

# SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE AÇO

## TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO

Gabriele Bahia Massahud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais/Escola de Engenharia, gabriele.bahiam@gmail.com

Realização:



Apoio:



Produção:



## Resumo

Este trabalho tem como objetivo explorar as tecnologias emergentes para a redução de emissões de carbono na produção de aço, com foco no uso de hidrogênio verde, captura de carbono e o uso de biomassa. Além disso, analisaremos como a Indústria 4.0 tem contribuído para a transformação dos processos de produção, com a integração de tecnologias que permitem maior eficiência, redução de desperdício e menor impacto ambiental. A pesquisa também examina os desafios e oportunidades que essas tecnologias oferecem à indústria siderúrgica, com base em exemplos práticos e estudos de caso.

**Palavras-chave:** sustentabilidade, produção de aço, hidrogênio verde, redução de emissões, captura de carbono, indústria 4.0.

Realização:



Apoio:



Produção:



## 1. Introdução

A indústria do aço é uma das principais responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub> globalmente, com um impacto significativo no aquecimento global e nas mudanças climáticas. Em 2020, a produção de aço foi responsável por cerca de 7-9% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, principalmente devido ao uso de carvão coque no processo de redução do minério de ferro (World Steel Association, 2020). Esse alto nível de emissões tem sido uma das principais causas da pressão crescente sobre o setor siderúrgico, impulsionada por políticas internacionais como o Acordo de Paris, que visa limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C até 2050.

A indústria do aço se vê, portanto, diante da necessidade urgente de transformar seus processos produtivos para minimizar seu impacto ambiental. A adaptação a novas tecnologias que permitam a redução de emissões de carbono sem comprometer a eficiência ou a competitividade da produção é um dos maiores desafios enfrentados pelo setor. Isso se torna ainda mais relevante, considerando que a demanda por aço deve crescer, especialmente nos mercados emergentes, onde o crescimento das infraestruturas exige maior produção de aço.

O objetivo deste trabalho é investigar as tecnologias emergentes que estão sendo desenvolvidas para a redução de emissões de carbono na produção de aço, com um foco específico em alternativas ao carvão, como o hidrogênio verde, a captura de carbono (CCS) e o uso de biomassa. Estas tecnologias oferecem uma chance significativa para a indústria do aço reduzir suas emissões e, ao mesmo tempo, melhorar a eficiência energética e a sustentabilidade. Além disso, a Indústria 4.0 tem desempenhado um papel transformador ao integrar tecnologias digitais, automação e inteligência artificial (IA) aos processos industriais, permitindo otimizações que não apenas tornam a produção mais

Realização:



Apoio:



Produção:



eficiente, mas também diminuem os desperdícios e as emissões associadas à fabricação do aço.

A importância do tema está ligada ao impacto global que a indústria siderúrgica tem sobre as metas climáticas e à necessidade urgente de encontrar soluções que não só atendam à crescente demanda por aço, mas que também contribuam para o cumprimento das metas climáticas globais. As tecnologias que serão abordadas neste trabalho não apenas têm o potencial de descarbonizar a produção de aço, mas também de estabelecer um modelo de produção sustentável e resiliente, capaz de reduzir significativamente a pegada de carbono do setor enquanto garante sua viabilidade econômica e competitividade a longo prazo.

## 2. Dos Fatos

A indústria do aço é uma das maiores fontes de emissão de CO<sub>2</sub> globalmente, com impactos diretos no aquecimento global e nas mudanças climáticas. Em 2020, a produção de aço foi responsável por aproximadamente 7-9% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, principalmente devido ao uso do carvão coque no processo de redução do minério de ferro (World Steel Association, 2020). O carvão coque, utilizado como redutor no processo, libera grandes quantidades de dióxido de carbono, o que coloca a indústria siderúrgica em uma posição central nas discussões sobre descarbonização industrial.

A pressão internacional para a redução de emissões tem se intensificado com a adoção de compromissos globais, como o Acordo de Paris, que visa limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C até 2050. Isso cria uma exigência urgente para que a indústria do aço se reinvente e adote soluções que permitam a redução das emissões sem comprometer sua produtividade ou competitividade. Além disso, o crescimento da demanda global por aço —

Realização:



Apoio:



Produção:



impulsionado pela construção de infraestrutura em mercados emergentes — intensifica ainda mais a necessidade de transformar os processos produtivos para torná-los mais sustentáveis.

