

TRANSIÇÃO DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA PARA ECONOMIA VERDE: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Carlos Alexandre da Silva Alves, Leandro Luis Portella, Marcelo Bergamini de Carvalho, Rodrigo André de Souza Ribeiro, Amir Rivaroli Junior

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Fatec Pindamonhangaba, Rodovia Vereador Abel Fabrício Dias, 4010 - Água Preta, 12445-010 – Pindamonhangaba.

casalves91@gmail.com; leandroluisportella@hotmail.com; marcelo.carvalho30@fatec.sp.gov.br,
rodrigo.ribeiro18@fatec.sp.gov.br, amir.rivaroli@fatec.sp.gov.br

Resumo

A transição da siderurgia para a economia verde é impulsionada pelas metas globais de descarbonização. Este estudo analisa os desafios e oportunidades para o setor siderúrgico brasileiro. A metodologia foi qualitativa, baseada em revisão bibliográfica e dados comparativos internacionais. Constatou-se que, embora o Brasil possua matriz energética renovável, a siderurgia ainda é emissora intensa de CO₂. Há necessidade de modernização dos processos produtivos. Entre as inovações, destaca-se o briquete verde da Vale, que reduz até 10% das emissões. O uso de hidrogênio verde surge como alternativa promissora. Tecnologias como ferro-esponja e eletrólise também ganham relevância. Projetos internacionais, como o HYBRIT, confirmam a viabilidade dessas soluções. A modernização das matérias-primas é fundamental para reduzir impactos ambientais. Conclui-se que investimentos em tecnologias limpas são essenciais para competitividade e sustentabilidade.

Palavras-chave: Siderurgia verde; Emissões; Hidrogênio verde; Briquete; Inovação

Área do Conhecimento: (Consulte área e subárea em que o trabalho será enviado no endereço <http://www.inicepg.univap.br/areas-de-conhecimento>).

Introdução

A indústria siderúrgica é historicamente reconhecida como um dos pilares do desenvolvimento industrial global, tendo papel estratégico na infraestrutura, na construção civil, no setor automotivo e na produção de bens de capital. Contudo, esse protagonismo também está associado a uma elevada pegada ambiental, visto que o setor responde por cerca de 7 a 9% das emissões globais de dióxido de carbono, segundo estimativas recentes da Agência Internacional de Energia (IEA, 2020). Essa realidade é agravada pelo cenário de intensificação das mudanças climáticas e pelo fortalecimento de políticas ambientais, que têm pressionado as indústrias de base a repensarem seus modelos de produção (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023). Assim, a transição para uma economia verde deixou de ser uma opção e passou a configurar-se como uma exigência estratégica e urgente para a siderurgia mundial.

Essa transição envolve transformações de ordem tecnológica, estrutural e regulatória. Entre as principais alternativas de mitigação das emissões destacam-se a adoção de rotas de produção de baixo carbono, como a utilização do hidrogênio verde no processo de redução direta do minério de ferro, além do aproveitamento de fontes energéticas renováveis (IEA, 2020). Países desenvolvidos, como Suécia e Alemanha, têm se destacado nesse movimento ao investir em tecnologias disruptivas, como o projeto HYBRIT, que busca produzir aço livre de combustíveis fósseis (MORRISON et al., 2022). Essas inovações reforçam a viabilidade de soluções sustentáveis para a indústria, mas também evidenciam as dificuldades de adaptação em contextos distintos.

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, os desafios são ainda mais significativos devido a limitações de acesso a tecnologias avançadas, deficiências na infraestrutura energética e restrições relacionadas ao financiamento sustentável (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023). Apesar disso, o setor siderúrgico brasileiro possui vantagens comparativas, como a predominância de uma matriz energética renovável, que pode contribuir para reduzir as emissões em relação a outros países. Nesse

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

contexto, este trabalho tem como objetivo analisar os principais desafios e oportunidades da transição da indústria siderúrgica para a economia verde, destacando o papel das pressões regulatórias, dos avanços tecnológicos e da reconfiguração das cadeias produtivas na construção de um modelo industrial mais sustentável e alinhado às metas globais de descarbonização.

