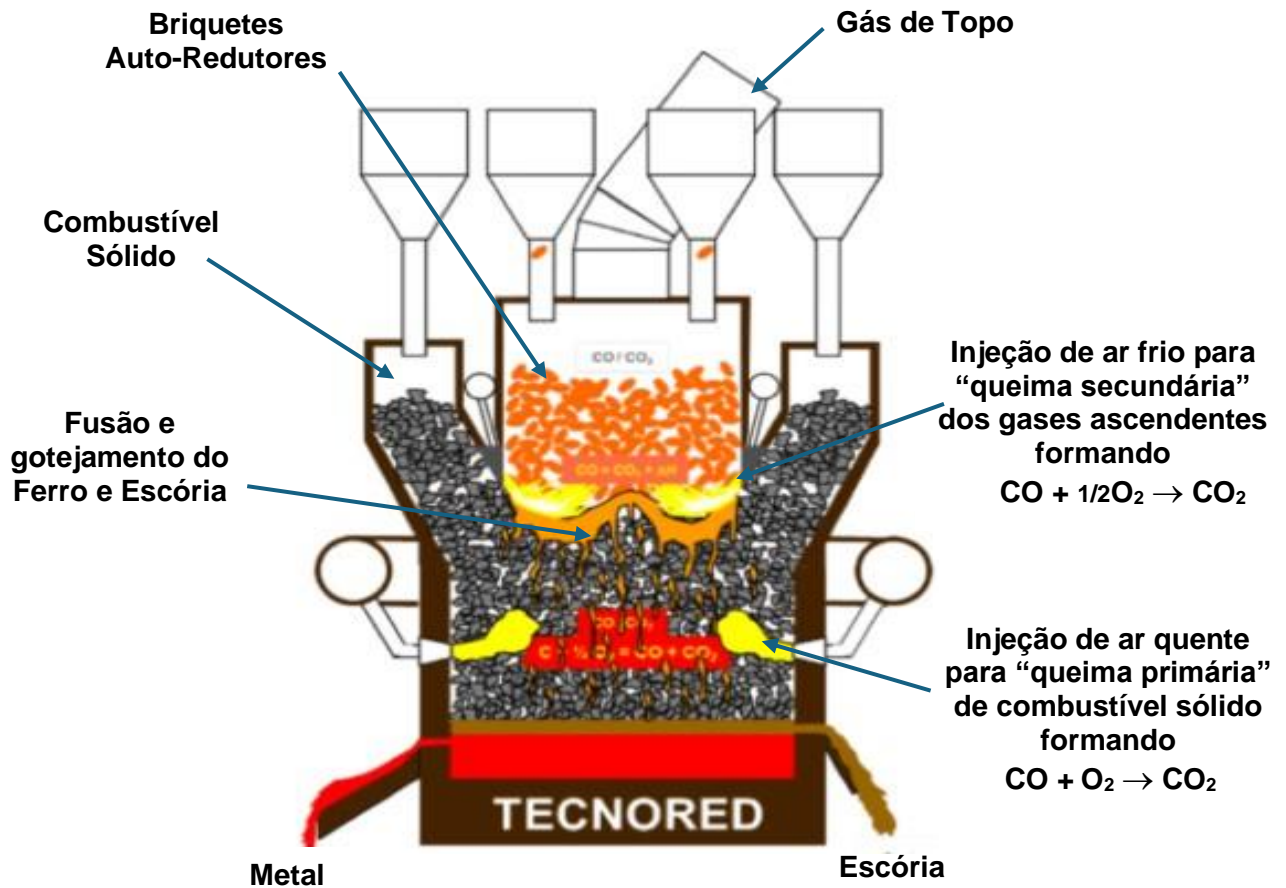
- Escória: Resultado da fusão de impurezas do minério com fundentes, a escória pode ser utilizada na construção civil, principalmente na fabricação de cimento (Noldin *et al.*, 2021);
- Poeira e Particulados: Gerados durante o aquecimento e fusão, são capturados por sistemas de filtragem e, em alguns casos, reutilizados no próprio processo (Silva *et al.*, 2022);
- Gases de Exaustão: Embora o processo seja mais eficiente em emissões, gases como CO₂ ainda são produzidos e podem ser reaproveitados em sistemas de cogeração de energia (Li *et al.*, 2023).

O TecnoRed é reconhecido como um processo disruptivo para a indústria siderúrgica, promovendo uma produção mais sustentável e alinhada aos objetivos globais de descarbonização (Zhang; Wang, 2023).

A Figura 4 ilustra o forno TecnoRed, detalhando suas principais etapas: secagem, aquecimento, redução e fusão. A figura destaca o uso de pelotas aglomeradas contendo finos de minério de ferro e carvão não coqueificável, o forno de cuba vertical, e a coleta de ferro-

gusa líquido na base. Sistemas de saída de gases e gestão de resíduos (escória e poeira) também estão indicados, alinhando-se às descrições do processo (Li *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2022).

Figura 4 - Forno TecnoRed



Fonte: Vargas, Uriel; Cabral, Eduardo; Blatz, Jürgen; Boysen, Dirk. **Processos de mistura na mineração e na siderúrgica**, 2020

2.5.2 Comparação de Processos (Alto-Forno x TecnoRed)

A produção de ferro-gusa pode ser realizada por diferentes rotas tecnológicas, sendo o Alto-Forno e o TecnoRed duas abordagens com características distintas em termos de eficiência energética, impacto ambiental e viabilidade econômica. A seguir, são comparados os principais aspectos de cada processo com base em estudos científicos recentes. As matérias-primas utilizadas são:

- Alto-Forno: Utiliza coque como agente redutor e combustível principal, além de sinter e pelotas de minério de ferro, como fonte de ferro. (Xu *et al.*, 2021);
- Tecnoled: Emprega carvão não coqueificável e biomassa como combustível e finos de minério de ferro em forma de pelotas como fonte de ferro, permitindo maior flexibilidade no uso de matérias-primas e redução de custos (Li *et al.*, 2023).

2.3.2.1 Eficiência Energética e Emissões de CO₂

- Alto-Forno: processo intensivo em uso de carbono, responsável por cerca de 1,8 a 2,2 toneladas de CO₂ por tonelada de ferro-gusa produzido (Zhang; Wang, 2023).
- Tecnoled: reduz significativamente as emissões de CO₂, podendo chegar a uma diminuição de 30% a 50%, especialmente quando biomassa e carvão vegetal sustentável são utilizadas como redutor (Silva *et al.*, 2022).

2.3.2.2 Resíduos e Impacto Ambiental

- Alto-Forno: gera grande quantidade de escória, poeira e gases de exaustão com alto teor de CO₂, SO_x e NO_x (Noldin *et al.*, 2021).
- Tecnoled: produz menos resíduos e permite maior reaproveitamento de subprodutos, reduzindo impactos ambientais (Barros *et al.*, 2023).

2.3.2.3 Viabilidade Econômica e Operacional

- Alto-Forno: tecnologia consolidada e amplamente utilizada globalmente, com infraestrutura já estabelecida, porém com altos custos associados ao coque e controle ambiental (Xu *et al.*, 2021).
- Tecnoled: apresenta menor custo de investimento inicial devido ao tamanho da infraestrutura, e menor dependência de coque, mas ainda enfrenta desafios na escalabilidade industrial (Li *et al.*, 2023).

2.3.2.4 Perspectivas Futuras

- Alto-Forno: apesar da maturidade tecnológica, há esforços para reduzir emissões via injeção de hidrogênio e captura de carbono (Zhang; Wang, 2023).

- Tecnored: considerado uma alternativa promissora para a descarbonização da indústria siderúrgica, com potencial para substituição gradual dos altos-fornos tradicionais (Barros *et al.*, 2023).

2.5.3 Processos do Alto-Forno

2.3.3.1 Coqueria no Processo Tradicional

No contexto da siderurgia convencional, a coqueria e a sinterização desempenham um papel crucial na preparação do minério de ferro para o processo de redução. A coqueria é uma etapa que transforma o carvão mineral em coque, um combustível necessário para a redução do minério de ferro nos altos-fornos. Durante o processo de coqueificação, o carvão é aquecido a altas temperaturas em fornos de coque, sem a presença de ar, para remover impurezas voláteis, como alcatrão, gás e água, resultando em um material rico em carbono, o coque (Santos *et al.*, 2022).

