

Descarbonização da Indústria Siderúrgica Brasileira: Oportunidades Estratégicas e Desafios Tecnológicos

Análise Comparativa Global e Perspectivas para o Brasil

Prof. Fabio Miani
DPIA - Departamento de Engenharia Politécnica e Arquitetura
Universidade de Udine, Itália

Preparado para Prof. André Costa e Silva
Novembro 2025

14 de novembro de 2025

Sumário

- 1 Contexto Global da Siderurgia
- 2 Brasil: Posição Estratégica Única
- 3 Cenários e Rotas Tecnológicas
- 4 Projetos Brasileiros de Vanguarda
- 5 Estrutura de Políticas e Apoio Governamental
- 6 Comparação Internacional
- 7 Desafios e Oportunidades Estratégicas
- 8 Recomendações Estratégicas
- 9 Conclusões e Próximos Passos

Produção Mundial de Aço 2024

Top 5 Produtores:

- 1 China: 1.005,1 MT (53,3%)
- 2 Índia: 149,4 MT (7,9%)
- 3 Japão: 84,0 MT (4,5%)
- 4 EUA: 79,5 MT (4,2%)
- 5 Rússia: 71,0 MT (3,8%)

Brasil: 33,8 MT (9ª posição global)

Tendências Globais

- Produção mundial: 1.884,6 MT
- Declínio de 1,0% vs. 2023
- Ásia: 75,7% da produção
- América do Sul: 2,0%

Emissões do Setor Siderúrgico

- **7-9%** das emissões globais de CO₂
- **2,0 toneladas CO₂/tonelada aço** (média BF-BOF)
- **0,4-0,5 ton CO₂/ton aço** (rota EAF-sucata)

Europa

Neutralidade 2050
H₂-DRI + CBAM

China

Pico antes 2030
Consolidação + EAF

Japão

GREINS Fund
Super COURSE50

Produção e Estrutura:

- **33,8 MT** produção 2024 (+5,6% vs. 2023)
- 9º produtor mundial
- 76% BF-BOF (intensivo em emissões)
- 24% EAF (menor emissão)

Principais Produtores:

- Gerdau (EAF especializado)
- CSN (integrado BF-BOF)
- ArcelorMittal Brasil
- Usiminas

Contexto Regional

América do Sul: 37,7 MT

- Brasil: 89,7%
- Argentina: 10,3%
- Outros: residual

Desafio

Transformar 76% da capacidade intensiva em carbono

Vantagens Competitivas Únicas do Brasil

1. Recursos Energéticos Renováveis

- **Top 10 global:** hidroelétrica, bioenergia, eólica e solar
- **Top 3:** capacidade prospectiva solar e eólica
- **Essencial para:** produção de hidrogênio verde em larga escala
- **Custo:** potencial para aço verde mais barato que outras nações

2. Biomassa e Potencial de Reflorestamento

- Grande potencial de reflorestamento
- Capacidade de produção de carvão vegetal
- Desenvolvimento de bioeconomia circular na siderurgia
- Uso parcial de biochar em altos-fornos já implementado

Vantagens Competitivas (continuação)

3. Recursos Minerais

- Reservas de minério de ferro de alta qualidade
- Força de trabalho qualificada com expertise siderúrgica
- Infraestrutura industrial estabelecida
- Proximidade de recursos e mercados (América Latina)

Conclusão Estratégica

O Brasil está posicionado para se tornar um
líder global em aço verde de baixo custo

Cenários de Mitigação até 2050

Cenário	Redução CO ₂	Características
BAU	0%	Business as usual
NIS	0%	Sem aumento de emissões
SDS	42%	Desenvolvimento sustentável
SDS+	88%	Sustentabilidade profunda

Custos de Mitigação

- **Curto prazo:** Custos negativos (-\$35,3 a -\$1,5/tCO₂e)
 - Eficiência energética, BF-BOF com carvão vegetal, expansão EAF
- **Longo prazo:** Custos positivos (\$23,4 a \$43,4/tCO₂e até 2050)
 - Rotas inovadoras de redução e fusão