Metodologia

A produção de aço, historicamente baseada no alto-forno e no convertidor LD, exige grande quantidade de energia e combustíveis fósseis, sobretudo carvão coque, o que coloca a siderurgia entre os setores mais poluentes do mundo. De acordo com a World Steel Association (2023), a média global de emissões é de 1,85 tonelada de CO₂ por tonelada de aço produzido, variando conforme a rota tecnológica e a matriz energética utilizada. Esse cenário desafia os compromissos climáticos assumidos em acordos internacionais, como o Acordo de Paris, pressionando o setor a buscar alternativas mais sustentáveis.

Entre os caminhos tecnológicos para reduzir as emissões, destacam-se a redução direta do minério de ferro com hidrogênio (DRI-H₂), o uso ampliado de sucata metálica em fornos elétricos a arco (EAF) e o desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS). A Agência Internacional de Energia (IEA, 2020) aponta que, para atingir a neutralidade de carbono até 2050, pelo menos 50% da produção mundial deverá migrar para processos de baixo carbono até 2030. Projetos como o HYBRIT, na Suécia, evidenciam a viabilidade da substituição do carvão coque por hidrogênio verde, alcançando emissões próximas de zero, embora os custos e a disponibilidade de hidrogênio limpo ainda sejam obstáculos (HASANBEIGI; SPRINGER, 2019).

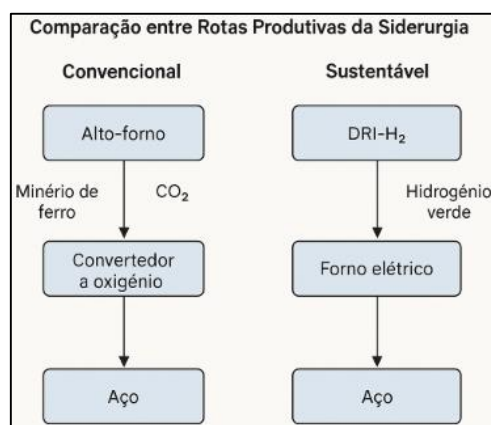
Nesse contexto, o processo DRI-H₂ se consolida como uma das alternativas mais promissoras para a descarbonização do setor. Diferente da rota convencional, que depende intensivamente do carvão, o DRI-H₂ reduz a hematita (Fe₂O₃) a ferro metálico utilizando hidrogênio como agente redutor, emitindo apenas vapor d'água como subproduto. A substituição do carvão por vetores energéticos limpos, como o hidrogênio verde, representa uma mudança de paradigma na siderurgia, possibilitando a construção de um setor mais sustentável e alinhado às metas globais de descarbonização. As Figuras 1 e 2 ilustram, de forma comparativa, as principais diferenças entre a rota convencional baseada em alto-forno e a alternativa sustentável com redução direta a hidrogênio (DRI-H₂).

Figura 1 – Comparativo entre as rotas tradicional (alto-forno) e sustentável (DRI-H₂) na produção de aço.



Fonte: Elaboração adaptada de IEA (2020)

Figura 2 – Comparativo entre as rotas produtivas na siderurgia.



Fonte: Elaboração adaptada de IEA (2020)

Para o trabalho foi adotado uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada em revisão brasileira rumo à economia verde. A metodologia baseou-se em uma análise comparativa entre o Brasil e países líderes no processo de descarbonização, como Suécia, Alemanha, Japão e China.

A pesquisa utilizou dados secundários provenientes de relatórios de instituições internacionais (IEA, World Steel Association, World Economic Forum), publicações científicas e documentos de órgãos governamentais. A comparação considerou critérios como intensidade de carbono por tonelada de aço, tecnologias predominantes (alto-forno, forno elétrico, DRI-H₂, CCUS), uso de fontes renováveis,

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

reciclagem de sucata metálica, políticas de incentivo e participação em compromissos internacionais como o SteelZero.

O recorte temporal da análise abrange o período de 2015 a 2024, com dados nacionais obtidos em fontes como Instituto Aço Brasil, BNDES e MDIC, enquanto os internacionais foram retirados de relatórios da IEA (2020; 2023), Material Economics (2019) e estudos de caso como o projeto HYBRIT. A justificativa da abordagem está na necessidade de compreender o posicionamento do Brasil frente ao cenário global, identificando lacunas, oportunidades e boas práticas para apoiar a formulação de estratégias mais eficazes de transição ecológica no setor siderúrgico. O quadro 1 mostra dados comparativos reais da siderúrgica verde