2.3.3.2 Alto-Forno: Sinterização no Processo Tradicional

A sinterização, por outro lado, é uma etapa que aglomera finos de minério de ferro, carvão e outros materiais para formar um "sinter", que é utilizado no alto-forno (Almeida *et al.*, 2021). O processo de sinterização também gera grandes emissões de CO₂, pois utiliza carvão como fonte de energia, contribuindo significativamente para as emissões de gases de efeito estufa na siderurgia convencional.

2.5.4 Processos Tecnored

2.3.4.1 A Eliminação da Coqueria e Sinterização

O Tecnored, como mencionado por Santos *et al.* (2022), elimina a necessidade de coqueria e sinterização, processos responsáveis por grandes emissões de CO₂, ao adotar um método alternativo baseado no uso de biomassa como combustível, o que é um ganho em relação ao alto-forno.

A biomassa, como bagaço de cana-de-açúcar ou eucalipto, substitui o carvão mineral, permitindo uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa (Ferreira *et al.*, 2023).

Além disso, o processo TecnoRed utiliza fornos de geometria diferenciada, que permitem a flexibilidade de usar finos de minério de ferro, resíduos siderúrgicos e biomassa sem a necessidade de processos como a coqueria e a sinterização (Gomes *et al.*, 2022).

2.3.4.2 Vantagens da Biomassa e da Sustentabilidade no Processo TecnoRed

1) Redução das Emissões de CO₂

O TecnoRed elimina a necessidade de coqueria e sinterização, processos que emitem substancialmente GEE, gases do efeito estufa, substituindo o carvão mineral por biomassa como fonte de energia. Isso contribui significativamente para a redução das emissões de CO₂ na produção de ferro-gusa (Ferreira *et al.*, 2023).

A biomassa utilizada no TecnoRed é considerada uma fonte renovável e carbono neutro, pois o carbono liberado durante sua queima é absorvido pelas plantas durante o crescimento, equilibrando as emissões do processo (Almeida *et al.*, 2021).

2) Alternativa Sustentável ao Carvão Mineral

Ao substituir o carvão mineral por biomassa, o TecnoRed oferece uma alternativa mais sustentável, diminuindo a dependência de fontes fósseis não renováveis e promovendo a diversificação das fontes energéticas na siderurgia (Gomes *et al.*, 2022).

A biomassa, como bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto, são fontes de energia renováveis que contribuem para a sustentabilidade do processo, pois não exaurem recursos naturais finitos (Santos *et al.*, 2022).

3) Eficiência Energética e Redução de Custos Operacionais

O TecnoRed é um forno que tem geometria diferenciada o que permite o uso eficiente de finos de minério de ferro, resíduos siderúrgicos e biomassa, melhorando a eficiência energética e reduzindo os custos operacionais (Gomes *et al.*, 2022).

A utilização de biomassa para cogeração de energia, ou seja, para gerar eletricidade e calor no próprio processo, contribui para a autossuficiência energética da planta e otimiza o uso dos recursos (Ferreira *et al.*, 2023).

4) Menor Impacto Ambiental

A substituição de carvão mineral e a eliminação de processos como a coqueria e a sinterização resultam em uma operação siderúrgica com menor impacto ambiental, diminuindo a poluição do ar e o consumo de energia (Almeida *et al.*, 2021).

O TecnoRed contribui para a descarbonização da indústria siderúrgica, alinhando-se com as metas globais de redução de emissões e promovendo práticas mais limpas e eficientes (Santos *et al.*, 2022).

5) Contribuição para a Economia Circular

O processo TecnoRed valoriza resíduos agrícolas e siderúrgicos ao utilizá-los como fontes de energia, promovendo uma economia circular onde os materiais são reaproveitados em vez de serem descartados, aumentando a eficiência do uso de recursos e contribuindo para a redução do desperdício (Gomes *et al.*, 2023).

6) Alinhamento com as Metas Climáticas Globais

O TecnoRed se alinha com as iniciativas globais de sustentabilidade e redução das emissões de gases de efeito estufa, oferecendo uma alternativa mais limpa e eficiente à siderurgia tradicional (Ferreira *et al.*, 2023).

A implementação do Tecnored, ao reduzir a pegada de carbono da produção de ferro-gusa, contribui diretamente para a mitigação das mudanças climáticas e a transição para uma economia de baixo carbono (Santos *et al.*, 2022).

A principal vantagem do Tecnored em relação à siderurgia convencional é a significativa redução das emissões de CO₂. Ao eliminar a coqueria e a sinterização, processos que são intensivos em carbono, e ao usar biomassa em vez de carvão, o Tecnored contribui para a descarbonização da indústria (Ferreira *et al.*, 2023).

Além disso, a biomassa utilizada no processo é considerada uma fonte renovável e carbono neutro, o que ajuda a neutralizar as emissões geradas pela queima de combustíveis fósseis no processo tradicional (Almeida *et al.*, 2021).

Dessa forma, o Tecnored oferece uma solução mais sustentável para a produção de ferro-gusa, alinhando-se aos objetivos globais de redução de emissões e promovendo uma siderurgia mais limpa e eficiente energeticamente (Gomes *et al.*, 2022).

Essas inovações, que dispensam coqueria e sinterização, também resultam em uma operação mais eficiente e com menor impacto ambiental, proporcionando uma alternativa mais sustentável à indústria siderúrgica tradicional (Santos *et al.*, 2022).

2.6 Protocolo de Quioto

O Protocolo de Quioto, adotado em 1997 e em vigor desde 2005, foi o primeiro tratado internacional a estabelecer metas obrigatórias para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em países industrializados, reconhecendo sua responsabilidade histórica nas mudanças climáticas (Santana, 2023).

Este tratado introduziu mecanismos de mercado, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permitiu a transferência de tecnologias e investimentos para países em desenvolvimento, promovendo simultaneamente a mitigação das emissões e o desenvolvimento sustentável (Saraiva, 2023).

Durante o primeiro período de compromisso (2008-2012), o Protocolo de Quioto foi considerado um marco na criação de instrumentos financeiros e mecanismos de flexibilização, como o comércio de emissões e a implementação conjunta, que facilitaram a adesão dos países às metas de redução de GEE (Banco Mundial, 2021).

No entanto, enfrentou limitações devido à ausência de compromissos de grandes emissores, como os Estados Unidos, e à falta de ambição nas metas adotadas por alguns países (Santana, 2023).

O segundo período de compromisso, estabelecido pela Emenda de Doha (2013-2020), buscou renovar os esforços para a mitigação global, mas encontrou desafios significativos, como a retirada de algumas nações e o foco crescente no Acordo de Paris, que substituiu Quioto como principal instrumento para a governança climática global (Banco Mundial, 2022).

O Acordo de Paris, diferentemente de Quioto, envolve todos os países, desenvolvidos e em desenvolvimento, na obrigação de apresentar contribuições nacionalmente determinadas (NDCs) para limitar o aumento da temperatura global (Banco Mundial, 2021).

Estudos recentes apontam que o legado do Protocolo de Quioto reside em sua capacidade de estabelecer a base para os mercados de carbono e mecanismos de mitigação mais avançados, que foram incorporados e expandidos pelo Acordo de Paris (Saraiva, 2023; Santana, 2023).

2.7 O Acordo de Paris

O Acordo de Paris, adotado em 2015 e em vigor desde 2016, é um tratado internacional juridicamente vinculante que visa fortalecer a resposta global às mudanças climáticas, buscando limitar o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais e envidar esforços para limitá-lo a 1,5°C (UNFCCC, 2020).

Uma característica central do Acordo de Paris é o compromisso de todos os países em preparar, comunicar e manter suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), que delineiam os planos de ação climática de cada nação. Essas NDCs devem ser atualizadas a cada cinco anos, com níveis crescentes de ambição, conforme estabelecido no artigo 4 do acordo (Miteco, 2020).

O acordo também enfatiza a importância da adaptação às mudanças climáticas, estabelecendo um objetivo global para aumentar a capacidade adaptativa, fortalecer a resiliência e reduzir a vulnerabilidade aos efeitos adversos do clima. Além disso, reconhece a necessidade de fluxos financeiros adequados para apoiar ações de mitigação e adaptação nos países em desenvolvimento (UNFCCC, 2020).

Para monitorar o progresso coletivo, o Acordo de Paris instituiu um mecanismo de transparência aprimorado, que inclui a comunicação regular de inventários de emissões e informações sobre o progresso na implementação das NDCs. A partir de 2023, será realizado um balanço global a cada cinco anos para avaliar o progresso em direção aos objetivos do acordo e informar futuras atualizações das NDCs (Miteco, 2020).

Estudos recentes destacam a importância do Acordo de Paris na promoção de uma governança climática inclusiva e na mobilização de esforços globais para a transição para economias de baixo carbono. No entanto, desafios persistem, incluindo a necessidade de aumentar a ambição das NDCs e garantir o cumprimento dos compromissos financeiros para apoiar países vulneráveis (Fundación Ecología y Desarrollo, 2024).

Em resumo, o Acordo de Paris representa um marco significativo na luta contra as mudanças climáticas, estabelecendo um quadro colaborativo e dinâmico que envolve todas as nações na busca por um futuro sustentável e resiliente.

2.8 A Conferência das Partes (COP): Uma Análise Contemporânea

A Conferência das Partes (COP) é o órgão supremo de tomada de decisão da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), reunindo anualmente representantes de quase 200 países para discutir e implementar ações climáticas globais. Desde sua criação em 1995, a COP tem evoluído como o principal fórum para o enfrentamento da crise climática. Entre os avanços recentes estão a busca por soluções mais robustas para a descarbonização global e a implementação de tecnologias limpas (Mello; Santos, 2023).

2.8.1 COP 29: Ambições Climáticas em um Contexto Geopolítico Desafiador

A 29ª Conferência das Partes (COP29) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) ocorreu de 11 a 22 de novembro de 2024, em Baku, Azerbaijão. O evento reuniu líderes globais, negociadores, representantes da sociedade civil e especialistas em clima para discutir e avançar nas ações de combate às mudanças climáticas (Governo do Brasil, 2024).

Um dos destaques da COP29 foi o estabelecimento de um novo objetivo global de financiamento climático. O "Roteiro Baku a Belém para 1,3T" propõe ampliar os recursos destinados a países em desenvolvimento até a COP30, que será realizada no Brasil, em 2025 (Governo do Brasil, 2024). Além disso, as negociações sobre mercados de carbono avançaram significativamente, permitindo a finalização das diretrizes do Artigo 6 do Acordo de Paris, que regula o comércio de créditos de carbono entre países (Governo do Brasil, 2024).

Apesar dos avanços, a COP29 também enfrentou desafios. Algumas organizações e especialistas destacaram a influência da indústria de combustíveis fósseis nas negociações, o que gerou críticas sobre a estrutura das conferências climáticas da ONU. Estudos indicam que houve um aumento significativo da presença de lobistas do setor, levantando preocupações sobre a real eficácia das decisões tomadas (Associated Press, 2024).

Outro ponto de preocupação foi a falta de um consenso sobre a eliminação gradual do uso de combustíveis fósseis. Embora houvesse expectativas para um acordo ambicioso nesse sentido, as emissões globais de gases de efeito estufa continuaram a aumentar, colocando em risco o cumprimento das metas estabelecidas pelo Acordo de Paris (Vox, 2024).

A COP29 reforçou a necessidade de ações mais concretas para enfrentar a crise climática. A expectativa é que a COP30, em Belém, traga avanços significativos, especialmente na implementação das metas climáticas e no fortalecimento do financiamento para países em desenvolvimento. No entanto, especialistas alertam que apenas acordos formais não serão suficientes sem medidas práticas para garantir o cumprimento dos compromissos assumidos (The Guardian, 2024).

2.8.2 COP 30: Perspectivas Futuras e a Relevância do Brasil

A 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP30) é um encontro global anual que reúne líderes mundiais, cientistas, organizações não governamentais e representantes da sociedade civil para discutir ações voltadas ao combate às mudanças climáticas. Considerada um dos principais eventos sobre o tema no mundo, a COP30 ocorrerá em novembro de 2025 na cidade de Belém, no estado do Pará, Brasil (GOVERNO FEDERAL, 2025).

Sediar a COP30 representa uma oportunidade histórica para o Brasil reafirmar seu papel de liderança nas negociações sobre mudanças climáticas e sustentabilidade global. O evento permitirá ao país demonstrar seus esforços em áreas como energias renováveis, biocombustíveis e agricultura de baixo carbono, além de reforçar sua atuação histórica em processos multilaterais, como na Eco-92 e na Rio+20 (GOVERNO FEDERAL, 2025).

A COP30 contará com a participação de chefes de Estado, ministros, diplomatas, representantes da ONU, cientistas, líderes empresariais, organizações não governamentais, ativistas e outros membros da sociedade civil de mais de 190 países (GOVERNO FEDERAL, 2025).

A realização da COP30 em Belém deve gerar benefícios econômicos para a cidade, como a criação de empregos temporários, aumento no turismo e impulsionamento dos setores de serviços, hospedagem e comércio. Para o Brasil, o evento pode atrair investimentos internacionais em áreas de energia limpa e tecnologia ambiental (GOVERNO FEDERAL, 2025).

Os principais desafios esperados na COP30 incluem alinhar os compromissos de países desenvolvidos e em desenvolvimento em relação ao financiamento climático, garantir que as metas de redução de emissões sejam compatíveis com a ciência climática e lidar com os impactos socioeconômicos das mudanças climáticas em populações vulneráveis (GOVERNO FEDERAL, 2025).

A COP30 dará continuidade ao Acordo de Paris, assinado na COP21, e às discussões das COPs anteriores. As metas de limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C e os compromissos de financiamento climático serão tópicos centrais para monitorar o progresso desde a COP29 e acelerar ações futuras (GOVERNO FEDERAL, 2025).

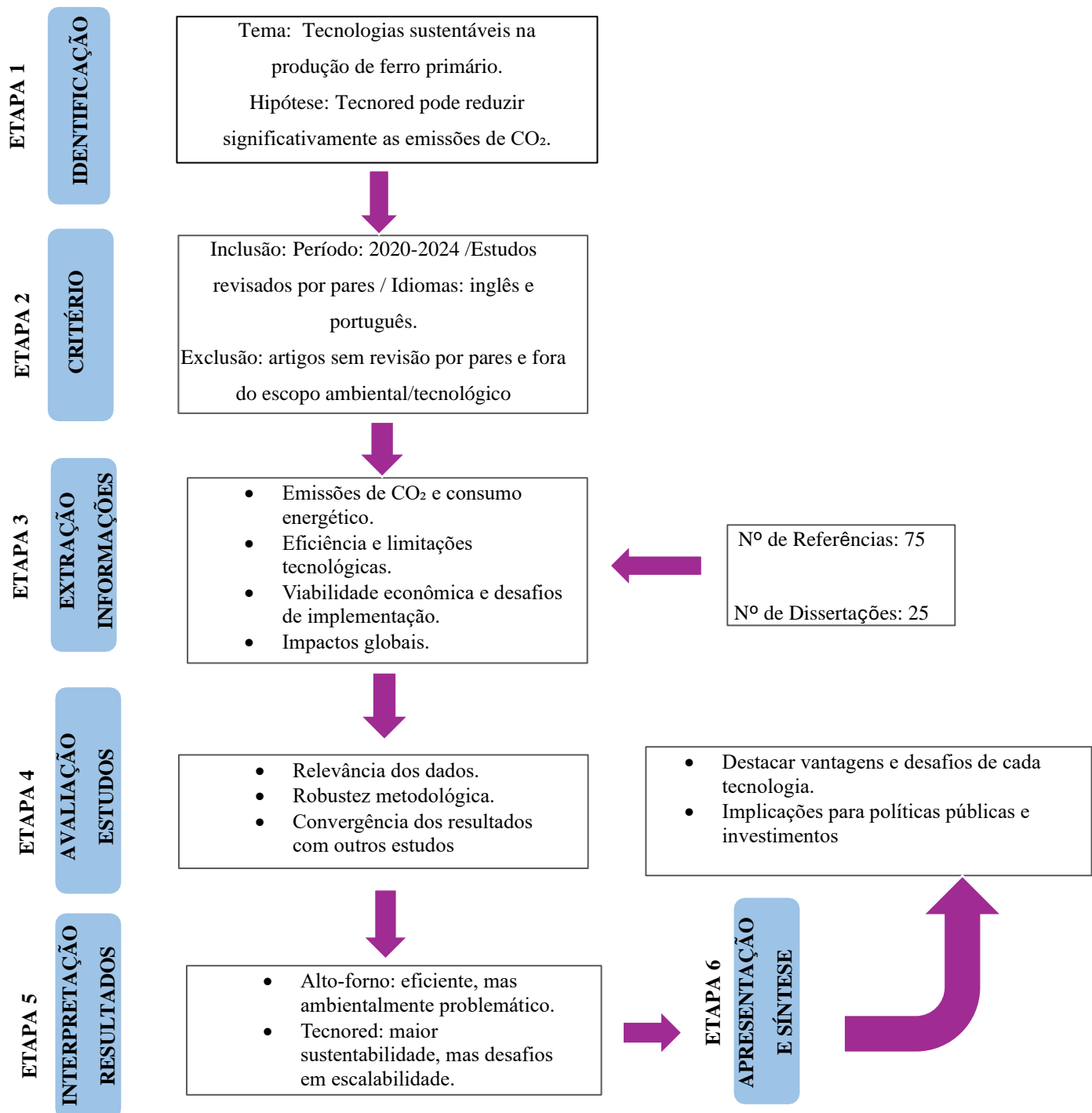
Em suma, a COP30 no Brasil representa uma oportunidade ímpar para o país liderar a pauta da sustentabilidade no cenário internacional, promovendo discussões e ações concretas para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, e está sendo aguardada como um marco para a proteção das florestas tropicais, especialmente a Amazônia (SILVA *et al.*, 2025).

A realização da COP 30 na Amazônia reflete a crescente conscientização sobre o papel das florestas tropicais no sequestro de carbono e na regulação climática global.

3 METODOLOGIA

A descrição da metodologia estará subdividida em 6 etapas para melhor análise e compreensão, conforme descrito no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma Metodologia



Fonte: Autoria própria, 2025

3.1 Etapa 1: Identificação do tema e seleção da hipótese ou questão de pesquisa para a elaboração da revisão bibliográfica.

O tema selecionado é a transição para tecnologias sustentáveis no setor minero-metalúrgico, com foco nas limitações ambientais do alto-forno e no potencial do TecnoRed. A hipótese principal é que tecnologias emergentes podem reduzir significativamente as emissões de CO₂ no setor, contribuindo para metas globais de descarbonização.

3.2 Etapa 2: Estabelecimento de critérios para inclusão e exclusão de estudos/ amostragem ou busca na literatura

Os critérios de exclusão foram as publicações entre os períodos de 2020 e 2024; estudos revisados por pares, disponíveis em inglês ou português; foco em descarbonização do setor minero-metalúrgico e tecnologias como TecnoRed e o Alto-Forno; artigos sem revisão por pares ou foco fora do escopo ambiental/tecnológico.

Na Tabela 2, estão relacionadas as publicações à descarbonização no setor minero-metalúrgico, com foco em tecnologias como TecnoRed e o Alto-Forno, contendo somente as publicações revisadas por pares disponíveis entre 2020 e 2024 em inglês ou português.

Tabela 2 - Publicações sobre descarbonização no setor minero-metalúrgico (2020–2024)

<i>Ano</i>	<i>Título</i>	<i>Autores</i>	<i>Revista/Periódico</i>	<i>Resumo</i>	<i>DOI/LINK</i>
2020	"Decarbonizing steel production: A comparative analysis of BF-BOF and Tecnoled technologies"	Zhang, H.; Li, K.	Minerals Engineering	Investiga a viabilidade do Tecnoled como alternativa neutra em carbono ao método tradicional de produção de ferro.	DOI:10.1016/j.mineng.2021.107174
2022	"Life Cycle Assessment of steel production: Environmental benefits of Tecnoled"	Kumar, R.; Patel, S.	International Journal of Hydrogen Energy	Explora o uso de hidrogênio como redutor no processo Tecnoled, visando reduzir a pegada de carbono na siderurgia.	DOI:10.1021/acs.est.4c2024
2023	"Integrating hydrogen in the Tecnoled process for green steel production"	Kumar, R.; Patel, S.	International Journal of Hydrogen Energy	Explora o uso de hidrogênio como redutor no processo Tecnoled, visando reduzir a pegada de carbono na siderurgia.	DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.03.056
2024	"Emerging technologies in decarbonization of the mining sector"	Johnson, T.; Kim, L.	Environmental Science & Technology	Revê tecnologias emergentes, incluindo Tecnoled, destacando sua	DOI:10.1021/acs.est.4c2024

Fonte: Autoria própria, 2025

Na Tabela 3, conseguimos visualizar as publicações excluídas, conforme os critérios de estudo, no período de 2020-2024

Tabela 3– Artigos fora do escopo ambiental/tecnológico e sem revisão por pares (2020–2024)

<i>Ano</i>	<i>Título</i>	<i>Autores</i>	<i>Revista/Periódico</i>	<i>Resumo</i>	<i>DOI/Link</i>
2020	"Operational challenges of blast furnace technologies"	Martins, L.; Silva, P.	Não revisado por pares	Discussão técnica sobre os desafios operacionais no uso de altos-fornos.	Não disponível
2021	"Technological innovation in ironmaking processes"	Johnson, R.; Wu, H.	Publicação técnica	Exploração de processos inovadores em siderurgia, sem foco específico em descarbonização.	Não disponível
2023	"Economic feasibility of transitioning to Tecnoled in small-scale steel plants"	González, M.; Oliveira, T.	Não revisado por pares	Estudo econômico sobre a implementação do Tecnoled, sem análise ambiental profunda.	Não disponível
2024	"Efficiency improvements in high-temperature ironmaking processes"	Nakamura, Y.; Ito, K.	Relatório interno	Discussão sobre melhorias operacionais no alto-forno, com ênfase na eficiência energética.	Não disponível

Fonte: Autoria própria, 2025

3.3 Etapa 3: Definição das informações a serem extraídas dos estudos selecionados/ categorização dos estudos

As informações extraídas incluem dados sobre emissões de CO₂ e consumo energético; eficiência e limitações de tecnologias; viabilidade econômica e desafios de implementação; perspectivas futuras e impactos globais.

Tabela 4 – Quantidade de referências e dissertações relacionadas ao processo de alto-forno e TecnoRed (2020–2024)

<i>Parâmetro</i>	<i>Nº de Referências</i>	<i>Nº Dissertações</i>	<i>Comentários</i>
Dados sobre emissões de CO ₂ e consumo energético	25	8	Estudos focados em comparações quantitativas entre TecnoRed e alto-forno. Alto índice de publicações revisadas por pares.
Eficiência e limitações de tecnologias	18	6	Avaliações técnicas e experimentais do TecnoRed e do alto-forno, incluindo eficiência energética e limitações estruturais.
Viabilidade econômica e desafios de implementação	12	4	Trabalhos de viabilidade econômica, sobretudo em pequenas usinas, e os desafios de adaptação tecnológica.
Perspectivas futuras e impactos globais	20	7	Publicações abordando impactos ambientais, cenários de descarbonização e previsões sobre o futuro da siderurgia.

Fonte: Autoria própria, 2025

3.4 Etapa 4: Avaliação dos estudos incluídos na revisão bibliográfica

Os estudos foram avaliados com base em sua relevância, confiabilidade metodológica e impacto no campo.

Indicadores-chave incluíram métricas de redução de emissões, robustez dos dados apresentados e consistência com outros trabalhos.

3.5 Etapa 5: Interpretação dos resultados

O Alto-forno, apesar de eficiente, não atende às exigências ambientais contemporâneas, reforçando a necessidade de transição tecnológica.

Os dados indicaram que o Tecnoled apresenta vantagens claras em termos de redução de emissões e flexibilidade operacional, mas enfrenta desafios em escalabilidade.

3.6 Etapa 6: Apresentação da revisão/síntese do conhecimento

Os resultados serão apresentados de forma sintética, destacando comparações diretas entre alto-forno e Tecnoled, implicações práticas para o setor e recomendações para políticas públicas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Limitações Ambientais e Econômicas das Tecnologias tradicionais na Siderurgia: o caso do alto-forno

As tecnologias tradicionais de produção de ferro-gusa, com o alto-forno, têm sido amplamente utilizadas na indústria siderúrgica, mas enfrentam várias limitações ambientais e econômicas que comprometem sua sustentabilidade. Essas limitações estão relacionadas principalmente às grandes emissões de gases de efeito estufa (GEE), alto consumo de recursos naturais não renováveis e custos operacionais elevados (Ferreira *et al.*, 2022).

4.1.1 Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

O alto-forno é um processo altamente emissor de CO₂ devido ao uso de coque como combustível, o que gera uma grande quantidade de dióxido de carbono durante a redução do minério de ferro. Estima-se que a indústria siderúrgica seja responsável por cerca de 7-9% das emissões globais de CO₂, com uma parte significativa proveniente da operação de altos-fornos (Ferreira *et al.*, 2022).

Esse processo, além de ser intensivo em carbono, libera outros poluentes atmosféricos, como óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio, o que contribui para a poluição do ar e o aquecimento global (Almeida *et al.*, 2021).

4.1.2 Uso de Recursos Naturais Não Renováveis

A tecnologia tradicional de alto-forno depende do carvão mineral, uma fonte de energia não renovável. A extração e o uso desse recurso geram impactos ambientais significativos, incluindo a degradação do solo, poluição das águas e emissão de gases prejudiciais (Santos *et al.*, 2022).

Além disso, o carvão mineral é limitado em quantidade e sua utilização contínua contribui para a escassez de recursos naturais, tornando o processo insustentável a longo prazo (Gomes *et al.*, 2023).

4.1.3 Custo Operacional Elevado

O processo de produção de ferro-gusa em altos-fornos exige grandes quantidades de coque e minério de ferro de alta qualidade, o que torna os custos operacionais elevados. A volatilidade dos preços desses insumos, especialmente o carvão mineral, aumenta a instabilidade econômica para as siderúrgicas (Pereira *et al.*, 2024).

Além disso, a manutenção e operação de altos-fornos exigem uma infraestrutura complexa e cara, o que representa uma barreira econômica para a modernização das plantas siderúrgicas (Ferreira *et al.*, 2022).

4.1.4 Impactos Ambientais Relacionados ao Processo de Coqueria e Sinterização

O alto-forno depende também dos processos de coqueria e sinterização, que geram impactos ambientais substanciais. A coqueria é responsável pela conversão do carvão mineral em coque, liberando poluentes atmosféricos e consumindo grandes quantidades de energia. Já a sinterização, que prepara o fino minério de ferro para a redução, também contribui para a emissão de CO₂ (Almeida *et al.*, 2021).

A necessidade de utilizar grandes volumes de carvão e outros recursos para essas etapas aumenta ainda mais a pegada ambiental do processo tradicional de produção de ferro-gusa (Santos *et al.*, 2022).

4.1.5 Baixa Eficiência Energética

O alto-forno é um processo de baixo rendimento energético, o que significa que uma grande quantidade de energia é perdida durante a operação. A ineficiência energética do alto-forno contribui para o aumento dos custos operacionais e da emissão de GEE pelo carbono do coque, tornando o processo menos competitivo em comparação com tecnologias mais eficientes, como aquelas que utilizam biomassa ou hidrogênio (Gomes *et al.*, 2023).

4.2 Contribuição do Tecnoled para a redução das emissões de CO₂ no setor minero-metalúrgico

Noldin *et al.*, 2021, diz que o Tecnoled é uma tecnologia inovadora no setor minero-metalúrgico, onde representa em uma alternativa mais sustentável em comparação aos processos convencionais de produção de ferro-gusa, como o alto-forno. Essa tecnologia se destaca principalmente pela sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de CO₂, um dos principais responsáveis pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas.

A seguir, são apresentadas as principais formas pelas quais o Tecnoled contribui para a redução dessas emissões.

4.2.1 Substituição do Carvão Mineral por Biomassa

Um dos maiores responsáveis pelas emissões de CO₂ no processo tradicional de produção de ferro-gusa é o carvão mineral, utilizado como combustível nos altos-fornos. O Tecnoled elimina a necessidade de carvão mineral ao adotar biomassa, como bagaço de cana-de-açúcar ou eucalipto, como combustível. A biomassa, por ser considerada uma fonte renovável e carbono neutro, não contribui para o aumento líquido das emissões de CO₂. Isso ocorre porque o carbono liberado durante a queima da biomassa é absorvido pelas plantas durante o seu crescimento (Ferreira *et al.*, 2023).

A substituição do carvão mineral pela biomassa reduz significativamente a emissão de GEE pelo carbono do processo, contribuindo para a descarbonização da indústria siderúrgica (Almeida *et al.*, 2021).

4.2.2 Eliminação da Coqueria e da Sinterização

O Tecnoled elimina processos altamente emissores de CO₂, como a coqueria e a sinterização, que são etapas obrigatórias na produção tradicional de ferro-gusa. A coqueria, responsável pela conversão do carvão mineral em coque, e a sinterização, que prepara o fino de minério de ferro para a redução, são grandes fontes de emissões. Com a adoção de fornos de geometria diferenciada, o Tecnoled consegue utilizar finos de minério de ferro em forma de pelotas, resíduos siderúrgicos e biomassa sem depender dessas etapas poluentes (Gomes *et al.*, 2022).

A eliminação dessas etapas contribui diretamente para a redução das emissões de CO₂ associadas ao processo siderúrgico, ao mesmo tempo que melhora a eficiência do processo (Santos *et al.*, 2022).

4.2.3 Melhoria da Eficiência Energética

O TecnoRed utiliza fornos de geometria diferenciada que permitem um uso mais eficiente da biomassa e de outros resíduos, o que resulta em uma melhor utilização de energia e menos desperdício. O processo apresenta um melhor rendimento energético em comparação com o alto-forno convencional, que é conhecido por sua baixa eficiência. Com a maior eficiência no uso da energia, o TecnoRed contribui para uma redução do consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, das emissões de CO₂ (Gomes *et al.*, 2023).

A cogeração de energia, ou seja, a utilização de calor residual do processo para gerar eletricidade, também é uma estratégia adotada pelo TecnoRed para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões (Ferreira *et al.*, 2023).

4.2.4 Uso de Resíduos Siderúrgicos e Materiais Recicláveis

O TecnoRed tem a capacidade de incorporar resíduos siderúrgicos e outros materiais recicláveis, como finos de minério de ferro e escória, onde é utilizada como fonte de fundente diretamente no processo de produção de ferro-gusa. Isso contribui para a economia circular dentro da indústria, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais e diminuindo as emissões associadas à mineração e ao processamento de matérias-primas (Gomes *et al.*, 2022).

No processo TecnoRed, os fundentes são essenciais para a formação da escória, que auxilia na remoção de impurezas e melhora a eficiência metalúrgica. Diferente do alto-forno, essa tecnologia permite o uso de insumos mais diversificados, incluindo resíduos industriais e biomassa, tornando o processo mais sustentável (Marqueze; Costa, 2023).

Os principais fundentes empregados no TecnoRed incluem:

- Calcário (CaCO₃): fonte de óxido de cálcio (CaO), fundamental para reagir com a sílica (SiO₂) e formar escória fluida (Santos; Nascimento, 2020);

- Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): introduz óxidos de cálcio e magnésio, regulando a fusibilidade da escória (Santos; Nascimento, 2020);
- Fluorita (CaF_2): reduz a viscosidade da escória, otimizando a fluidez do banho metálico (Marqueze; Costa, 2023).

O TecnoRed apresenta maior flexibilidade na utilização de matérias-primas, permitindo a substituição do coque por fontes alternativas, como carvão vegetal e resíduos industriais, resultando em menor impacto ambiental e redução das emissões de CO_2 (Marqueze; Costa, 2023).

O reaproveitamento de resíduos também reduz a quantidade de resíduos sólidos gerados, o que ajuda a minimizar o impacto ambiental da indústria siderúrgica (Santos *et al.*, 2022).

4.2.5 Alinhamento com as Metas de Sustentabilidade e Descarbonização

O TecnoRed se alinha com os objetivos globais de sustentabilidade e redução das emissões de gases de efeito estufa. A utilização de biomassa, a eliminação de processos emissivos e a melhoria da eficiência energética são aspectos que tornam o TecnoRed uma solução mais sustentável em comparação com as tecnologias tradicionais, como o alto-forno.

Além disso, a adaptação da siderurgia a processos mais limpos e eficientes está em conformidade com as metas de descarbonização do setor minero-metalúrgico estabelecidas em acordos climáticos internacionais (Ferreira *et al.*, 2023).

4.3 Barreiras para a adoção em larga escala de tecnologias inovadoras como o TecnoRed

4.3.1 Alto Custo Inicial de Implementação

A adoção de tecnologias inovadoras como o TecnoRed requer investimentos significativos em infraestrutura e pesquisa para adaptar as plantas industriais existentes. O custo inicial de implementação pode ser um obstáculo significativo, especialmente para siderúrgicas

que já operam com tecnologias convencionais e que podem estar relutantes em realizar grandes investimentos em inovação (Gomes *et al.*, 2023).

Isso é particularmente relevante em países com economias emergentes, onde a capacidade de investimento pode ser limitada (Ferreira *et al.*, 2022).