Rota 1: Redução com Carvão Vegetal

- Fusão-redução com carvão vegetal (24% no SDS+)
- Tecnologia **Tecnored** (Vale)
- Vantagem brasileira única
- Carbono neutro se sustentável

Rota 2: Redução Direta com Gás Natural

- DR com gás natural (21% no SDS)
- Transição para H₂ gradual
- Infraestrutura existente

Rota 3: Hidrogênio Verde

- H₂-DRI usando eletrólise
- Energia renovável brasileira
- Projeto Selene (CSN)
- Longo prazo, alto potencial

Rota 4: Eletrólise de Óxido Fundido

- Tecnologia Boston Metal (MOE)
- Planta no Brasil (operações 2026)
- Disruptiva, zero CO₂ direto
- Consórcio ArcelorMittal

Desenvolvimento do Hidrogênio Verde no Brasil

Projeto Selene (CSN)

Desenvolvimento em fases:

- **Fase 1:** Implementação inicial (conclusão dezembro 2025)
- **Fase 2:** Capacidade de 40 MW em Araucária, PR (2027-2028)
- **Fase 3:** Rio de Janeiro próximo à usina BF-BOF (2029-2030)
- **Localização:** Instalações de laminação e revestimento

Parceria CSN-Petrobras (Dezembro 2024)

- Protocolo de intenção para planta comercial de H₂ baixo carbono
- **Localização:** Paraná, sul do Brasil
- **Tecnologia:** Eletrólise da água com eletricidade renovável
- **Aplicação:** Combustível e matéria-prima para processos industriais

Características

- Processo proprietário da Vale
- Redução-fusão alternativa
- Uso de aglomerados carbonosos

Vantagens

- Ampla gama de combustíveis
 - Biomassa
 - Gás de síntese
 - Hidrogênio
- Minério de ferro de menor grau
- Flexibilidade operacional

Status

- Planta piloto operacional
- Pesquisa em escalonamento
- Integração com H₂ e biomassa

Potencial

Até 100% redução CO₂
com hidrogênio verde ou biochar

Boston Metal - Eletrólise de Óxido Fundido (MOE)

Tecnologia Revolucionária:

- Dissolve minério de ferro em eletrólito de óxido fundido
- Corrente elétrica separa ferro e oxigênio
- **Zero emissões diretas de CO₂**
- Subproduto: apenas oxigênio

Vantagens:

- Flexibilidade de minério
- Design modular
- Ferro de alta pureza
- Escalabilidade

Planta no Brasil:

- **Local:** Coronel Xavier Chaves, sudoeste
- **Construção:** iniciada 2023
- **Operações pequena escala:** 2024
- **Operações plenas:** 2026

Financiamento:

- Série C: \$122M (setembro 2023)
- Série C2: \$20M (janeiro 2024)
- Investidores: Aramco, Marunoichi, BEV
- Parceiros: ArcelorMittal

TRL: 5-6

Piloto para Demonstração

Iniciativa de Descarbonização Industrial Profunda

Participação do Brasil (anunciada julho 2023)

- Adesão na Reunião Ministerial de Energia Limpa na Índia
- Representa agora **19% da produção global de aço** na Iniciativa
- **Setores foco:** Aço, cimento, petroquímicos

Componentes da Iniciativa

- ① Inovação tecnológica e capacitação
- ② Desenvolvimento de políticas para transição justa
- ③ Redes de segurança social e requalificação da força de trabalho
- ④ Priorização do engajamento comunitário
- ⑤ Intercâmbio de conhecimento através de treinamento ISO 50001
- ⑥ Apoio a micro, pequenas e médias empresas
- ⑦ Projetos piloto de demonstração

Mecanismos de Financiamento

Financiamento Misto

- Esquemas co-financiados
- Financiamento seed para empreendedores
- Colaboração com 80+ parques tecnológicos
- 20 gerenciados pelo Estado