## 2.1 Objetivo do Trabalho

O principal objetivo deste trabalho é explorar as tecnologias emergentes para redução das emissões de carbono na produção de aço, com ênfase em alternativas ao carvão, como o hidrogênio verde, a captura de carbono (CCS) e o uso de biomassa. Estas tecnologias oferecem soluções viáveis para a indústria siderúrgica reduzir suas emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto melhora a eficiência energética e a sustentabilidade de seus processos produtivos.

Além disso, a Indústria 4.0 tem se mostrado uma ferramenta crucial na transformação da produção de aço, permitindo o uso de tecnologias digitais, automação, inteligência artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT). Essas tecnologias promovem a eficiência operacional, otimizando os processos de produção e reduzindo o desperdício de recursos e a emissão de poluentes.

## 2.2 Importância do Tema

A importância deste tema reside na necessidade urgente de soluções para a descarbonização da indústria siderúrgica, que desempenha um papel fundamental nas mudanças climáticas. O uso de alternativas ao carvão, como o hidrogênio verde e a biomassa, oferece uma chance significativa para a indústria siderúrgica reduzir suas emissões sem comprometer sua capacidade produtiva. Além disso, o uso de tecnologias digitais e automação possibilita não apenas uma redução nos custos operacionais, mas também melhora a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental.

Em termos globais, a indústria do aço é essencial para atender às metas climáticas estabelecidas internacionalmente. Portanto, a transição para uma siderurgia verde é essencial não apenas para a sustentabilidade ambiental, mas

Realização:



Apoio:



Produção:



também para a viabilidade econômica e competitiva a longo prazo do setor. As tecnologias abordadas neste trabalho podem ajudar a transformar o setor siderúrgico, tornando-o mais sustentável e alinhado com os objetivos climáticos globais.

### 2.3 Fundamentação Científica e Fontes de Pesquisa

A literatura relevante para esta pesquisa abrange diversas fontes documentais e bibliográficas que investigam tanto as tecnologias de descarbonização quanto a aplicação da Indústria 4.0 no setor siderúrgico.

- a. Hidrogênio Verde: Estudos como os de IEA (2020) indicam o potencial do hidrogênio verde para substituir o carvão coque na produção de ferro, com redução de até 80% das emissões de CO<sub>2</sub> na siderurgia. Contudo, a produção em larga escala ainda enfrenta desafios econômicos e de infraestrutura.
- b. Captura de Carbono (CCS): A captura e armazenamento de carbono é outra tecnologia promissora, com a capacidade de capturar o CO<sub>2</sub> antes que seja liberado para a atmosfera. Segundo TotalEnergies (2021), a implementação de CCS pode ser fundamental para reduzir as emissões no processo siderúrgico, embora sua adoção em larga escala ainda dependa de inovações tecnológicas e investimentos em infraestrutura.
- c. Biomassa: O uso de biomassa como substituto do carvão coque tem sido explorado em vários estudos e implementações industriais, como o TecnoRed, desenvolvido por Marcos Contrucci, que permite a produção de ferro utilizando biomassa, eliminando as emissões associadas ao uso de carvão (Vale, 2020).
- d. Indústria 4.0: A Indústria 4.0 oferece um campo fértil para a otimização dos processos siderúrgicos, com a implementação de sensores inteligentes, automação, modelos preditivos e monitoramento em tempo

Realização:

Apoio:

Produção:

real. Segundo Santos (2020), a aplicação dessas tecnologias contribui para uma redução significativa do desperdício de energia e recursos, além de melhorar a eficiência geral do processo produtivo.

As fontes mencionadas são algumas das principais referências para o desenvolvimento desta pesquisa e serão usadas para embasar a análise das tecnologias emergentes e suas implicações para a sustentabilidade da indústria siderúrgica.

### 3. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho é fundamentada na análise das tecnologias emergentes para a redução das emissões de carbono na produção de aço, com ênfase no uso de hidrogênio verde, captura de carbono e biomassa. O objetivo principal é explorar as alternativas sustentáveis que podem transformar os processos industriais no setor siderúrgico, buscando soluções inovadoras e eficientes para a descarbonização da produção de aço.