Quadro 1 - Comparativo Internacional da Siderurgia Verde

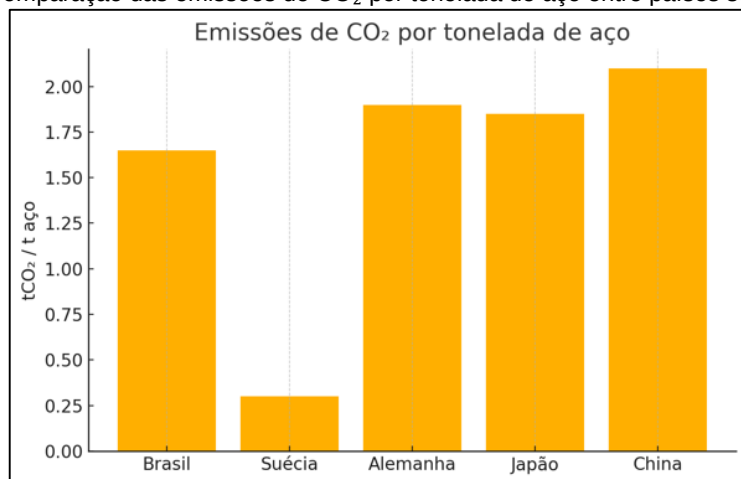
País	Intensidade de CO ₂ (t/t aço)	% Sucata na produção	% Renováveis na matriz energética na siderúrgica	Tecnologia Dominante	Políticas Públicas	Participação em iniciativas globais
Brasil	1,65	30	65	Alto Forno	Moderadas	Baixa
Suécia	0,3	90	98	DRI-H ₂	Avançadas	Alta
Alemanha	1,4	60	40	Alto Forno/CCUS	Avançadas	Alta
China	2,1	20	15	Alto Forno	Limitadas	Média
Japão	1,9	35	25	Alto Forno / EAF	Moderadas	Média

Fonte: Os autores, 2025.

Resultados

A análise dos dados mostra que o Brasil apresenta uma intensidade média de emissão de aproximadamente 1,65 toneladas de CO₂ por tonelada de aço produzido. Esse valor é inferior ao índice da China (2,10 t/t), mas ainda está distante das melhores práticas internacionais, como as da Suécia (0,30 t/t) e da Alemanha (1,40 t/t). Esses números evidenciam o descompasso do país em relação aos líderes globais na transição para a siderurgia verde. A figura 3 mostra a comparação das emissões de CO₂ por tonelada entre esses países.

Figura 3 – Comparação das emissões de CO₂ por tonelada de aço entre países selecionados.



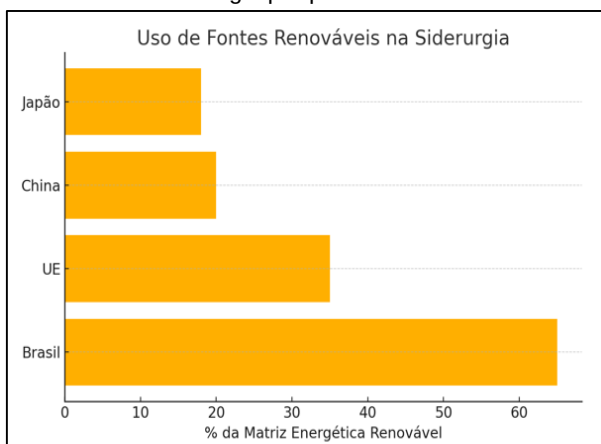
Fonte: IEA (2020); World Steel Association (2023)

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

O Brasil apresenta um diferencial positivo na matriz energética da siderurgia, com aproximadamente 65% da energia proveniente de fontes renováveis. Esse índice se deve, sobretudo, ao uso de carvão vegetal e à elevada participação de fontes limpas na matriz elétrica nacional. Com esse resultado, o país se posiciona à frente de grandes produtores como a China e o Japão, embora ainda esteja abaixo de países como a Suécia, cuja matriz energética atinge 98% de fontes renováveis.