Parcerias

- Instituições de pesquisa brasileiras
- Universidades
- Setor privado
- Organizações internacionais

Desafios Identificados

- Interação universidade-indústria historicamente fraca
- Casos bem-sucedidos existem:
 - Aço
 - Petroquímicos
 - Aeronaves
 - Agroindústria
- Necessidade de mecanismos mais fortes
- EMBRAPAII como intermediário

Estratégia Nova Indústria Brasil (NIB)

Pontos Fortes

- Investimentos estruturais em educação e inovação
- Reconhecimento do potencial de superpotência verde
- Base de recursos naturais para transição energética

Fraquezas Identificadas

- Orientação de missão muito ampla para implementação focada
- Falta plano claro de criação de clusters baseados em conhecimento
- Mixes de políticas específicas do setor limitadas
- Estrutura de experimentação dinâmica insuficiente

Lacuna Crítica: NDC (outubro 2023)

- Falha em estabelecer medidas específicas de mitigação para siderurgia
- Sem metas de emissões líquidas zero para o setor de aço

Parcerias Recentes

UNIDO:

- Planos setoriais de mitigação
- Indústria, Cimento e Aço
- Desenvolvimento de políticas

UK-Brasil:

- Hub de Descarbonização Industrial
- Compartilhamento de tecnologia
- Melhores práticas

Oportunidade COP30

Brasil sediará COP30 **Novembro 2025**

Oportunidade única para:

- Definir estratégia de aço verde
- Demonstrar liderança
- Atrair investimento global
- Estabelecer padrões

Brasil vs. Outras Regiões - Rotas Tecnológicas

Região	Rota Primária	Rota Secundária/Alternativa
Brasil	Biomassa/carvão vegetal em BF	H ₂ -DRI verde, tecnologia MOE
China	Expansão EAF (meta 15%+)	BF-BOF ultra-baixa emissão, H ₂ longo prazo
Índia	Projetos piloto H ₂ -DRI	Maior utilização de sucata, CCUS
Japão	Injeção H ₂ em BF + CCUS	EAF híbrido grande escala, H ₂ -DRI no exterior
EUA	Gás natural DRI + EAF	BF-BOF CCUS, H ₂ verde futuro
Alemanha	H ₂ -DRI + EAF	CCUS em BF-BOF, eletrificação
Coreia do Sul	HyREX (redução H ₂)	Expansão EAF, CCUS

Diferencial Brasileiro

Única combinação de: energia renovável abundante + biomassa + minério de alta qualidade + tecnologias disruptivas em implementação

Mecanismos de Financiamento - Comparação

País/Região	Mecanismo Principal	Orçamento Anual
Brasil	Público-privado misto	Dedicado limitado
China	Política industrial estatal	Não divulgado
Índia	Steel Development Fund	\$150M+
Japão	Green Innovation Fund	¥45B/ano (média)
EUA	DOE + créditos IRA	\$136M+ DOE P&D
Alemanha	RFCS UE + fundos nacionais	€50M+ nacional
UE	Innovation Fund	€40B+ (2020-2030)

Lacuna de Financiamento

Brasil precisa estabelecer mecanismo de financiamento dedicado comparável para realizar plenamente seu potencial de aço verde

Cronogramas de Neutralidade de Carbono

País	Meta Intermediária	Net-Zero
Brasil	42% redução (SDS)	2050
China	Pico antes 2030	2060
Índia	—	2070
Japão	60% até 2035	2050
EUA	Variável	2050
Alemanha	55% até 2030	2050
Coreia Sul	Em desenvolvimento	2050

Posicionamento do Brasil

- Alinhado com economias avançadas (2050)
- Mais ambicioso que Índia (2070)
- Menos detalhado que Europa/Japão
- **Oportunidade:** Definir trajetória setorial clara

Recomendação

Brasil deve estabelecer **roteiro setorial específico** para siderurgia alinhado com NDC e vantagens competitivas