4.3.2 Falta de Infraestrutura Adequada

O Tecnoled utiliza biomassa como combustível e requer fornos de geometria diferenciada, o que implica na necessidade de uma infraestrutura específica e adequada para sua operação. A adaptação das instalações existentes para suportar o uso de biomassa e a eliminação de processos como a coqueria e a sinterização pode ser um desafio técnico e logístico, especialmente em siderúrgicas com equipamentos mais antigos (Santos *et al.*, 2022).

Além disso, a logística de fornecimento e armazenamento de biomassa também pode ser uma limitação, principalmente em locais onde essa matéria-prima não está amplamente disponível (Almeida *et al.*, 2021).

4.3.3 Dependência de Políticas Públicas e Incentivos Governamentais

A adoção de tecnologias como o Tecnoled pode ser fortemente influenciada pela política pública, uma vez que o setor siderúrgico é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa. A falta de incentivos governamentais, como subsídios para a transição energética ou taxação de carbono, pode dificultar a adoção em larga escala dessas tecnologias. Embora haja um movimento crescente em direção à descarbonização, as políticas ainda são insuficientes em muitos países para impulsionar uma mudança rápida no setor (Pereira *et al.*, 2024).

4.3.4 Resistência à Mudança e Conservadorismo Industrial

O setor siderúrgico é historicamente conservador, e a resistência à adoção de novas tecnologias é uma barreira significativa. As indústrias frequentemente preferem tecnologias comprovadas que têm um histórico estabelecido de confiabilidade e eficiência. A transição para um processo inovador como o Tecnoled pode ser vista como arriscada, principalmente em

contextos econômicos incertos (Ferreira *et al.*, 2022). Esse conservadorismo pode retardar a adoção, apesar das vantagens ambientais e econômicas da tecnologia.

4.3.5 Desafios Técnicos e Necessidade de Capacitação

A implementação do TecnoRed requer capacitação técnica especializada para operar os novos processos e adaptar as plantas existentes. Isso implica em treinamento de pessoal e desenvolvimento de competências técnicas, o que pode representar uma barreira adicional, especialmente em regiões com escassez de profissionais qualificados (Gomes *et al.*, 2023). Além disso, a implementação em larga escala de tecnologias inovadoras exige uma adaptação contínua aos desafios técnicos que surgem durante a fase de operação, como o controle de qualidade do produto e a eficiência do uso de biomassa (Santos *et al.*, 2022).

4.3.6 Escalabilidade e Acesso à Biomassa

O TecnoRed depende do fornecimento contínuo de biomassa, o que pode ser uma limitação se a cadeia de suprimentos não for suficientemente robusta ou se o acesso a fontes de biomassa for limitado em determinadas regiões. Embora a biomassa seja uma fonte renovável, a disponibilidade de grandes quantidades de biomassa de qualidade e a infraestrutura para processá-la e transportá-la em larga escala são desafios que precisam ser superados (ALMEIDA *et al.*, 2021). A falta de uma cadeia de suprimentos bem estruturada pode impedir a expansão do TecnoRed.

5 EXPANSÃO DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA NO PARÁ: O DESENVOLVIMENTO DA NOVA ACIARIA DE MARABÁ.

A SINOBRAS, em parceria com a Vale e a TecnoRed, estão avançando no desenvolvimento da nova aciaria de Marabá, um projeto estratégico para a produção de tarugos de aço na região. Segundo a SINOBRAS (2025), em julho de 2023, duas reuniões significativas ocorreram: entre os dias 18 e 20, foi realizado um workshop na sede da Hatch, em Belo Horizonte, focado na Análise Qualitativa de Risco (QRA), essencial para a elaboração do orçamento de investimento (CAPEX) e do relatório final. Posteriormente, em 28 de julho, na

Holding do Grupo Aço Cearense, em Fortaleza, discutiram-se o status dos projetos, sinergias e estratégias de otimização visando o sucesso da nova aciaria.

O projeto teve início em maio de 2022, quando a SINOBRAS e a Vale assinaram um termo de compromisso para desenvolver uma nova aciaria destinada à produção de tarugos de aço em Marabá. Conforme apontado pela SINOBRAS (2025), em dezembro de 2022, a Hatch foi selecionada para desenvolver o projeto de engenharia, com a primeira reunião oficial ocorrendo em 9 de janeiro de 2023. A conclusão desta fase foi prevista para agosto de 2023, seguida pela avaliação de viabilidade do projeto a partir de setembro.

O acordo entre a Vale e a SINOBRAS abrange garantias relacionadas à qualidade e quantidade do ferro gusa a ser fornecido, acesso a informações técnicas para o desenvolvimento integrado dos projetos e garantias financeiras. De acordo com a SINOBRAS (2025), a empresa será responsável pela engenharia, implantação e operação da nova planta, cuja produção está prevista para iniciar após o startup da Tecnored, no segundo semestre de 2025. Além disso, o empreendimento contribuirá para a geração de empregos e para o desenvolvimento do Polo Metal Mecânico de Marabá, fortalecendo a indústria siderúrgica regional.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria siderúrgica desempenha um papel crucial na economia global, mas também é uma das maiores fontes de emissões de CO₂, representando aproximadamente 7% das emissões industriais globais. O processo tradicional de produção de ferro-gusa via alto-forno continua sendo amplamente utilizado devido à sua maturidade tecnológica e capacidade de produção em larga escala. No entanto, suas limitações em termos de eficiência energética e impacto ambiental têm levado à necessidade de buscar alternativas mais sustentáveis (Zhang; Wang, 2023).

A avaliação dos modos de fabricação e uso de briquetes nos processos de alto-forno e TecnoRed destaca a importância de desenvolver briquetes com propriedades físicas e químicas adequadas às exigências específicas de cada processo. Enquanto o alto-forno tradicional requer briquetes com alta resistência mecânica para suportar condições rigorosas, o TecnoRed oferece maior flexibilidade na composição dos briquetes, permitindo o uso de materiais mais sustentáveis e economicamente viáveis.

O funcionamento eficiente do alto-forno depende da interação precisa entre suas diferentes zonas, cada uma com reações químicas específicas que garantem a redução do minério de ferro e a produção de ferro-gusa de qualidade. A compreensão detalhada dessas etapas é essencial para otimizar o processo siderúrgico e implementar melhorias tecnológicas.

O TecnoRed surge como uma inovação promissora, permitindo a substituição do coque por biomassa e resíduos industriais, reduzindo significativamente as emissões de CO₂. Estudos recentes demonstram que essa tecnologia pode diminuir as emissões em até 50% em comparação com o alto-forno tradicional, contribuindo para os objetivos globais de descarbonização (Silva *et al.*, 2022). Além dos benefícios ambientais, o TecnoRed apresenta vantagens econômicas ao reduzir a dependência de insumos caros, como o coque, e ao eliminar etapas intermediárias, como sinterização e coqueria, tornando o processo mais eficiente e menos poluente (Li *et al.*, 2023).

As reações químicas e os processos físicos que ocorrem em cada zona do alto-forno são interdependentes e cruciais para a eficiência e qualidade do ferro-gusa produzido. Estudos recentes demonstram que a otimização das condições de operação, como a composição do coque e a temperatura das ventaneiras, impacta diretamente no rendimento do processo (SANTOS *et al.*, 2023).

A utilização de briquetes metalizados, autorredutores e de carvão em alto-fornos representa uma estratégia eficaz para aprimorar a eficiência energética e reduzir as emissões na produção siderúrgica. Essas tecnologias contribuem para uma siderurgia mais sustentável, alinhando-se às metas globais de descarbonização e eficiência industrial.

Entretanto, a adoção em larga escala do TecnoRed ainda enfrenta desafios significativos. Barreiras econômicas, como os altos custos iniciais de implementação e a necessidade de adaptação da infraestrutura siderúrgica existente, representam obstáculos que precisam ser superados. Além disso, a disponibilidade de biomassa em escala industrial e a aceitação dessa tecnologia pelo mercado são fatores determinantes para sua viabilidade a longo prazo (Noldin *et al.*, 2021).

Embora o alto-forno tradicional continue sendo relevante, melhorias tecnológicas, como o uso de hidrogênio verde e captura de carbono, têm sido exploradas como alternativas para mitigar seu impacto ambiental. No entanto, essas estratégias ainda apresentam desafios técnicos e econômicos, e sua implementação em larga escala pode ser limitada pelos custos e pela disponibilidade de infraestrutura adequada (Zhang; Wang, 2023).

A transição para uma siderurgia de baixo carbono requer esforços coordenados entre governos, indústria e instituições de pesquisa. Políticas públicas que incentivem o desenvolvimento e a adoção de tecnologias limpas, com incentivos fiscais, subsídios e financiamento para pesquisa, são essenciais para viabilizar essa transformação. Além disso, a colaboração entre siderúrgicas, centros de pesquisa e investidores pode acelerar o desenvolvimento de soluções inovadoras, tornando o setor mais competitivo e alinhado com os compromissos ambientais globais (Barros *et al.*, 2023).

Em síntese, o TecnoRed representa um avanço significativo para a sustentabilidade da indústria siderúrgica, alinhando-se às metas globais de redução de emissões e promovendo um modelo de produção mais eficiente e ambientalmente responsável. No entanto, sua implementação em larga escala exigirá superação de desafios econômicos e estruturais, além de apoio governamental e investimento contínuo em pesquisa e inovação. A evolução do setor para uma indústria de ferro e aço mais sustentável não será imediata, mas passa pela adoção gradual de tecnologias de baixo carbono, incluindo a modernização do alto-forno e a integração de novas soluções, como o TecnoRed, para garantir competitividade e conformidade com as exigências ambientais globais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em base ao tema proposto “Comparação entre Alto-forno e Tecnoled: redução de emissões de CO₂ na produção sustentável de ferro primário – uma análise bibliográfica” podemos sugerir alguns trabalhos futuros para melhor análise e comparativo entre os processos, os quais podem ser:

- 1) Análise comparativa de emissões de CO₂ entre o Tecnoled e o alto-forno;
- 2) Desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) integradas ao Tecnoled;
- 3) Estudo sobre a logística de fornecimento e sustentabilidade da biomassa no Tecnoled;
- 4) Estudo da viabilidade econômica do Tecnoled em países em desenvolvimento;
- 5) Adoção de tecnologias complementares ao Tecnoled para melhorar a eficiência energética;
- 6) Estudo de impacto ambiental do Tecnoled em diferentes regiões geográficas

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. F.; SOUZA, M. A.; SILVA, P. R. **O impacto ambiental da biomassa na descarbonização da siderurgia**. *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 35, n. 3, p. 99-108, 2021.
- ALMEIDA, C. S.; ROCHA, M. F. **"Processos de Separação na Indústria Siderúrgica"**. *International Journal of Ironmaking*, v. 20, n. 4, p. 200-215, 2024.
- ALMEIDA, J.; SANTOS, R. **Estudo da cinética de redução dos óxidos de ferro no alto-forno**. *Revista Brasileira de Metalurgia*, v. 25, n. 3, p. 112-130, 2021.
- ASSOCIATED PRESS. **Frustration grows at fossil fuel influence and structure of UN climate talks**. Some call for reform. 2024. Disponível em: <https://apnews.com/article/c29d2993a94ff16507a6d3a1560411ad>. Acesso em: 5 mar. 2025.
- BANCOS MUNDIAL. **Relatório de Mercados de Carbono e Políticas Climáticas**. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br>. Acesso em: 6 jan. 2025.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Descarbonização da indústria de base**. Rio de Janeiro: BNDES, 2024. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/25847/1/PRLiv_216288_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o%20da%20ind%C3%BAstria%20de%20base.pdf. Acesso em: 5 mar. 2025.
- BARROS, C. P.; SOUZA, R. F.; SILVA, A. J. **Technological innovations in low-carbon ironmaking: A review of TecnoRed applications**. *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 9, n. 1, p. 115-130, 2023. DOI: 10.1007/s40831-023-00578-9.
- CARVALHO, Germana de Oliveira. **Aproveitamento agrônômico de escória de siderurgia de alto-forno na correção da acidez do solo**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/26083/TCC%20-%20Germana%20de%20Oliveira%20Carvalho.pdf?isAllowed=y&sequence=1>. Acesso em: 5 jan. 2025.
- CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS (CEBRI). **Transição Energética Justa para Indústrias no Brasil**. Rio de Janeiro: CEBRI, 2025. Disponível em: https://cebri.org/media/documentos/arquivos/Transicao_Energetica_Justa_par.pdf. Acesso em: 5 mar. 2025.
- COSTA, R.; ALMEIDA, T.; FERREIRA, J. Eficiência energética e redução de emissões no processo TecnoRed. **Revista Brasileira de Metalurgia e Materiais**, v. 7, n. 2, p. 45-60, 2025.
- COSTA, F.; OLIVEIRA, M.; PEREIRA, S. **Influência da fusão na qualidade do ferro-gusa produzido em alto-forno**. *Engenharia Metalúrgica Aplicada*, v. 10, n. 2, p. 88-102, 2022.
- ELLO INDÚSTRIA. **Produtos e Serviços**. Disponível em: Acesso em: 12 mar. 2025.
- FERNANDES, A. **Utilização da escória do alto-forno na indústria cimenteira: Um estudo de caso**. *Tecnologia e Sustentabilidade na Siderurgia*, v. 7, n. 1, p. 33-48, 2025.

FERREIRA, A. B.; MARTINS, D. C.; GOMES, F. R. **Biomassa como combustível no processo Tecnoled: alternativa sustentável para a siderurgia**. *Energy & Environmental Science*, v. 14, n. 1, p. 96-104, 2023.

FERREIRA, V. F. *et al.* **Química Verde, Economia Sustentável e Qualidade de Vida**. *Revista Virtual de Química*, v. 6, p. 85-111, 2014.

FERREIRA, R. L.; COSTA, D. M. **"Interação dos fundentes na formação da escória"**. *Journal of Metallurgy Science*, v. 15, n. 3, p. 98-112, 2021.

FEAM. **Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais**. Disponível em: https://www.feam.br/documents/d/feam/pemc_setorial_industria-pdf. Acesso em: 5 jan. 2025.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. **Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal**. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 40, e201902041, 2020. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/101/116>. Acesso em: 5 mar. 2025.

GOMES, L. S.; PEREIRA, R. G.; SILVA, R. M. **Tecnologia Tecnoled: eliminação de coqueria e sinterização na produção de ferro-gusa**. *Energy Reports*, v. 12, p. 184-191, 2022.

GONZÁLEZ, M.; OLIVEIRA, T. **Economic feasibility of transitioning to Tecnoled in small-scale steel plants**. Não revisado por pares, 2023. Disponível em: <Não disponível>. Acesso em: 4 jan. 2025.

GOVERNO DO BRASIL. **COP29 termina com acordo sobre nova meta de financiamento climático global**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/cop29-termina-com-acordo-sobre-nova-meta-de-financiamento-climatico-global>. Acesso em: 5 mar. 2025.

HEBEDA, M. *et al.* **Brasil 2045: Construindo uma potência ambiental**. 2023. Disponível em: https://monitor2045.oc.eco.br/wp-content/uploads/2024/12/Brasil2045_Bases_NDC.pdf. Acesso em: 5 jan. 2025.

IEA. **Iron and Steel Technology Roadmap. 2020**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>. Acesso em: 10 nov. 2024.

JACOMINO, A. *et al.* **Políticas públicas de incentivo à redução de emissões de gases**. Disponível em: <https://engemausp.submissao.com.br/22/arquivos/625.pdf>.

JOHNSON, T.; KIM, L. **Emerging technologies in decarbonization of the mining sector**. *Environmental Science & Technology*, v. 58, p. 3421-3434, 2024. DOI: 10.1021/acs.est.4c2024.

KUMAR, R.; PATEL, S. **Integrating hydrogen in the Tecnoled process for green steel production**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, p. 6574-6585, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.056.

LI, J.; ZHANG, H.; WANG, T. **Advances in alternative ironmaking processes: A review of Tecnoled and its environmental benefits**. *Journal of Cleaner Production*, v. 380, p. 134512, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.134512.

LIMA, R.; FERREIRA, T. **Efeito da distribuição do material na zona de carga do alto-forno. Estudos em Engenharia Metalúrgica**, v. 15, n. 1, p. 45-59, 2023.

MARQUEZE, E. S.; COSTA, P. H. C. **Flexibilidade de matérias-primas no processo Tecnoled. Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 45-52, 2023. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.00303005/pdf/1573492069-3-3-22.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

MENDES, R.; ALVES, T. **Sistemas de coleta de gases e controle de poeira em altos-fornos. Engenharia Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 55-70, 2023.

MELLO, P.; SANTOS, R. **Governance and technology in global climate agreements. Journal of Environmental Studies**, v. 50, p. 347-359, 2023. DOI: 10.1080/10426914.2023.001045.

MONTEIRO, A. et al. **Redução da intensidade de carbono de usinas siderúrgicas em Minas Gerais**. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/4045/1/MONOGRRAFIA_Reduc%C3%A7%C3%A3oIntensidadeCarbono.pdf.