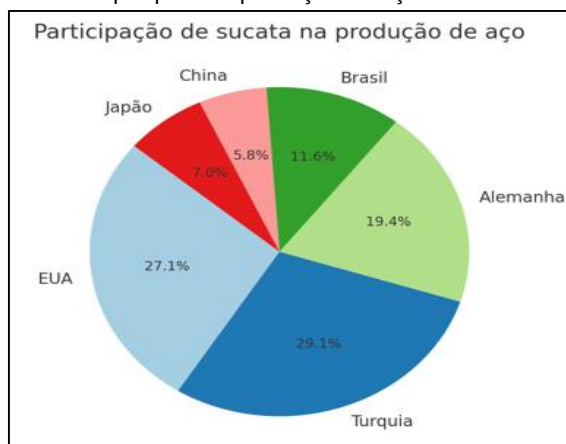
A participação da sucata metálica na produção de aço no Brasil ainda é relativamente baixa, representando cerca de 30% do total. Em comparação, países como a Suécia e a Alemanha, que apresentam índices significativamente superior, de 90% e 60%, respectivamente. Esses dados revelam uma diferença expressiva no aproveitamento de sucata como matéria-prima entre o Brasil e os países mais avançados na siderurgia verde. A figura 04 e 05, demonstram a porcentagem de fontes renováveis utilizadas na siderurgia por país e a participação de metálica por países na produção de aço.

Figura 4 – Porcentagem de fontes renováveis utilizadas na siderurgia por país.



Fonte: IEA (2020).

Figura 5 – Participação percentual de sucata metálica por país na produção de aço.



Fonte: World Steel Association (2023)

As inovações em matérias-primas despontam como estratégias fundamentais para a siderurgia verde. O briquete verde, da Vale, produzido a frio e sem uso de água, pode substituir o sinter nos altos-fornos, reduzindo até 10% das emissões de CO₂ e diminuindo a liberação de poluentes (VALE, 2023). Internacionalmente, iniciativas como o projeto HYBRIT, na Suécia, comprovam a viabilidade do hidrogênio verde, enquanto empresas como ArcelorMittal ampliam o uso de HBI e a Boston Metal desenvolve a tecnologia MOE, visando aço livre de emissões diretas de carbono. O quadro 2 mostra os países com tecnologias para redução de CO₂.

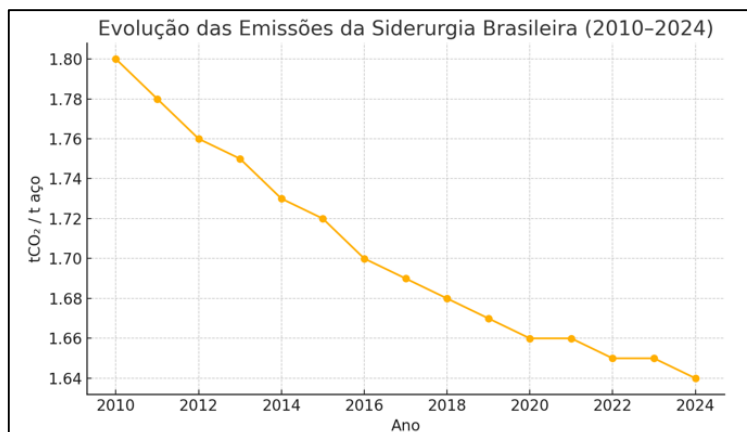
Quadro 2 – Países e tecnologias desenvolvidas para redução de emissão de CO₂.

País	Tecnologias
Suécia	DRI-H ₂ , H2GreenSteel
Alemanha	CCUS, EAF híbrido
Japão	Eficiência energética
Brasil	Briquete Verde
China	DRI com carvão vegetal

Fonte: Os autores, 2025.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

O Brasil ainda apresenta participação moderada em políticas públicas e iniciativas globais ligadas à siderurgia verde. Existem ações setoriais, como o Acordo Setorial para o Aço, mas falta uma política nacional integrada. Em contraste, Suécia e Alemanha já possuem programas estruturados de incentivo. Também se destacam os avanços em insumos mais limpos, como briquetes, ferro-esponja e hidrogênio, que estão transformando a base produtiva. A Figura 6 apresenta a tendência de redução das emissões brasileiras entre 2010 e 2024.



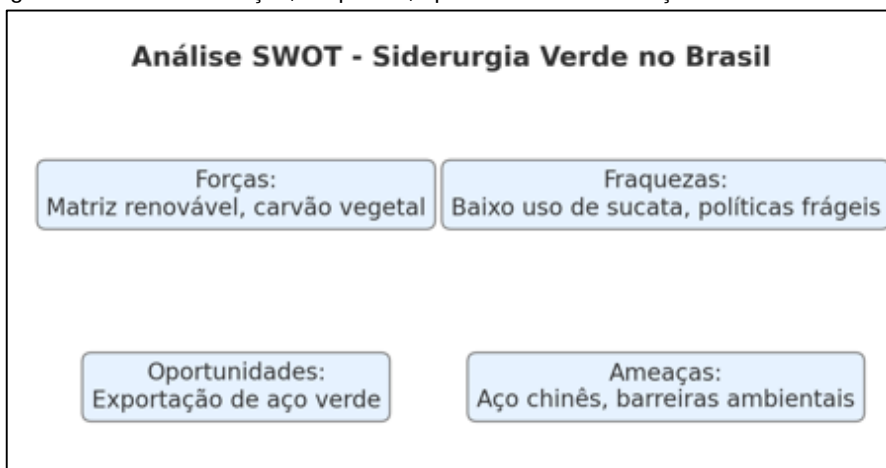
Fonte: Elaboração própria com base em levantamentos, 2025.

Discussão

Os resultados mostram que a siderurgia brasileira ainda é marcada pela dependência da rota de alto-forno, com baixa adoção de tecnologias limpas como DRI-H₂, redução de carbono com hidrogênio, e CCUS, captura e armazenamento de carbono, o que a distancia de países mais avançados em descarbonização. Apesar disso, o país tem vantagens estruturais, como o uso de energia renovável e biomassa, que podem favorecer sua transição para a economia verde, desde que haja investimentos em inovação e políticas eficazes.

Outros desafios incluem a baixa utilização de sucata, que limita a redução das emissões em comparação a práticas europeias, e a ausência de uma política nacional robusta, que enfraquece a competitividade internacional. Em contrapartida, inovações como o briquete verde e iniciativas internacionais, como HYBRIT, hidrogênio verde, e MOE, eletrólise de óxidos fundidos, demonstram o potencial de substituição de insumos fósseis por vetores limpos, ainda que os custos e a disponibilidade de hidrogênio verde sejam entraves. Nesse cenário, o Brasil possui condições para avançar, mas precisa consolidar estratégias de modernização e integração global. Pensando nisso foi criada uma análise SWOT, conforme demonstrado na figura 5.

Figura 5 – Análise de forças, fraquezas, oportunidades e ameaças do Brasil.



Fonte: Os autores, 2025.

Conclusão

A transição da siderurgia para a economia verde é um dos maiores desafios industriais atuais, devido à elevada participação do setor nas emissões globais de CO₂. No caso brasileiro, apesar da matriz energética majoritariamente renovável, a produção de aço ainda se baseia em rotas tradicionais intensivas em carbono, o que reforça a necessidade de modernização tecnológica e alinhamento às práticas de países líderes em descarbonização.

Por outro lado, iniciativas como o briquete verde da Vale, o uso de HBI e ferro-esponja em processos de redução direta com hidrogênio (DRI-H₂) e a adoção de fontes energéticas sustentáveis demonstram caminhos promissores. Experiências internacionais, como o projeto HYBRIT, evidenciam que a descarbonização é viável, e o Brasil tem potencial de protagonismo se houver integração entre inovação, investimentos e políticas públicas. Conclui-se que a transição não depende apenas de novas tecnologias, mas de uma transformação sistêmica que una indústria, governo e cooperação internacional para garantir sustentabilidade e competitividade no setor siderúrgico.

Referências

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking*. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Acesso em: 24 mar. 2025.

HASANBEIGI, A.; SPRINGER, C. *How Clean is the U.S. Steel Industry?* Global Efficiency Intelligence, 2019. Disponível em: <https://www.globalefficiencyintel.com>. Acesso em: 24 mar. 2025.

HYBRIT. *Hybrit*. Disponível em: <https://www.hybritdevelopment.se/en/>. Acesso em: 6 abr. 2025.

MATERIAL ECONOMICS. *Industrial Transformation 2050: Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*. Stockholm: Material Economics, 2019. Disponível em: <https://materialeconomics.com>. Acesso em: 24 mar. 2025.

MORRISON, J.; WORRELL, E.; [e outros autores]. *Pathways to a Low-Carbon Iron and Steel Industry in the Medium-Term – the Case of Germany*. Journal of Cleaner Production, 2017, 163, pp. 84–97.

WORLD STEEL ASSOCIATION. 2023, *World Steel in Figures*. Brussels: Worldsteel, 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/publications/>. Acesso em: 24 mar. 2025.