Principais Desafios

1. Lacunas de Política e Coordenação

- Falta de metas específicas do setor na NDC
- Coordenação limitada entre ministérios e agências
- Necessidade de roteiro integrado de descarbonização
- Clareza regulatória para investidores

2. Financiamento e Investimento

- Capital intensivo para transformação da infraestrutura existente
- Competição por capital global
- Necessidade de mecanismos de financiamento inovadores
- Risco de tecnologia e prazo de retorno

3. Desenvolvimento de Infraestrutura

- Rede de distribuição de hidrogênio

4. Desenvolvimento de Capacidades Técnicas

- Requalificação da força de trabalho para novas tecnologias
- Fortalecimento da colaboração universidade-indústria
- Transferência e adaptação de tecnologia
- Retenção de talentos e prevenção de fuga de cérebros

5. Competitividade de Mercado

- Prêmio de preço para aço verde não totalmente estabelecido
- Competição de produtores de baixo custo/alta emissão
- Mercados de exportação e padrões
- Possível necessidade de mecanismos de ajuste de carbono

Oportunidades Estratégicas

1. Liderança em Aço Verde de Baixo Custo

- Vantagem de energia renovável = custos mais baixos de H_2 verde
- Rota de biomassa única globalmente
- Potencial para tornar-se fornecedor preferencial para mercados sensíveis ao clima
- Marca "Made with Brazilian Green Steel"

2. Exportação de Tecnologia e Conhecimento

- Licenciamento de tecnologia Tecnored
- Consultoria em siderurgia baseada em biomassa
- Integração de energia renovável
- Liderança regional em descarbonização industrial

3. Desenvolvimento de Cadeia de Valor de Hidrogênio

- Produção de H_2 verde para exportação

Oportunidades (continuação)

4. Atração de Investimento Estrangeiro Direto

- Empresas globais buscando fornecimento de aço verde
- Parcerias tecnológicas e joint ventures
- Acesso a financiamento climático internacional
- Hub para pesquisa e desenvolvimento de aço verde

5. Desenvolvimento Regional e Empregos

- Novos empregos verdes em regiões siderúrgicas
- Diversificação da base industrial
- Desenvolvimento de clusters de inovação
- Fortalecimento da economia rural (biomassa sustentável)

Janela de Oportunidade

Próxima década crítica para estabelecer liderança

1 Estabelecer Roteiro Setorial de Descarbonização

- Metas específicas para siderurgia
- Marcos temporais claros
- Integração com NDC
- Consulta com stakeholders

2 Criar Mecanismo de Financiamento Dedicado

- Fundo de Descarbonização Industrial
- Co-financiamento público-privado
- Linhas de crédito preferenciais
- Incentivos fiscais para investimentos verdes

3 Aproveitar Momento da COP30

- Lançar estratégia nacional de aço verde
- Anunciar projetos-âncora
- Atrair compromissos de investimento internacional
- Posicionar Brasil como líder em industrialização sustentável

① Desenvolver Infraestrutura de Hidrogênio

- Rede de produção e distribuição
- Hubs industriais integrados
- Padronização e certificação
- Integração regional (América do Sul)

② Fortalecer Colaboração Universidade-Indústria

- Expandir modelo EMBRAPPI
- Centros de excelência em metalurgia verde
- Programas de doutorado industrial
- Intercâmbio internacional de pesquisadores

③ Estabelecer Sistema de Certificação de Aço Verde

- Metodologia de contabilidade de carbono
- Verificação por terceiros
- Rastreabilidade da cadeia de suprimentos
- Reconhecimento internacional

Prioridades de P&D

① Otimização da Rota de Biomassa

- Escalonamento da tecnologia Tecnored
- Desenvolvimento de carvão vegetal sustentável
- Integração com reflorestamento comercial

② Redução de Custo de H₂ Verde

- Eficiência de eletrolisadores
- Integração com energia renovável intermitente
- Armazenamento e transporte

③ Demonstração de Tecnologias Disruptivas

- Apoio ao projeto Boston Metal
- Exploração de outras rotas eletroquímicas
- Parcerias com desenvolvedores globais de tecnologia