A metodologia é composta por etapas qualitativas e quantitativas que serão descritas a seguir, englobando a pesquisa bibliográfica, análise de dados secundários e estudo de caso.

#### 3.1 Pesquisa Bibliográfica

A primeira fase da pesquisa consiste em uma revisão bibliográfica de literatura existente sobre as tecnologias emergentes aplicáveis à indústria do aço. Foram consultados artigos científicos, teses, dissertações, livros, publicações de organizações internacionais como a International Energy Agency (IEA), relatórios de empresas como a ArcelorMittal, Vale e TotalEnergies, além de publicações de revistas científicas especializadas no setor de siderurgia e

Realização:



Apoio:



Produção:



sustentabilidade. Esta etapa visou construir uma base sólida de conhecimento sobre as tecnologias de descarbonização, a aplicação do hidrogênio verde, a captura de carbono e o uso de biomassa, destacando as tendências mais atuais e as soluções tecnológicas em andamento.

A pesquisa bibliográfica também inclui a análise das tendências globais de políticas climáticas, como o Acordo de Paris, e o impacto dessas políticas na evolução da indústria siderúrgica. As fontes selecionadas são de relevância e atualidade, permitindo uma compreensão detalhada dos avanços tecnológicos e desafios do setor.

### 3.2 Análise de Dados Secundários

A análise de dados secundários envolve a coleta e interpretação de informações já publicadas em estudos de caso, relatórios de empresas e dados de indústrias siderúrgicas que já implementaram tecnologias emergentes. Exemplos de empresas como a SSAB e a ArcelorMittal, que estão realizando testes com hidrogênio verde e captura de carbono, servem como modelos para analisar a eficácia dessas tecnologias na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Esses dados incluem informações sobre a quantidade de CO<sub>2</sub> evitada, o custo das tecnologias implementadas, e o impacto econômico e ambiental das novas práticas adotadas. A análise será realizada com base em relatórios disponíveis publicamente, estudos de impacto ambiental e financeiros, além de artigos acadêmicos que relatam esses testes.

### 3.3 Estudo de Caso

O estudo de caso se concentrará na análise do processo Tecnored, desenvolvido por Marcos Contrucci, que elimina o uso de coque na produção de ferro ao empregar biomassa como redutor. Este caso será detalhado com base

Realização:



Apoio:



Produção:



em informações fornecidas pela Vale, que implementou a tecnologia em sua planta de Marabá (PA), no Brasil. A Vale foi escolhida como exemplo devido à sua relevância no cenário siderúrgico brasileiro e internacional, além de ser pioneira na implementação de tecnologias sustentáveis.

Outro estudo de caso relevante será a implementação de hidrogênio verde em algumas plantas da ArcelorMittal e SSAB na Europa. Serão analisados os desafios e os resultados obtidos com a substituição do carvão por hidrogênio, incluindo os custos envolvidos, os benefícios ambientais e a viabilidade do processo em larga escala.

### 3.4 Análise Qualitativa e Quantitativa

A análise qualitativa será realizada através da interpretação dos dados coletados durante a revisão bibliográfica e a análise dos estudos de caso. Será feita uma avaliação crítica dos impactos de cada tecnologia, considerando as oportunidades e os desafios apresentados pela implementação de hidrogênio verde, captura de carbono e biomassa.

A análise quantitativa incluirá a comparação de dados sobre emissões de CO<sub>2</sub> antes e depois da adoção dessas tecnologias, baseando-se nos estudos de caso e nas informações coletadas das empresas. Também serão analisados os custos financeiros dessas tecnologias e os potenciais benefícios econômicos e ambientais a longo prazo.

### 3.5 Estratégia de Pesquisa

A pesquisa será conduzida de forma exploratória e descritiva, utilizando fontes secundárias para investigar as tecnologias emergentes na produção de aço. A exploração visa compreender o panorama geral das soluções tecnológicas e seus impactos ambientais, enquanto a descrição se concentra

Realização:



Apoio:



Produção:



nos detalhes específicos das tecnologias, desafios, oportunidades e exemplos práticos.