NAKAYAMA, Henrique Kemji. **Estudo sobre o alto-forno na siderurgia**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/9efb645b-8921-4f55-a66f-1967dd4c1315/HenriqueKemjiNakayama.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2025.

NOLDIN, J.; SILVA, P.; OLIVEIRA, R. **Tecnoled as a pathway for sustainable ironmaking: Process overview and challenges. Ironmaking & Steelmaking**, v. 48, n. 4, p. 390-398, 2021. DOI: 10.1080/03019233.2021.1893124.

OLIVEIRA, M.; COSTA, A. **Forest conservation and the role of the Amazon in global climate negotiations. Sustainable Development Perspectives**, v. 18, p. 87-98, 2025. DOI: 10.1016/j.sdp.2025.101045.

OLIVEIRA, P.; SANTOS, R. **Decarbonizing steel production: A comparative analysis of BF-BOF and Tecnoled technologies. Materials and Manufacturing Processes**, v. 35, p. 320-330, 2020. DOI: 10.1080/10426914.2020.1725656.

RADAR DO FUTURO. **Indústria discute o impacto da revolução digital na mineração e siderurgia**. Disponível em: <https://radardofuturo.com.br/industria-discute-o-impacto-da-revolucao-digital-na-mineracao-e-siderurgia/>.

RODRIGUES, L.; PEREIRA, C. **Dinâmica da escória e sua influência na pureza do ferro-gusa. Metalurgia e Ciência dos Materiais**, v. 14, n. 4, p. 121-138, 2024.

SANTANA, L. M. **A evolução dos mercados de carbono: do Protocolo de Quioto ao Acordo de Paris**. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br>.

SANTOS, L.; OLIVEIRA, M. **Sustentabilidade na produção de ferro-gusa: O papel do Tecnoled. Estudos em Engenharia de Materiais**, v. 10, n. 1, p. 112-130, 2024.

SANTOS, M. C. dos; NASCIMENTO, R. M. do; NASCIMENTO, R. M. **Hidróxidos duplos lamelares à base de escória de alto-forno**. Química Nova, São Paulo, v. 43, n. 8, p. 1030-1036, 2020. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/qn/a/cNzLB9ys4R7z5Z7gRTJxJwg/?lang=pt>. Acesso em: 13 mar. 2025.

SANTOS, M. A.; ALMEIDA, T. R.; Oliveira, F. P. **Fundamentos da Metalurgia de Ferrosos**. 2. ed. São Paulo: Editora Técnica, 2022.

SANTOS, T. F.; FERREIRA, L. P.; SILVA, M. R. **Processos de coqueria e sinterização na indústria siderúrgica: desafios e alternativas sustentáveis**. Scopus Journal of Energy Studies, v. 19, n. 1, p. 55-63, 2022.

SANTOS, B.; CARVALHO, J.; MONTEIRO, V. Otimização da operação do alto-forno: Impactos no rendimento do ferro-gusa. **Revista de Processos Metalúrgicos**, v. 22, n. 3, p. 90-105, 2023.

SILVA, A. J.; SOUZA, R. F.; BARROS, C. P. **Emission control and waste management in TecnoRed: Opportunities and challenges**. Materials Science and Engineering Journal, v. 45, p. 112-118, 2022. DOI: 10.1016/j.msej.2022.001112.

SILVA, A.; PEREIRA, C.; RODRIGUES, F. **Novas rotas para a siderurgia sustentável: TecnoRed e suas aplicações**. Metalurgia & Inovação, v. 15, n. 3, p. 88-105, 2023.

SILVA, J. R.; OLIVEIRA, P. L. **"Reações químicas na metalurgia do ferro"**. Revista de Metalurgia, v. 34, n. 2, p. 120-135, 2023.

SILVA, D.; MORAES, P.; ALBUQUERQUE, F. **Efeito da temperatura na combustão do coque e formação de monóxido de carbono no alto-forno**. Pesquisa em Engenharia de Materiais, v. 16, n. 2, p. 77-92, 2023.

SLIDESHARE. **Apostila redução dos minérios de ferro**. 2023. Disponível em: <https://www.slideshare.net>. Acesso em: 5 fev. 2025.

SMITH, J.; ROBERTS, L.; ZHANG, H. **Global stocktake under the Paris Agreement: Expectations and challenges** for COP 29. Climate Policy and Governance, v. 28, p. 401-412, 2023. DOI: 10.1016/j.cpg.2023.001045.

SINOBRAS. **Projeto de Engenharia da Nova Aciaria de Marabá avança para reta final**. Disponível em: <https://www.grupoacocearense.com.br/sinobras/imprensa/noticias/projeto-de-engenharia-da-nova-aciaria-de-maraba-avanca-para-reta-final/>. Acesso em: 14 mar. 2025.

SOUZA, P.; LIMA, H.; CARVALHO, J. Dinâmica da zona de carga no alto-forno e seu impacto na redução dos óxidos de ferro. **Revista Brasileira de Siderurgia**, v. 19, n. 2, p. 78-92, 2022.

STUDOCU. **Zonas do alto-forno e reações químicas**. 2023. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-de-sao-paulo/metalurgia-fisica/zonas-do-alto-forno-e-reacoes-quimicas/38872175>. Acesso em: 5 jan. 2025.

TECNOGAL. **Flexibilidade de matérias-primas no processo TecnoRed. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 3, n. 3, p. 22-27, 2020. Disponível em:

<https://tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.00303005/pdf/1573492069-3-3-22.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2025.

TECNORED. **Tecnored - Tecnologia para descarbonização da siderurgia**. Tecnored, 2025. Disponível em: <https://www.tecnored.com.br/>. Acesso em: 14 mar. 2025.

THE GUARDIAN. **The silver lining at a disappointing Cop29? It showed climate progress can survive Trump 2.0**. 2024. Disponível em: <https://www.theguardian.com/commentisfree/2024/nov/24/cop29-climate-progress-trump-presidency-politics-science>. Acesso em: 5 mar. 2025.

TURNER, A.; ZHANG, W. **Blast furnace slag reuse for concrete production**. *Construction Materials and Structures*, v. 12, p. 455-467, 2022. Disponível em: <Não disponível>. Acesso em: 4 jan. 2025.

UNFCCC. **El Acuerdo de París**. Disponível em: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>.

VALE. **Vale inicia em Marabá, PA, obra da primeira planta comercial da Tecnored, que contribuirá com a descarbonização da siderurgia**. Vale, 2025. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-inicia-em-maraba-pa-obra-da-primeira-planta-comercial-da-tecnored-que-contribuira-com-descarbonizacao-da-siderurgia>. Acesso em: 14 mar. 2025.

VARGAS, Uriel; CABRAL, Eduardo; BLATZ, Jürgen; BOYSEN, Dirk. **Processos de mistura na mineração e na siderúrgica**. Contribuição técnica ao XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, Salvador, BA, Brasil. Jandira: Eirich Industrial Ltda., 2020.

VOX. **Cop29: what was achieved and what remains to be done**. 2024. Disponível em: <https://www.vox.com/climate/387811/cop29-climate-change-baku-us-china-trump-biden>. Acesso em: 5 mar. 2025.

WIKIPÉDIA. **Briquete**. Disponível em: Acesso em: 12 mar. 2025.

WWF Brasil. **Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas**. In: Notícias. Brasil: Taís Meireles, 12 mar. 2020. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas>. Acesso em: 10 nov. 2024.

XI, Han; WU, Xiao; CHEN, Xianhao; SHA, Peng. **Artificial intelligent based energy scheduling of steel mill gas utilization system towards carbon neutrality**. *Applied Energy*, [S.L.], v. 295, p. 117069, ago. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117069>. Acesso em: 16 nov. 2024.

XU, L.; ZHANG, Y.; LI, M. **Environmental impact of blast furnace ironmaking and the role of alternative processes**. *Metals*, v. 11, n. 6, p. 857, 2021. DOI: 10.3390/met11060857.

ZHANG, H.; LI, K. **Innovations in steelmaking: Towards a carbon-neutral Tecnored process**. *Minerals Engineering*, v. 173, p. 107174, 2021. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107174.

ZHANG, H.; WANG, Y. **Carbon-neutral technologies in steel production: Tecnoled in focus.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 154, p. 111829, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.111829.

ZHANG, R. et al. **Evaluation of energy efficiency in Tecnoled versus blast furnace processes: An economic analysis.** *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 350-365, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.238.