Recomendações para Colaboração Internacional

Parcerias Estratégicas

- **Europa:** Acesso a tecnologias de H₂-DRI, colaboração em CCUS
- **Japão:** Transferência de tecnologia COURSE50, cooperação em eficiência
- **Austrália:** Desenvolvimento de H₂ verde, tecnologia Biolron
- **América Latina:** Integração regional, economias de escala

Fóruns Multilaterais

- Liderança ativa na Iniciativa de Descarbonização Industrial Profunda
- Participação em Mission Innovation
- Engajamento com IEA Steel Technology Roadmap
- Contribuição para padrões globais de aço verde

Síntese: Posicionamento Único do Brasil

Vantagens Competitivas:

- ✓ Energia renovável abundante
- ✓ Potencial de biomassa único
- ✓ Recursos minerais de qualidade
- ✓ Base industrial estabelecida
- ✓ Projetos pioneiros em andamento

Lacunas a Abordar:

- ✗ Política setorial específica
- ✗ Mecanismo de financiamento dedicado
- ✗ Coordenação institucional
- ✗ Metas quantitativas claras

Potencial

O Brasil pode se tornar o
**fornecedor de aço verde
de menor custo do mundo**

Combinando:

- H₂ verde barato
- Biomassa sustentável
- Tecnologias disruptivas
- Posição geográfica estratégica

Três Cenários para 2050

Cenário 1: Liderança Verde (Otimista)

- 2030: Roteiro claro, primeiros projetos comerciais H₂-DRI
- 2040: 50% da capacidade descarbonizada, exportador de tecnologia
- 2050: Neutralidade de carbono alcançada, líder global em aço verde

Cenário 2: Transformação Gradual (Realista)

- 2030: Progresso moderado, pilotos em escalonamento
- 2040: 30-40% descarbonização, competitivo em nichos verdes
- 2050: Neutralidade alcançada com apoio internacional

Cenário 3: Oportunidade Perdida (Pessimista)

- 2030: Falta de coordenação, progresso limitado
- 2040: Atraso tecnológico, perda de competitividade

① Vontade Política e Coordenação

- Comprometimento de longo prazo acima de ciclos eleitorais
- Coordenação entre múltiplos ministérios
- Alinhamento federal-estadual-municipal

② Mobilização de Capital

- Financiamento público catalisador
- Atração de investimento privado nacional e internacional
- Acesso a financiamento climático multilateral

③ Desenvolvimento e Implementação Tecnológica

- Escalonamento bem-sucedido de pilotos para comercial
- Adaptação de tecnologias às condições brasileiras
- Inovação contínua e melhoria

④ Desenvolvimento de Mercado e Aceitação

- Criação de demanda por aço verde
- Prêmio de preço e disposição a pagar
- Certificação e rastreabilidade credíveis

Próximos Passos: Agenda de Ação

Imediato (2025)

- Finalizar e publicar roteiro setorial de descarbonização
- Lançar estratégia nacional de aço verde na COP30
- Estabelecer grupo de trabalho interministerial
- Anunciar projetos-âncora e compromissos de financiamento

Curto Prazo (2026-2027)

- Operacionalizar mecanismos de financiamento
- Iniciar construção de projetos de demonstração em escala
- Estabelecer centros de P&D em metalurgia verde
- Negociar parcerias tecnológicas internacionais

Médio Prazo (2028-2030)

Oportunidades para Colaboração Udine-Brasil

- **Intercâmbio de Pesquisadores:** Doutorandos e pós-docs
- **Projetos Conjuntos:** Metalurgia de H_2 , caracterização de biomassa
- **Workshops e Conferências:** Plataforma para diálogo técnico
- **Publicações Conjuntas:** Difusão de conhecimento

Áreas de Pesquisa Prioritárias

- ① Cinética de redução com H_2 vs. biomassa
- ② Qualidade e controle de DRI para diferentes minérios
- ③ Modelagem e otimização de processos
- ④ Análise de ciclo de vida e contabilidade de carbono
- ⑤ Impactos socioeconômicos da transição
- ⑥ Desenvolvimento de materiais para equipamentos

O Brasil está em uma encruzilhada histórica

A combinação única de recursos naturais, capacidade industrial e momentum tecnológico cria uma **janela de oportunidade** para liderança global em aço verde.