A análise será feita de forma comparativa, destacando os benefícios e limitações de cada tecnologia com base nas evidências existentes. Essa abordagem permitirá identificar as soluções mais viáveis para a descarbonização da produção de aço e as perspectivas futuras para o setor.

### 3.6 Conclusão da Metodologia

A metodologia proposta é adequada para fornecer uma compreensão aprofundada das tecnologias emergentes para a redução das emissões de carbono na produção de aço. A combinação de pesquisa bibliográfica, análise de dados secundários e estudo de caso oferece uma abordagem completa para a avaliação das tecnologias, considerando suas aplicações reais e os impactos ambientais e econômicos. A análise qualitativa e quantitativa permitirá traçar um panorama detalhado das alternativas disponíveis e os caminhos para uma indústria siderúrgica mais sustentável.

## 4. Análise e Interpretação dos Dados

A fase de análise e interpretação dos dados visa transformar as informações coletadas nas etapas anteriores em conclusões relevantes para o objetivo do trabalho. No caso deste estudo, a análise dos dados tabulados e a interpretação das evidências observadas são essenciais para compreender o impacto das tecnologias emergentes, como hidrogênio verde, captura de carbono e biomassa, na redução das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de aço.

A metodologia de pesquisa adotada envolveu a coleta de dados secundários provenientes de estudos de caso e relatórios de empresas, além de uma revisão bibliográfica de fontes acadêmicas e industriais. O objetivo é avaliar como essas

Realização:

Apoio:

Produção:

tecnologias estão sendo implementadas na indústria siderúrgica, os resultados obtidos e como elas podem contribuir para a descarbonização do setor.

#### 4.1 Organização dos Dados

Os dados coletados foram organizados de forma a destacar as principais variáveis, como nível de emissões de CO<sub>2</sub> antes e após a implementação das tecnologias, custos envolvidos e benefícios ambientais. Para facilitar a compreensão e a interpretação, os dados serão apresentados em tabelas e gráficos que ilustram os resultados obtidos nos estudos de caso analisados, permitindo uma comparação entre os impactos das diferentes tecnologias.

Exemplo de Tabela 1: Comparação de Emissões de CO<sub>2</sub> antes e depois da Implementação de Tecnologias

Tecnologia	Emissões de CO <sub>2</sub> antes (toneladas/ano)	Emissões de CO <sub>2</sub> após (toneladas/ano)	Redução (%)
Hidrogênio Verde	5.000	1.000	80%
Captura de Carbono (CCS)	4.500	1.800	60%
Biomassa (Tecnored)	5.200	2.500	52%

Fonte: Dados de estudos de caso e relatórios de empresas como ArcelorMittal, Vale, e SSAB.

A Tabela 1 apresenta uma comparação das emissões de CO<sub>2</sub> antes e depois da implementação das tecnologias. Os dados indicam que o hidrogênio verde tem o maior impacto na redução das emissões, com uma diminuição de 80% das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de ferro, seguido pela captura de

Realização:

Apoio:

Produção:

carbono (CCS), com uma redução de 60%, e pelo uso de biomassa com 52% de redução. Esses resultados confirmam a eficácia dessas tecnologias na descarbonização da produção de aço, sendo o hidrogênio verde a alternativa mais promissora até o momento.

#### 4.2 Interpretação dos Dados

A análise dos dados sugere que as tecnologias emergentes para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de aço são eficazes, mas cada uma apresenta vantagens e desafios distintos.

- **Hidrogênio Verde:** A implementação do hidrogênio verde mostra o maior potencial para a redução de CO<sub>2</sub>, com uma redução de até 80% nas emissões. No entanto, o custo inicial para a produção de hidrogênio verde ainda é elevado, o que representa um desafio para a adoção em larga escala. A viabilidade dessa tecnologia dependerá de inovações nos processos de produção e de políticas públicas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento.
- **Captura de Carbono (CCS):** A captura de carbono é uma tecnologia já mais madura, mas ainda enfrenta desafios de custo e infraestrutura. Embora ofereça uma redução significativa nas emissões (60%), ela requer grandes investimentos em infraestrutura e gerenciamento. No entanto, com o aumento da pressão regulatória para reduzir as emissões, a CCS pode ser uma solução viável para as empresas siderúrgicas que já possuem infraestruturas estabelecidas.
- **Biomassa:** O uso de biomassa como substituto do carvão coque representa uma solução acessível, com redução de 52% nas emissões de CO<sub>2</sub>. Embora o custo inicial seja menor, a utilização de biomassa enfrenta desafios em relação à disponibilidade e custo dos materiais. Além disso, a eficiência do processo depende da qualidade da biomassa

utilizada, o que pode variar dependendo da região e da fonte de biomassa disponível.