Mas essa janela não permanecerá aberta indefinidamente.

Ação decisiva nos próximos 2-3 anos determinará
se o Brasil se tornará um líder ou um seguidor
na transição da siderurgia global.

O momento é agora.

Apêndice A: Glossário de Tecnologias

- BF-BOF** Blast Furnace - Basic Oxygen Furnace (Alto-forno - Conversor a oxigênio)
- EAF** Electric Arc Furnace (Forno elétrico a arco)
- DRI** Direct Reduced Iron (Ferro de redução direta)
- HBI** Hot Briquetted Iron (Ferro briquetado a quente)
- H₂-DRI** Hydrogen-based Direct Reduced Iron (DRI baseado em hidrogênio)
- CCUS** Carbon Capture, Utilization and Storage (Captura, utilização e armazenamento de carbono)
- MOE** Molten Oxide Electrolysis (Eletrólise de óxido fundido)
- Tecnored** Processo proprietário Vale de fusão-redução
- NDC** Nationally Determined Contributions (Contribuições nacionalmente determinadas)
- TRL** Technology Readiness Level (Nível de prontidão tecnológica)

Apêndice B: Dados Técnicos Comparativos

Tecnologia	CO ₂ (t/t aço)	CAPEX	OPEX	TRL
BF-BOF (convencional)	2,0	Referência	Referência	9
BF-BOF + CCUS	0,2-0,4	+50-70%	+30-40%	7-8
H ₂ -DRI + EAF	0,02-0,1	+30-50%	+20-60%	6-7
Biomassa DRI + EAF	0,0-0,2	+20-40%	+10-30%	6-7
MOE (Boston Metal)	0,0	?	?	5-6
EAF (100% sucata)	0,4-0,5	-40-50%	-20-30%	9

- CAPEX e OPEX relativos ao BF-BOF convencional
- Variação de OPEX do H₂-DRI depende criticamente do preço do H₂ verde
- TRL 9 = Totalmente comercial; TRL 5-6 = Demonstração; TRL 7-8 = Pré-comercial

Apêndice C: Principais Atores Brasileiros

Produtores de Aço

- **Gerdau:** Líder em EAF, produção distribuída
- **CSN (Companhia Siderúrgica Nacional):** Integrado, Projeto Selene
- **ArcelorMittal Brasil:** Integrado, parte do grupo global
- **Usiminas:** Integrado, Minas Gerais

Mineradoras

- **Vale:** Tecnologia TecnoRed, briquetes verdes
- Produtores regionais de minério de ferro

Desenvolvedores de Tecnologia

- **Boston Metal:** Planta MOE no Brasil
- **Petrobras:** Parceria H₂ com CSN
- Instituições de pesquisa e universidades

Apêndice D: Recursos e Contatos

Organizações Chave

- Instituto Aço Brasil: www.acobrasil.org.br
- EMBRAPII: www.embrapii.org.br
- Ministério de Minas e Energia
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Relatórios e Estudos Relevantes

- IEA Iron and Steel Technology Roadmap
- Industrial Deep Decarbonization Initiative Reports
- Material Economics: Industrial Transformation 2050
- Estudos específicos sobre Brasil em journals internacionais

Colaboração Internacional

- Clean Steel Partnership (Europa)

Muito Obrigado!

Perguntas e Discussão

Prof. Fabio Miani

DPIA - Universidade de Udine, Itália

`fabio.miani@uniud.it`

Preparado especialmente para

Prof. André Costa e Silva

Novembro 2025

Esta apresentação é baseada em análises dos documentos:

Global Steel Industry Analysis 2025 e materiais relacionados