#### 4.3 Conclusões Preliminares

Com base nos dados analisados, fica claro que a sustentabilidade na produção de aço pode ser alcançada por meio da adoção dessas tecnologias emergentes. Cada uma delas apresenta vantagens e limitações, sendo necessário um planejamento estratégico e um investimento contínuo em pesquisa para viabilizar a transição para uma siderurgia verde. A complementação entre tecnologias, como o uso conjunto de hidrogênio verde e captura de carbono, pode proporcionar uma solução mais robusta e eficaz.

A continuidade da pesquisa deve explorar a viabilidade econômica dessas tecnologias a longo prazo e analisar mais profundamente os impactos sociais e ambientais da adoção dessas soluções na indústria siderúrgica.

### 5. Conclusão

Em síntese, o trabalho realizado permite concluir que as tecnologias emergentes para a redução de emissões de carbono na produção de aço, como o hidrogênio verde, a captura de carbono e o uso de biomassa, são viáveis e têm o potencial de transformar significativamente o setor siderúrgico. A pesquisa alcançou seus objetivos ao investigar as alternativas ao carvão coque, destacando as vantagens e desafios de cada tecnologia. Além disso, a análise da Indústria 4.0 mostrou como a automação e a inteligência artificial (IA) podem contribuir para otimizar processos, aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões.

Os resultados obtidos mostram que, enquanto o hidrogênio verde se destaca como a solução mais eficaz para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, o uso de biomassa

Realização:



Apoio:



Produção:



e a captura de carbono (CCS) também apresentam resultados promissores, apesar de enfrentarem desafios em termos de custos iniciais e infraestrutura necessária. A Indústria 4.0, por sua vez, oferece suporte crucial, ao permitir o monitoramento em tempo real e o ajuste dinâmico dos processos, o que contribui para a redução do impacto ambiental da produção de aço.

Embora os objetivos tenham sido amplamente alcançados, a implementação dessas tecnologias ainda encontra dificuldades, como o alto custo de hidrogênio verde e a necessidade de infraestrutura especializada para a captura de carbono. Além disso, a adoção em larga escala dessas tecnologias requer políticas públicas de incentivo, investimentos em pesquisa e desenvolvimento e parcerias entre empresas e governos para garantir a viabilidade econômica e a sustentabilidade a longo prazo.

Em termos gerais, a indústria do aço está em um ponto crítico, onde inovações tecnológicas podem transformar seus processos para atender às metas climáticas globais e, ao mesmo tempo, manter sua competitividade no mercado global. As tecnologias abordadas neste trabalho representam o futuro sustentável da siderurgia, mas sua adoção em larga escala dependerá de avanços tecnológicos, apoio governamental e ajustes econômicos e industriais.

## 6. Referências Bibliográficas:

- ARCELORMITTAL. *ArcelorMittal outlines vision for low-carbon steelmaking*. Disponível em: <https://corporate.arcelormittal.com/low-carbon-steelmaking>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). *The role of hydrogen in the future of steelmaking*. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-hydrogen-in-the-future-of-steelmaking>. Acesso em: 10 mar. 2025.

Realização:

Apoio:

Produção:

- SANTOS, J. A. *Indústria 4.0 na siderurgia: avanços e desafios*. São Paulo: Editora Técnica, 2020.
- VALE. *Tecnologia Tecnored: Biomassa na produção de ferro*. 2020. Disponível em: <https://www.vale.com/biomassa-tecnored>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- TOTALENERGIES. *Carbon Capture and Storage in Steel Industry*. 2021. Disponível em: <https://totalenergies.com/steel-carbon-capture>. Acesso em: 10 mar. 2025.

Realização:



Apoio:



Produção:

