

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**"AÇO VERDE": estado da arte, desafios e perspectivas
para a siderurgia sustentável no Brasil**

GRACE REGINA FERREIRA CIRINEU

SÃO CARLOS -SP
2023

"AÇO VERDE": estado da arte, desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no Brasil

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof.^a Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Grace Regina Ferreira Cirineu

RA: 363189

TÍTULO: "AÇO VERDE": estado da arte, desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no Brasil

ORIENTADOR(A): Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 18/08/2023, 10 h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Profa. Dra. Danielle C. C. Magalhães	10,0	10,0
Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

BANCA – ASSINATURAS:

Profa. Dra. Danielle C. C. Magalhães

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIELLE CRISTINA CAMILO MAGALHAES
Data: 25/08/2023 14:21:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa

Documento assinado digitalmente
gov.br TOMAZ TOSHIMI ISHIKAWA
Data: 27/08/2023 06:00:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

Ao Deus único e todo poderoso, Deus da aliança de Abraão, Isaac e Jacó Israel, *YHWH TZEVAOT*, Deus dos Exércitos de Israel, pois Ele criou todas as coisas. Ao filho unigênito do Pai, *YAHUSHA HA' MASHIACH*, nosso Senhor Jesus Cristo, o Messias, pois por Ele e para Ele todas as coisas foram criadas. O castigo que nos dá a paz caiu sobre Ele e pelo Seu sacrifício na cruz, minha vida foi comprada por alto preço. A Eles toda a honra.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu Pai, YHWH, e ao meu salvador, Jesus Cristo: não há nada que eu seja ou possua que não tenha sido recebido de vós. Deus trabalha pela instrumentalização de pessoas e quero agradecer a algumas em especial: a meu pai, Orlando, e a minha mãe, Tânia, por terem me gerado, permitido que eu me desenvolvesse, me ensinado valores que só são aprendidos no âmbito familiar cristão e me possibilitado estudar. Agradeço ao meu esposo amado, Jânio, por ser essa pessoa crucial em minha vida, meu maior apoiador e incentivador em tudo que faço: não teria chegado até aqui se não fosse você, obrigada pelo seu amor sacrificial, o único possível e verdadeiro, pela paciência em todos os momentos, por me deixar desfrutar de uma vida feliz e pelo auxílio na revisão deste trabalho. Ao Victor E. Venerando Silva, que foi meu grande amigo durante a graduação e se dedicou com toda a generosidade e carinho à nossa amizade. Victor que, infelizmente, veio a falecer em 2020, mas que vive em espírito e muito embora não tenha tido tempo de concluir sua graduação, desejo que tome parte na minha conquista também. Agradeço à professora Danielle por ter aceitado gentilmente e prontamente ser minha orientadora e ter me auxiliado muito neste trabalho. Por fim, agradeço a todos que em algum momento se prestaram a me ajudar durante a graduação, alguns ainda que colegas mais distantes me surpreenderam e vieram em meu auxílio em momentos de necessidade: tenho em minha memória as lembranças e em meu coração, a gratidão a vocês.

"Olha, fui Eu quem criou o ferreiro que sopra as brasas no fogo e produz ferramentas para o seu trabalho". Isaiás 54,16. [1]

RESUMO

No contexto de descarbonização da indústria de aço mundial, este trabalho investiga o conceito de "aço verde" e seu estado da arte, bem como busca responder quais são as tecnologias inovadoras para a siderurgia que possibilitam o alcance efetivo das metas dos acordos climáticos globais. Dentre as tecnologias disponíveis, a redução direta do minério de ferro por hidrogênio verde juntamente com uso do forno a arco elétrico para produção de aço se mostra bastante eficaz em reduzir as emissões de gases do efeito estufa, tendo por isso merecido atenção especial. Verifica-se que as emissões oriundas da produção de aço por esta tecnologia poderiam ser menores que aquelas produzidas via rota convencional para a maioria dos países da União Europeia. Analisa-se também a produção de "aço verde" por meio desta tecnologia em países que possuem reservas de minério de ferro de qualidade bem como energias renováveis abundantes, em especial energia solar e eólica. Conclui-se que as localidades ideais e favoráveis a uma produção mais barata são aquelas localizadas próximas ao Trópico de Câncer e de Capricórnio, onde a radiação solar é prontamente acessível. Por fim, discute-se o cenário nacional de produção de aço, destacando suas particularidades, desafios e vantagens frente ao processo de descarbonização mundial. Um caminho para descarbonização nacional é sugerido: num curto prazo deve-se investir em medidas de eficiência energética, aumento do uso do forno a arco elétrico com sucata e uso do carvão vegetal no alto-forno; no médio prazo faz-se a redução direta do minério com gás natural e, no longo prazo, redução direta do minério via hidrogênio.

Palavras-chave: Descarbonização da indústria de aço. "Aço verde". "Hidrogênio verde".

ABSTRACT

In the context of the decarbonization of the world steel industry, this work investigates the concept of "green steel" and its state of the art, as well as seeks to answer what are the innovative technologies for the steel industry that enable the effective achievement of the goals of the global climate agreements. Among the available technologies, the direct reduction of iron ore by green hydrogen together with the use of electric arc furnaces for steel production proves to be quite effective in reducing greenhouse gas emissions, and therefore deserves special attention. It appears that the emissions from steel production using this technology could be lower than those produced by the conventional route for most European Union countries. The production of "green steel" using this technology is also analyzed in countries that have quality iron ore reserves as well as abundant renewable energies, especially solar and wind energy. It is concluded that the ideal and favorable locations for cheaper production are those located close to the Tropic of Cancer and Capricorn, where solar radiation is readily accessible. Finally, the national scenario of steel production is discussed, highlighting its particularities, challenges and advantages in the face of the global decarbonization process. A path for national decarbonization is suggested: in the short term, investments should be made in energy efficiency measures, increasing the use of electric arc furnaces with scrap and the use of charcoal in the blast furnace; in the medium term, the ore is reduced directly with natural gas, and in the long term, the ore is reduced directly with hydrogen.

Keyword: Decarbonization of the steel industry. "Green Steel". "Green Hydrogen".

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxo gasoso durante operação de alto-forno.....	17
Figura 2 - Produção de aço por países em 2020.	19
Figura 3 - Os 20 maiores países produtores de aço em 2022 (106 tons.).	19
Figura 4 - Sequência de operação do conversor LD para produção de aço.	22
Figura 5 - Fluxograma de produção de aço.	23
Figura 6 - Propagação da reação e processos envolvidos na redução direta do minério de ferro por hidrogênio	29
Figura 7 - Esquema do forno cuba de redução direta do minério de ferro por hidrogênio acoplado ao forno de arco elétrico. Um eletrolisador foi considerado para a produção de hidrogênio.....	34
Figura 8 - Variação na demanda de eletricidade (KWh) no sistema HDRI-EAF conforme se varia a taxa do fluxo de massa de hidrogênio (λ) no forno cuba de redução direta de minério.....	36
Figura 9 - Variação na emissão de CO ₂ conforme os países em KgCO ₂ por tonelada de aço líquido produzido.	38
Figura 10 - Comparação de consumo energético e emissões nos países da EU entre produção atual e (HDRI)-EAF	39
Figura 11 -Análise de sensibilidade do sistema	40
Figura 12 - Resultados da otimização da siderurgia via H ₂ -DRI-EAF com oferta isolada de energias renováveis (0% sucata). Ranking de custos de 17 países ao longo de 3 anos projetados – 2030, 2030 e 2050.	42
Figura 13 - Custos de produção do aço verde em três décadas comparados aos custos referentes aos anos de 2020 e 2021 da rota alto-forno e aciaria. Caso S1= 0% de sucata; caso S2= 25% de sucata e caso S3= 50% de sucata.	44
Figura 14 - Competitividade de custo relativa entre AF+AC (2021) e produção verde H ₂ -DRI-EAF (2050) para 16 dos 17 países otimizados, exceto a Guiné, onde atualmente não existe indústria siderúrgica. Quanto mais próximo um país estiver da parte de baixo do canto.....	45
Figura 15 - Comparação entre os custos de produção do aço baseado na rota fóssil convencional e na nova rota com H ₂ verde (projetos instalados em 2050, sem	

carregamento de sucata). Os custos nivelados do aço estão projetados com e sem taxaço de carbono para os 17 países analisados.	46
Figura 16 - Comparação entre as emissões de produção do aço baseado na rota fóssil convencional e na nova rota com H2 verde (projetos instalados em 2050, sem carregamento de sucata).	47
Figura 17 - Custos globais da siderurgia H2-DRI-EAF projetados por machine learning usando sistemas isolados de energia solar e/ou eólica (projetos instalados em 2050, sem carregamento de sucata). São apresentados os custos nivelados de aço, incluindo o minério.....	49
Figura 18 - Principais agentes e interessados do setor siderúrgico brasileiro.....	50
Figura 19 - Produção total de ferro gusa no Brasil.	54
Figura 20 - Custo nivelado médio global da produção de hidrogênio por fontes renováveis em 2050.	62
Figura 21 - Projeções de emissões e de produção no Brasil entre 2020 e 2050.	66
Figura 22 - Possível rota de descarbonização para a indústria de aço brasileira.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das emissões de CO2 em diferentes processos metalúrgicos....	17
Tabela 2 - Fatores médios mensais e anual de emissões de CO2 ao longo de 2022 no Brasil	18
Tabela 3 - Produção de aço por companhias em 2020.....	20
Tabela 4 - Iniciativas recentes na "siderurgia verde".....	26
Tabela 5 - Maiores produtores nacionais de aço.....	51
Tabela 6 - Maiores produtoras de minério de ferro no Brasil	52
Tabela 7 - Perspectivas quanto à adoção de tecnologias para a produção ferro e aço no Brasil	67

LISTA DE SIGLAS

AC – Aciaria
AF – Alto-forno
BOF- *Basic Oxygen Furnace*
CAC- Captura e armazenamento de carbono
CEE – Consumo específico de energia
CUAC – Captura, utilização e armazenamento de carbono
CV– Carvão vegetal
DRI- *Direct reduced iron*
ER – Energia renovável
FAE – Forno a arco elétrico
GEE – Gases do efeito estufa
GN - Gás natural
LD – Linz-Donawitz
ONU - Organização das Nações Unidas
RD-GN - Redução direta por gás natural
RD-H - Redução direta por hidrogênio
UE - União Europeia
RU – Reino Unido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	EMISSÕES DE GEE E CONSUMO DE ENERGIA NO SETOR DE AÇO	16
2.1.1	Fator de Emissão de Rede	18
2.2	AÇO E SUA IMPORTÂNCIA MUNDIAL	18
2.3	ROTAS TRADICIONAIS PARA PRODUÇÃO DE AÇO.....	20
2.3.1	Alto-Forno e Aciaria a Oxigênio	20
2.3.2	Forno a Arco Elétrico para Obtenção de Aço	22
2.4	O CONCEITO DE "AÇO VERDE"	23
2.5	ROTAS PARA PRODUÇÃO DE AÇO COM BAIXAS EMISSÕES DE CARBONO	24
2.6	REDUÇÃO DIRETA DO MINÉRIO DE FERRO POR HIDROGÊNIO VERDE E USO DO FORNO A ARCO ELÉTRICO (H ₂ -DRI-EAF).....	27
2.6.1	Redução Direta do Minério de Ferro	27
2.6.2	Redução Direta do Minério de Ferro por Hidrogênio	28
2.6.3	Tecnologia HDRI-EAF na Produção de Aço	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	VIABILIDADE DO USO DE HDRI-EAF NA PRODUÇÃO DE AÇO	33
4.1.1	Resultados da Modelagem	36
4.1.1.1	Consumo de Energia Elétrica no Sistema HDRI-EAF	36
4.1.1.2	Emissões do Sistema HDRI-EAF	37
4.1.1.3	Consumo Energético e Emissões nos Países da União Europeia	39
4.1.1.4	Análise de Sensibilidade	39
4.2	PRODUÇÃO DE AÇO VERDE VIA ROTA H ₂ -DRI-EAF BASEADA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS E DEPÓSITOS DE MINÉRIO DE FERRO....	40

4.2.1	Minérios e Energias Renováveis de Alta Qualidade para um Aço Verde de Baixo Custo	43
4.2.2	Competitividade de Mercado nas Próximas Décadas para Localidades Ideais.....	44
4.2.3	Produção Localizada com Uso da Energia de Rede Barata, Confiável e Renovável	46
4.2.4	Potencial Global da Siderurgia Baseada em H₂ Verde.....	48
4.3	CAMINHOS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA.....	49
4.3.1	O Cenário Nacional de Produção de Aço	50
4.3.1.1	Principais Produtores de Aço e Minério de Ferro	51
4.3.1.2	Setor Público: Níveis Governamental e Regulatório.....	52
4.3.1.3	Organizações da Sociedade Civil.....	53
4.3.1.4	Carvão Vegetal na Siderurgia Brasileira.....	53
4.3.1.5	Principais Barreiras ao Aumento do Uso de Carvão Vegetal	55
4.3.1.6	O Potencial de Mitigação.....	56
4.3.2	Políticas de Descarbonização do Setor Siderúrgico Brasileiro	56
4.3.2.1	Nível Nacional	56
4.3.2.2	Nível Estadual	57
4.3.2.3	Nível Empresarial	57
4.3.3	Principais Tecnologias Sustentáveis e Vantagens Competitivas do Brasil na Siderurgia.....	59
4.3.3.1	Eficiência Energética	59
4.3.3.2	Forno a Arco Elétrico.....	60
4.3.3.3	Gás Natural e Tecnologias de Redução Direta	60
4.3.3.4	Hidrogênio e Tecnologia de Redução Direta (HDRI).....	61
4.3.3.4.1	<i>Vantagens Competitivas.....</i>	<i>62</i>
4.3.3.4.2	<i>Desafios e Riscos.....</i>	<i>63</i>

4.3.3.5	Captura e Armazenamento de Carbono.....	63
4.3.3.6	Compensação das Emissões de GEE.....	64
4.3.3.7	Produção de Aço por Eletrólise	64
4.3.4	Desafios Econômicos e de Mercado	65
4.3.5	Perspectivas para a Produção de "Aço Verde" e Outros Produtos Siderúrgicos Sustentáveis pelo Brasil	65
4.3.5.1	Projeções de Emissões e de Produção de Aço no Brasil.....	65
4.3.5.2	Perspectivas Quanto à Adoção de Tecnologias.....	66
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

O aço é um material de suma importância para a civilização humana e isto é fato já consolidado, conhecido de todos. No entanto, mais recente é a preocupação e necessidade de descarbonização da indústria siderúrgica em alinhamento às metas globais de redução de gases do efeito estufa. Neste contexto, uma novidade ainda maior é o chamado "aço verde", termo que ainda vem despontando na literatura e promete aparecer muito nas próximas décadas. Pode-se dizer que a investigação sobre o conceito atual de "aço verde" e seu estado da arte constituem o primeiro passo deste trabalho. Neste caminho, surgem as tecnologias necessárias para se alcançar uma produção de aço mais limpa, algumas mais tradicionais e outras totalmente disruptivas e promissoras, como a redução direta do minério de ferro realizada por gás hidrogênio seguida pelo uso do forno a arco elétrico para produção de "aço verde". Esta tecnologia recebe atenção especial neste trabalho por ter sido destacada por vários autores como sendo a alternativa mais benéfica e viável do momento. Sua viabilidade em termos de consumo de energia elétrica e de emissões é amplamente abordada para países europeus inicialmente e, em seguida, para países que normalmente aparecem menos nos estudos, mas que são de fundamental importância por possuírem reservas de minério de ferro de qualidade bem como dispor de energia renovável abundante, sendo o Brasil um desses países de destaque. Como últimos passos, o trabalho segue com a atenção voltada para o Brasil e o cenário nacional atual de produção de aço com suas particularidades, confrontando as práticas comuns com as novas medidas que precisam ser adotadas para descarbonizar a siderurgia nacional. É feito também um vislumbre quanto ao futuro da siderurgia sustentável no Brasil. Com isso, espera-se que o leitor adquira uma noção mais ampla acerca do tema proposto e com um afunilamento cada vez maior do assunto, chegue a compreender os pormenores da indústria siderúrgica brasileira, seus desafios e vantagens frente ao processo crescente de descarbonização mundial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EMISSÕES DE GEE E CONSUMO DE ENERGIA NO SETOR DE AÇO

Gases do efeito estufa (GEE) são assim chamados por fazerem uma alusão ao aquecimento que ocorre dentro uma estufa de plantas quando a radiação solar (mais alta energia) penetra a superfície de vidro e fica retida na forma de radiação infravermelha ou calor (energia mais baixa). Aquecimento semelhante ocorre com o planeta Terra quando os gases da atmosfera deixam passar energia solar e após parte ser absorvida pela superfície terrestre e parte ser emitida de volta ao espaço, outra fração fica aprisionada por esses gases, aquecendo o planeta. Trata-se de um fenômeno natural e fundamental à vida, porém devido ao aumento das emissões de GEE, tais como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozônio (O_3), clorofluorcarbonos (CFCs), e vapor d'água, o aquecimento vem se tornando maior, segundo alguns estudos.

A metalurgia de ferro produz grandes quantias desses gases, como o dióxido de carbono, CO_2 . O metano, CH_4 , outro tipo de GEE, é parte dos recursos energéticos secundários e é queimado a CO_2 nas unidades metalúrgicas. Pode-se reduzir o conceito mais amplo de pegada de carbono na indústria de ferro a uma emissão integrada de CO_2 , que é a soma das emissões de CO_2 , aparecendo conseqüentemente em todos os processos da cadeia tecnológica, começando com a extração de matéria prima e terminando com o produto final. [2]

O gás no alto-forno consiste em CO a 25-27% vol. e em CO_2 a 16-23% vol., a depender do conteúdo de oxigênio na queima. Este CO_2 é chamado de gás direto ou emissão direta. Parte do CO é usado diretamente nos processos do alto-forno, sendo oxidado a CO_2 nos aquecedores à combustão, mas em sua maioria ele é queimado em caldeiras de usinas locais e o CO_2 resultante neste caso é chamado de gás indireto ou emissão indireta. A Figura 1 mostra o fluxo de CO e CO_2 no alto-forno operando com minério de ferro. [2]

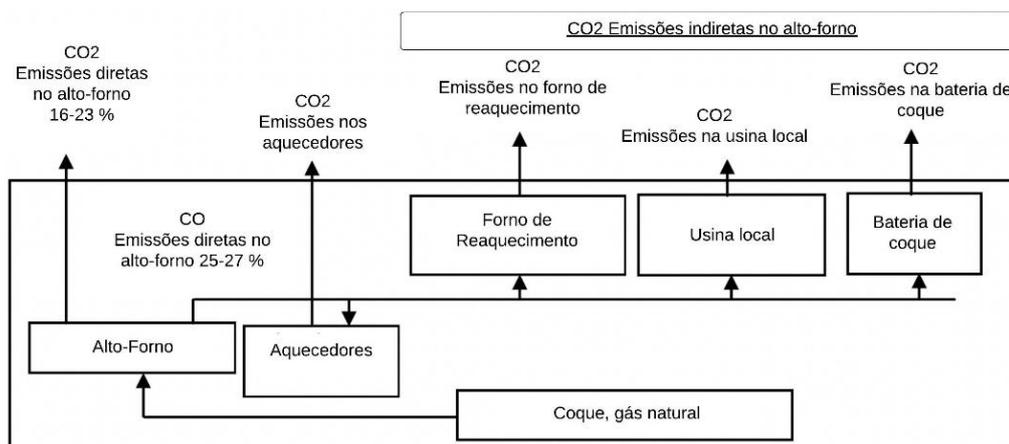


Figura 1 - Fluxo gasoso durante operação de alto-forno

Fonte: Adaptada de [2].

Na Tabela 1, é possível comparar as emissões de dióxido de carbono para alguns processos tradicionais da siderurgia.

Tabela 1 - Valores das emissões de CO₂ em diferentes processos metalúrgicos

Estágio do Processo	Emissão Correspondente Kg por 1t de produto
Forno a arco elétrico + sucata	1021
Forno a arco elétrico + ferro	1434
Aciaria (BOF)	2147
Alto-forno	2148

Fonte: Adaptada de [2].

Nota-se que o processo que utiliza forno a arco elétrico com sucata apresenta os valores de emissões mais baixos (menor pegada de carbono). [2]

Quanto ao consumo de energia, o setor de aço é o segundo maior consumidor industrial de energia. O combustível mais usado no setor siderúrgico no mundo é o carvão, representando 74% do uso de energia do setor. Além do carvão, eletricidade e gás natural respondem por quase toda a demanda energética restante do setor. Notavelmente, 16% da demanda global por carvão é representada pelo carvão coque, um insumo na produção de aço [3].

Ainda de acordo com [3], a indústria do aço precisa reduzir suas emissões em 50% até 2050 para atingir as ambições do Acordo de Paris e estar alinhada com as metas de emissões zero para 2070. Este desafio ainda é agravado pelo aumento da demanda de aço vinculado ao crescimento populacional e da economia. Com

respeito às emissões futuras do setor global de aço, é esperado que elas aumentem, atingindo 2,7Gt CO₂ por ano em 2050 (7% mais emissões que em 2019) se nenhuma medida for tomada a fim de melhorar o processo produtivo. [3]

2.1.1 Fator de Emissão de Rede

Os fatores médios de emissão de CO₂ para energia elétrica da rede têm como objetivo estimar a quantidade de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica determinada. Ele calcula a média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia. Se todos os consumidores de energia elétrica do SIN (Sistema Interligado Nacional) calculassem suas emissões multiplicando a energia consumida por esse fator de emissão, o somatório corresponderia às emissões do SIN. Para se ter uma ideia a respeito do fator médio de emissão nacional, na Tabela 2 constam os dados referentes ao ano de 2022. [4]

Tabela 2 - Fatores médios mensais e anual de emissões de CO₂ ao longo de 2022 no Brasil

Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)											Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)	
MÊS - 2022											ANO - 2022	
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
0,0732	0,0503	0,0406	0,0216	0,0280	0,0441	0,0419	0,0457	0,0491	0,0471	0,0402	0,0294	0,0426

Fonte: Adaptada de [4].

2.2 AÇO E SUA IMPORTÂNCIA MUNDIAL

Aço é a coluna vertebral da civilização moderna. É usado em edifícios, transporte, infraestrutura, etc. [5]. Aproximadamente 1,95 bilhão de toneladas de aço foi produzido em 2021. [6]

A China é quem concentra a maior produção do setor: com 56,7% de toda a produção mundial em 2020, sendo seguida por Índia, Japão, EUA e Rússia conforme se vê na Figura 2. [7]

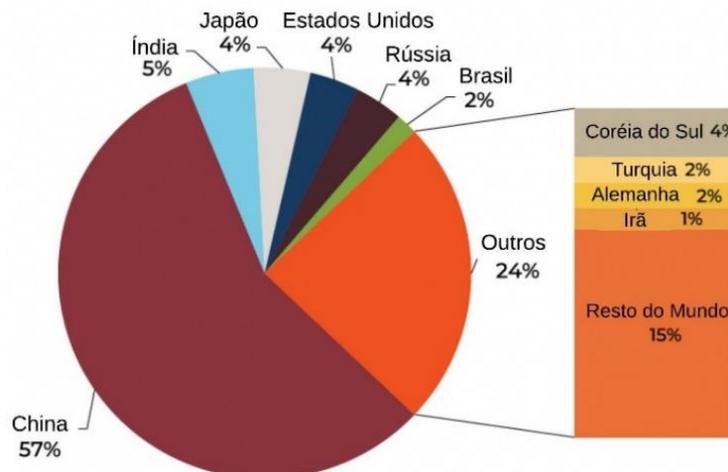


Figura 2 - Produção de aço por países em 2020.

Fonte: Adaptada de [7, 8].

A quantidade total de aço produzida pelos dez maiores produtores corresponde a 84,8% da produção mundial. Com respeito ao mercado global, a China é também o maior país exportador e importador de aço [7]. Os 20 maiores produtores de 2022 são mostrados na Figura 3. Nota-se que o Brasil ocupa o nono lugar na classificação. [9]



Figura 3 - Os 20 maiores países produtores de aço em 2022 (106 tons.).

Fonte: Adaptada de [9].

Quando se olha para os 10 maiores produtores individualmente, nota-se que 7 deles são chineses (Tabela 3). Em 2020, China Baowu Group tornou-se o maior

produtor em todo o mundo, ultrapassando a ArcelorMittal de Luxemburgo. Os 10 maiores produtores respondem por, aproximadamente, um quarto do total global. [7]

Tabela 3 - Produção de aço por companhias em 2020

Classificação	Companhia	Produção (Mt)	Proporção
1	China Baowu	115.3	6.1%
2	ArcelorMittal	78.5	4.2%
3	HBIS Group	43.8	2.3%
4	Shagang Group	41.6	2.2%
5	Nippon Steel	41.6	2.2%
6	POSCO	40.6	2.2%
7	Ansteel	38.2	2.0%
8	Jianlong	36.5	1.9%
9	Shougang	34.0	1.8%
10	Shandong	31.1	1.7%
Outros	-	1,376.5	73.3%
Total	-	1,877.5	100%

Fonte: Adaptada de [7,8].

O consumo aparente de aço *per capita* (produtos de aço acabados) foi de 216,3 Kg em 2017. Países industrializados, como a Alemanha, possuem um alto consumo aparente de aço *per capita* de aproximadamente 500 Kg. Em contrapartida a Índia, um país em desenvolvimento, tem um consumo *per capita* de 66,3 Kg de aço. Como o padrão de vida em países em desenvolvimento vem melhorando, a demanda por aço irá crescer ainda mais. Estima-se que esta demanda crescerá até 2050, pelo menos [5]. A projeção é de um aumento até 2,19 bilhão de toneladas em 2050 devido à convergência da demanda global a 250 Kg *per capita* em 2080. [6]

2.3 ROTAS TRADICIONAIS PARA PRODUÇÃO DE AÇO

2.3.1 Alto-Forno e Aciaria a Oxigênio

O alto-forno é um aparelho metalúrgico destinado à fusão redutora do minério de ferro e que tem como produto final e principal o ferro-gusa. Este contém elevado teor de carbono devido ao seu contato próximo com o coque ou com carvão vegetal, os quais atuam no processo como combustível e redutor simultaneamente. Geralmente o ferro-gusa tem de 3,0 a 4,5% de carbono e uma grande quantidade de impurezas, sendo as principais: carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre e por isso não é utilizado industrialmente, devendo antes ser purificado. [10]

O alto-forno é constituído de um recinto único e possui funcionamento contínuo, nele a carga fica em contato com gases produzindo grandes reações entre eles, funcionando como um trocador de calor à contracorrente. Algumas características importantes do alto-forno são: (a) só recebe carga sólida; (b) só serve para fusão, não efetuando refino; (c) só recebe carga porosa, de modo a se deixar atravessar pelos gases; (d) trabalha com gases em contracorrente com a carga; (e) permite grandes reações entre carga e gases; (e) utiliza como combustível coque ou carvão de madeira. [10]

Materiais como minério de ferro, pelotas, sinter, coque ou carvão vegetal, e fundente (calcário) são carregados alternadamente pelo topo do forno e através de correia transportadora aquecem-se e se reduzem ao contato de uma corrente ascendente de gás redutor quente, ou seja, à medida que a carga vai descendo, os gases resultantes da combustão do coque ou carvão vegetal ascendem através da coluna de carga reduzindo o minério e pré-aquecendo os materiais. [10]

Os produtos obtidos no alto-forno são: ferro-gusa, escória, gás de alto-forno (contém alto teor de CO_2) e poeiras. [10]

Uma boa marcha do forno, ou seja, alta produção com baixo consumo de combustível só é possível quando os gases ascendentes são aproveitados ao máximo, isto é, quando deixam o alto forno com o teor de CO_2 o mais alto e a temperatura a mais baixa possível. O metal líquido obtido é então vazado em carro torpedo (onde ocorre a dessulfuração) que o transporta para a aciaria ou derramado em lingoteiras para solidificar. [10]

O próximo passo é a produção do aço a partir do ferro-gusa e esta etapa é realizada na aciaria, a unidade de uma usina siderúrgica com a finalidade de produzir aço em forma de produtos semiacabados (tarugos, lingotes, placas, etc.). Na aciaria, o principal processo para fabricação de aço é aquele feito pelo conversor LD (Linz-Donawitz), que se utiliza de oxigênio puro (valores ideais: 99,7 a 99,8%) para tal, a fim de manter os teores de N_2 do aço dentro dos limites exigidos para boa qualidade do produto. [10]

O conversor LD é carregado inicialmente com sucata e ferro-gusa sólido, seguindo-se o gusa líquido. Normalmente, a única fonte de calor do processo é a fornecida pela oxidação do gusa líquido, o que limita o teor de sucata. A carga

metálica varia, geralmente, de 70 a 75% de gusa líquido, sendo o restante constituído de vários tipos de sucata. As etapas de operação do conversor LD são as seguintes: (a) carregamento de sucata; (b) carregamento de gusa líquido; (c) início do sopro de oxigênio; (d) vazamento do aço; (e) vazamento da escória. [10]

As matérias-primas utilizadas na fabricação de aço pelo processo LD são: gusa líquido; gusa sólido; sucatas de aço e ferro fundido; cal; fluorita; oxigênio. [10]

O processo LD consiste em um refino oxidante, onde oxigênio puro é soprado no banho por 17 a 18 min, promovendo assim a oxidação parcial do carbono, manganês, silício, fósforo, enxofre e outros elementos residuais de carga metálica, permitindo que sejam retirados. Além disso, realiza-se a adição de ferros-ligas e desoxidantes para acerto de composição química do aço e retirada do O₂ contido no metal. A Figura 4 ilustra a sequência de operação do conversor LD. [10]

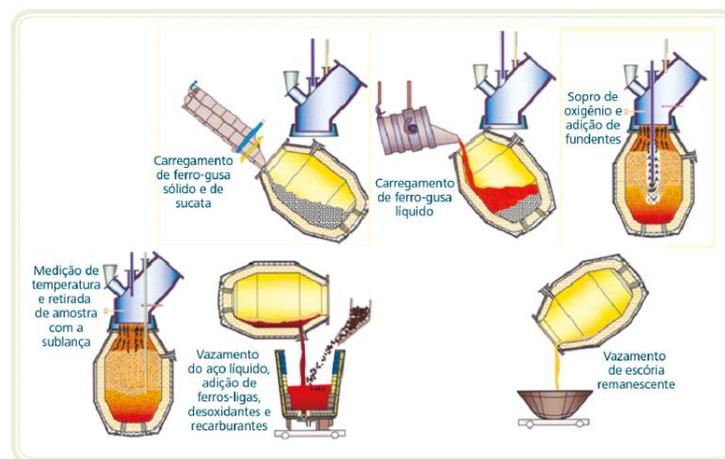


Figura 4 - Sequência de operação do conversor LD para produção de aço.

Fonte: Adaptada de [11]

2.3.2 Forno a Arco Elétrico para Obtenção de Aço

O forno elétrico a arco permite a produção de aço (refino primário) com as vantagens de se controlar a temperatura do banho e as condições de oxidação e redução da escória. A operação do FAE compreende as seguintes fases: (a) preparação da carga e carregamento; (b) fusão da carga; (c) refino oxidante; (d) refino redutor; (e) vazamento. O carregamento consiste basicamente em sucata, que é distribuída no cesto de carga fria. No refino oxidante são eliminados alguns elementos químicos de interesse, como: manganês, silício e fósforo. Terminada esta fase, é feita a remoção da escória formada, pois a próxima fase será o refino redutor

e, para tal, é necessária a elaboração de nova escória. No refino redutor são feitos: a desoxidação do metal, eliminação de enxofre, acerto de temperatura e de composição química final. Após isso, é feito o vazamento do aço. Cabe observar que o carregamento também pode consistir em ferro esponja, aquele reduzido de modo direto. A Figura 5 resume os procedimentos citados para produção de ferro-gusa e de aço. [10]

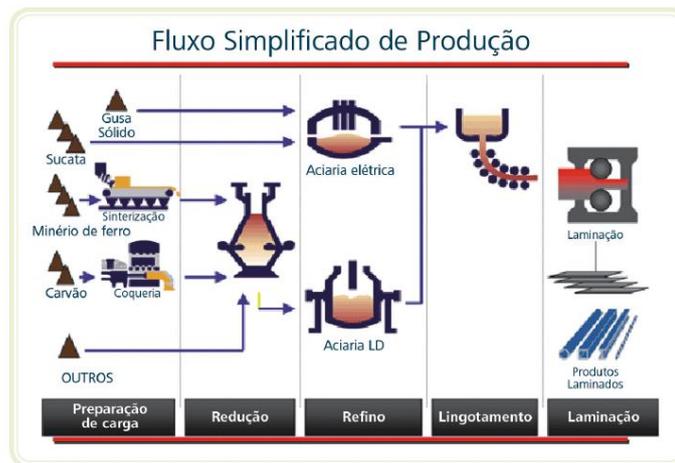


Figura 5 - Fluxograma de produção de aço.

Fonte: Adaptada de [10]

2.4 O CONCEITO DE "AÇO VERDE"

O aço é um material estrutural que alimenta grandes indústrias, como a de construção e a de manufatura automotiva. Como parte da cadeia de suprimentos que abastece a produção de produtos finais ao consumidor o aço é análogo em seu papel a outros produtos intermediários tais como recursos energéticos e outros materiais de construção. Desta forma, a fabricação de aço verde é comparável à produção de energia limpa ou de madeira com certificação ambiental, onde a funcionalidade ou utilidade do produto e a experiência do consumidor final não são necessariamente afetadas, já que não há benefícios diretos adicionais ao usuário a despeito da boa reputação de produtos manufaturados via rotas de produção mais limpas. Esta distinção fica clara mediante outros tipos de "produtos verdes" que são funcionalmente diferentes dos seus similares "marrons" e que entregam benefícios diretos aos usuários finais, como por ex., a economia de energia advinda do uso dos veículos de maior eficiência energética. [12]

Há uma falta de consenso quanto ao conceito de "aço verde". O termo tem sido raramente utilizado na literatura acadêmica e quando adotado, sua definição é

muita ampla. Esta dificuldade de consenso sobre o que define um "aço verde" se complica ainda mais pelo fato de o aço ser produzido através de duas rotas possíveis: a primária (integrada) que possui emissões mais intensas e a secundária que utiliza aço reciclado e é muito menos intensiva quanto às emissões (médias globais: 1,85 ton. CO₂/ton. aço *versus* 0,4 ton. CO₂/ton. aço). [12]

Neste trabalho, o termo "aço verde" será usado para fazer referência aos produtos siderúrgicos manufaturados por meio de processos com emissões menores de GEE e não para referir-se a produtos com quantidades menores de conteúdo físico de carbono. Aqui, portanto, há uma diferenciação entre produtos que possuem pegadas de carbono ou de GEE menores, devido a diferentes processos de produção, em contraposição aos produtos feitos de "aço baixo carbono", que possuem um conteúdo mínimo de carbono (0,04-0,30%) nos produtos finais. [12]

"Aço verde" também deve ser diferenciado do "aço sustentável", pois o escopo do primeiro é limitado a emissões menores de GEE, enquanto que "aço sustentável" e materiais sustentáveis de modo geral, também englobam outras questões como eficiência energética, eficiência de recursos, circularidade e redução de outros poluentes [12]. Focar nas emissões de GEE faz sentido por duas razões principais: 1- a relativa facilidade de medição e a existência de metodologias de contagem de carbono aplicáveis à siderurgia; 2- a importância da diminuição das emissões dos GEE como foco primário das políticas no setor global., por ex.: a política de desenvolvimento sustentável da *Worldsteel* classifica as emissões de GEE como o primeiro de oito indicadores do "aço sustentável". Portanto, não obstante a importância dos outros fatores mencionados, este trabalho foca as emissões de GEE como o fator primário determinante para quantificar o quão "verde" é o aço. [12]

2.5 ROTAS PARA PRODUÇÃO DE AÇO COM BAIXAS EMISSÕES DE CARBONO

Para reduzir as emissões na siderurgia, três tipos de abordagens podem ser consideradas: eficiência energética, substituição do agente redutor ou do combustível e captura e armazenamento de carbono. A eficiência energética engloba todas as medidas de mitigação que podem ser implementadas na produção atual para reduzir o consumo de energia. Já a segunda alternativa considera mudar o modo como o aço é feito, adotando para isso rotas tecnológicas que fazem uso de

combustíveis e de agentes redutores de menor emissão. Por fim, as tecnologias de CAC ajudam no alcance das metas em processos de manufatura de aço altamente emissivos. [8]

Estudos realizados a fim de investigar o potencial de redução das emissões no setor siderúrgico, mostram que a capacidade de redução quando se empregam medidas tradicionais de eficiência energética é limitada a reduzir cerca de 25 a 40% das emissões médias de CO₂ por tonelada de aço bruto produzido. Para que reduções maiores sejam alcançadas faz-se necessária a adoção de tecnologias avançadas e inovadoras, tais como a CAC, o uso de hidrogênio ou biomassa como agentes redutores ou ainda usar eletricidade para reduzir o minério de ferro. No entanto, estas tecnologias não estão completamente disponíveis, com algumas ainda em estágios iniciais de pesquisa e outras apenas em fase piloto ou demonstrativa. Assim, muito embora o emprego destas tecnologias tenha capacidade de remodelar o cenário tecnológico do setor siderúrgico e impactar significativamente na redução das emissões, a experiência prática é limitada e há uma falta de modelos de negócios já estabelecidos que possam suportar o emprego das mesmas, dificultando ainda mais sua viabilidade comercial. [12]

As tecnologias líderes na produção de aço com baixas emissões em carbono são citadas e explicadas nesta seção de modo bastante sucinto, apenas para conhecimento geral: (a) redução direta, onde o agente redutor é um gás que reage com o minério de ferro em sua forma sólida, gerando o ferro-esponja, as pelotas (ou *pellets*) de ferro podem alimentar um FAE para produção de aço, podem ser resfriados facilitando o transporte para plantas adjacentes ou ainda ser comprimidos produzindo o briquete de ferro quente; (b) fusão-redução ou redução de fusão: este processo não requer produção de coque e divide o alto-forno em duas etapas: pré-aquecimento do carvão e pré-redução do minério de ferro; (c) alto-forno com biomassa, onde biomassa é usada no alto-forno para produção do ferro gusa; (d) eletroextração ou extração eletrolítica, o termo se refere a tecnologias inovadoras de redução do minério de ferro por meio de eletricidade que ocorre em uma cuba eletrolítica; (e) CAC, que auxilia a reduzir as emissões de processos baseados em combustíveis fósseis, com a desvantagem de seu alto custo e necessidade de infraestrutura de grande porte; (f) eficiência energética, já discutida [8]. A implementação de medidas de mitigação como FAE (EAF-*electric arc furnace*), RD-H

(HDR-hydrogen-direct reduction) e CUAC (CCUS-carbon capture, utilization and storage) num cenário de desenvolvimento sustentável resultaria em uma redução de 54% nas emissões entre 2019 e 2050 (1,2 Gt CO₂) [3]. Algumas iniciativas promovendo a aplicação de tecnologias avançadas atualmente são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Iniciativas recentes na "siderurgia verde"

Companhia	Projeto/Tecnologia	Localidade	Meta
Arcelor Mittal	Redução por hidrogênio. Uso de "hidrogênio cinza" (derivado de gás natural)	Hamburgo, Alemanha	"Fossil free"até 2050
	Alto forno + eletrólise para produção de hidrogênio	Bremen, Alemanha	
	Alto forno híbrido com ferro reduzido de forma direta, injeção de gás.	Dunkirk, Alemanha	
	Gás de coqueria com hidrogênio cinza; hidrogênio no ferro reduzido de modo direto + forno de arco elétrico	Asturias, Espanha	
HYBRIT (SSAB, LKAB e Vattenfall)	Substituição do carvão coque por hidrogênio e eletricidade de origem não fóssil	Suécia	"Fossil free"até 2045
Boston Metal, BHP & Vale	Tecnologia de eletrólise de óxido fundido	Massachusetts, EUA	
Ovako	Uso de hidrogênio para aquecer o aço antes da laminação	Hofors, Suécia	
Liberty Ostrava	Construção de fornos híbridos	República Tcheca	Fornos híbridos construídos até 2022
Rogesa	Hidrogênio no gás coque como agente redutor	Dillingen, Alemanha	Operações iniciadas em 2020
Tata Steel	Captura e armazenamento de carbono abaixo do mar do norte; eletrólise da água para produção de hidrogênio e oxigênio	Ijmuiden, Holanda	Neutro em carbono na Europa até 2050
Thyssenkrupp	Hidrogênio como agente redutor; uso do hidrogênio renovável da RWE (empresa) e estudo de viabilidade de planta de eletrólise da água	Duisburg, Alemanha	Primeira fase de testes em 2021, segunda fase em 2022
Voestalpine Primetals Tech.	Hidrogênio como agente redutor para processar concentrados de minério de ferro	Linz, Áustria	Redução de 80% nas emissões de carbono até 2050
Tenaris, Edison e Snam	Eletrólise/siderurgia baseada em hidrogênio	Beragamo, Itália	
Salzitter AG (Salcos project)	Eletrólise/siderurgia baseada em hidrogênio	Wilhelmshaven, Alemanha	2 milhões de toneladas por ano de aço reduzido de forma direta (até o final do primeiro estágio de implementação, esperado para 2025)
Celsa, Statkraft & Mo industrial park AS	Eletrólise/siderurgia baseada em hidrogênio	Noruega	Redução de 50% nas emissões até 2030, descarbonização até 2050
H2 Green Steel Initiative	Siderurgia baseada em hidrogênio	Norte da Suécia	Produção planejada para iniciar em 2024. Meta anual de produção de 5 milhões de toneladas de aço verde até 2030

Fonte: Adaptada de [12].

Uma das rotas de descarbonização mais largamente consideradas para a produção primária de aço é a redução direta do minério de ferro baseada em hidrogênio verde seguida pela siderurgia com FAE (H₂-DRI-EAF). Esta rota tem sido amplamente vista como uma opção líder de descarbonização profunda, graças à intensificação dos investimentos industriais, piloto bem-sucedido dos precursores suecos e produção comercial planejada para 2025, sendo por tais motivos a tecnologia escolhida para ser investigada mais a fundo neste trabalho. [6]

2.6 REDUÇÃO DIRETA DO MINÉRIO DE FERRO POR HIDROGÊNIO VERDE E USO DO FORNO A ARCO ELÉTRICO (H₂-DRI-EAF)

Como dito, mudanças incrementais nas tecnologias atuais de produção primária de aço não seriam suficientes para atingir as metas de redução de GEE, por isso tecnologias avançadas, tais como as citadas na tabela 4, vêm sendo testadas, a fim de descarbonizar a indústria do ferro e do aço. [5]

A substituição do coque, que é usado nos altos-fornos como agente redutor, pelo hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água (hidrogênio verde), tem o potencial de reduzir substancialmente as emissões oriundas da produção de ferro e aço [5]. Soma-se a isso o uso do FAE e temos uma tecnologia conhecida pela sigla HDRI-EAF (*hydrogen direct reduction of iron ore- electric arc furnace*), cujo significado é a redução direta do minério de ferro pelo hidrogênio, seguida do uso do forno a arco elétrico.

2.6.1 Redução Direta do Minério de Ferro

A redução direta do minério de ferro faz referência à conversão do minério de ferro sólido ao ferro metálico sem transformação para fase líquida. [5]

A maioria do ferro reduzido de modo direto (DRI) é produzida reagindo-se óxido de ferro com gases redutores baseados em hidrocarbonetos, gases esses produzidos a partir da reforma a vapor do gás natural ou por gaseificação do carvão, tendo como subproduto do processo o CO₂. A tecnologia DRI tem sido empregada comercialmente e 5% de todo aço produzido mundialmente é fabricado através desta rota tecnológica. Menor investimento de capital, de espaço requerido, e um *design* e operação mais simples facilitam construir e operar uma planta DRI. A

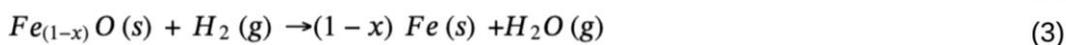
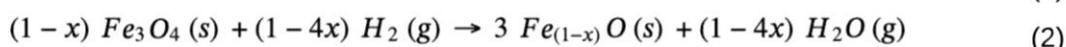
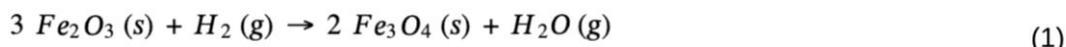
maioria das plantas DRI utiliza reatores de forno de cuba desenvolvidos pela MIDREX e HYL-Energiron tecnologias. [5]

O ferro reduzido de modo direto (DRI) chamado de ferro esponja e produzido no forno cuba pode alimentar o FAE tanto como DRI quente, quanto resfriado na forma de briquete para transporte. A adição de DRI no FAE reduz a dependência de sucata e melhora a qualidade do aço produzido. [5]

2.6.2 Redução Direta do Minério de Ferro por Hidrogênio

Neste sistema HDRI-EAF, o hidrogênio é usado como gás redutor e o uso do forno cuba requer minério de ferro em forma de pelota com conteúdo de, no mínimo, 67% de Fe, a fim de limitar as impurezas e prevenir dificuldades no FAE. [6]

O ferro que foi reduzido por H₂ (de modo direto) alimenta o FAE para a produção de aço. As reações de redução são mostradas nas equações a seguir (1)-(3). A reação de redução é endotérmica e energia em forma de calor precisa ser fornecida para levar a reação adiante. [5]



A equação (1) mostra a redução do minério de ferro conhecido como hematita (Fe₂O₃) gerando como produto o Fe₃O₄, minério conhecido como magnetita que, apesar de apresentar esta fórmula química, trata-se de uma mistura cuja composição química geralmente é formada por 31% de FeO e 69% de Fe₂O₃. A equação (2) mostra a redução da magnetita a wustita, FeO. Esta, apesar de possuir fórmula contendo um átomo de ferro para um átomo de oxigênio, na verdade se apresenta insuficiente em ferro, por isso, como se nota nas equações apresentadas, o correto é se referir ao composto pela fórmula Fe_(1-x)O ou então por Fe_xO, onde x está em torno de zero. E, por último, há a redução do FeO a Fe metálico mais vapor d'água, conforme a equação (3). Em termos iônicos a redução dos cátions se dá na seguinte sequência: do Fe⁺³ (íon férrico) para uma mistura de Fe⁺² e Fe⁺³, desta mistura para Fe⁺² (íon ferroso) apenas e deste para o ferro metálico Fe⁰. A propagação da reação e os diferentes processos envolvidos na mesma são ilustrados na Figura 6. [5]

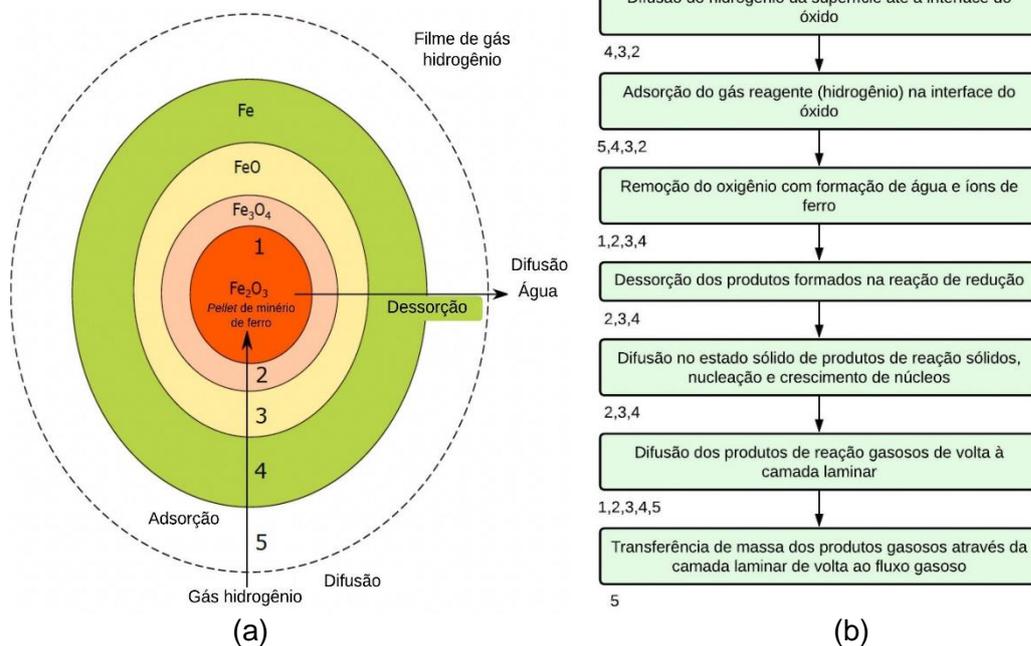


Figura 6 - Propagação da reação e processos envolvidos na redução direta do minério de ferro por hidrogênio. (a) Modelo de núcleos concêntricos mostrando a evolução da reação de redução do minério de ferro com hidrogênio. (b) Etapas do processo de redução dos pellets de minério de ferro com hidrogênio. A localização de cada etapa de processo está representada por números de 1 a 5 (1b), que também são mostrados no modelo de núcleos concêntricos (1a).

Fonte: Adaptada de [5].

Passando agora à Figura 6, nota-se que a reação química ocorre por adsorção do hidrogênio gasoso na interface do óxido de ferro. A altas temperaturas, a taxa da reação química é mais alta que a taxa de transporte ou taxa de transferência de massa de reagentes e produtos. Em uma reação sólido-gás a altas temperaturas, a difusão de reagentes e produtos é, com frequência, a etapa limitante da reação. A porosidade das pelotas também é um fator importante, já que a porosidade maior da matéria prima conduz a uma maior permeabilidade e difusividade de reagentes e produtos. O tamanho e a geometria das pelotas bem como a temperatura do gás de entrada possuem uma forte influência na taxa de reação, sendo que esta varia inversamente com o tamanho das pelotas, ou seja, quanto menores elas forem, maior será a taxa de reação, uma vez que a área superficial disponível para reagir é tanto maior quanto menores forem as pelotas. [5]

Estudos experimentais têm mostrado que a taxa da reação de redução do minério de ferro é mais alta com H₂ puro do que com o gás de síntese (mistura de CO e H₂) que é usado tradicionalmente, e na faixa de temperatura que vai de 700 a

900 °C. A adição de pequenas quantidades de CO na mistura de gases redutores pode desacelerar significativamente a reação de redução, uma vez que o CO reduz a difusividade dos gases redutores. Por meio de experimentos de redução da hematita com H₂ a diferentes temperaturas foi descoberto que, em temperaturas mais altas que 900 °C, a taxa reacional diminui devido ao processo de sinterização e formação de uma densa camada externa nas pelotas de minério de ferro. Os valores para a energia de ativação aparente da reação de redução variam de 11 KJ/mol até 246 KJ/mol. A grande variação observada nestes valores se deve a múltiplos fatores, tais como: propriedades termo-físicas dos materiais de entrada, composição do gás redutor, temperatura de redução, tamanho de partículas, etc., sendo estas apenas algumas variáveis do sistema. Há ainda a necessidade de uma investigação mais completa para avaliar a energia de ativação aparente requerida na redução do minério de ferro com hidrogênio puro. [5]

2.6.3 Tecnologia HDRI-EAF na Produção de Aço

Como foi visto, o aço pode ser produzido pela redução de minério de ferro ou por reciclagem de sucata de aço em um FAE. No entanto, a disponibilidade limitada de sucata e a busca crescente por tipos de aços especiais, que não podem ser produzidos a partir de aço reciclado, levariam a um aumento futuro na produção de aço baseada em minério de ferro. Daí a importância em se explorar uma tecnologia como a HDRI, baseada em minério. [5]

Quanto ao hidrogênio, um portador de energia, se sabe que possui aplicações em outros setores do sistema energético, como produção química, transportes pesados, aviação, etc. Uma produção em larga escala, armazenamento e transporte de hidrogênio para atender à demanda do setor siderúrgico irá reduzir os preços para outros setores industriais. O uso de hidrogênio verde no setor de ferro e aço, tem o potencial de reduzir as emissões em 2,3 GtCO₂/ano, globalmente. [5]

Mais de 80% da produção de aço baseada em minério é feita através da rota alto-forno e aciaria a O₂ (conversor LD). Esta rota usa aproximadamente 18 GJ/t de energia fornecida a partir de carvão e possui uma intensidade de emissão de cerca de 1870 kgCO₂/tIs (considerando a fabricação de pelotas, laminação e etapas de acabamento), sendo que a maioria das emissões é liberada a partir do alto-forno (61%) e da fábrica de coque (27%). Há, portanto, uma oportunidade clara para aumentar o uso do FAE na siderurgia, bem como de sucata [5]. Porém, a

manufatura do aço a partir do minério de ferro ainda será necessária em algumas regiões e esforços deveriam ser feitos para trocar os fornos para os de arco elétrico, especialmente em áreas onde os altos-fornos estiverem chegando ao final do ciclo de vida. O desafio neste caso consiste nos altos preços da energia nacional de alguns países, como o RU, por ex., onde políticas intervencionistas poderiam reduzir os preços e encorajar os investimentos na siderurgia com FAE. [12]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho de conclusão de curso foi inteiramente fundamentado em revisão bibliográfica conduzida por meio de pesquisa qualitativa, leitura e análise minuciosa de artigos científicos (em sua maioria) selecionados, mas contando também com relatórios, publicações diversas e outras fontes de informação pertinentes ao assunto proposto.

Com a finalidade de levantar informações relevantes e seguras sobre o tema, foi realizada uma busca no acervo do portal de periódicos da CAPES, portal este vinculado ao Ministério da Educação e de acesso gratuito ao estudante de instituições participantes.

Os artigos foram encontrados por meio de palavras-chave, tais como "Green Steel", "Decarbonization of the Steel Industry", "Hydrogen-Based Steel", "Direct Reduced Iron", "Greenhouse Gases on the Steel Industry", "Green Hydrogen", entre outros termos. Dentre os resultados sugeridos, foram selecionados artigos revisados por pares e que abordavam o tema direta ou indiretamente. Após uma seleção inicial e vista do conteúdo de cada artigo escolhido, os mais relevantes ao trabalho foram separados para uma leitura mais acurada e completa. Por se tratar de um assunto relativamente novo, a pesquisa qualitativa resultou em artigos produzidos recentemente, sendo alguns deste mesmo ano, e a língua predominante foi o inglês.

Findo o estudo dos artigos e publicações, foi possível conhecer o estado da arte e realizar a seleção de conteúdo para redação do trabalho, bem como discutir resultados e, por meio do apanhado geral, montar um quadro sobre o tema "aço verde", abrangendo também o Brasil como fim último.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VIABILIDADE DO USO DE HDRI-EAF NA PRODUÇÃO DE AÇO

A produção de aço baseada na redução direta do minério de ferro por hidrogênio juntamente com forno a arco elétrico (HDRI-EAF) é, no momento, a alternativa mais viável à produção baseada em alto-forno e aciaria a oxigênio. [5]

Um estudo conduzido por Bhaskar et al. desenvolveu um modelo de fluxo de massa e energia baseado em um *software* de fonte aberta (*Python*) a fim de explorar a viabilidade de se utilizar esta tecnologia (HDRI) juntamente com FAE para a produção (livre de carbono) de aço. [5]

O resultado desta modelagem mostrou que esta tecnologia HDRI-EAF poderia reduzir as emissões específicas da produção de aço na União Europeia em mais de 35%, nos atuais níveis de emissão da rede ($295\text{kgCO}_2/\text{MWh}$). O consumo de energia para a produção de uma tonelada de aço líquido (tIs) através desta rota HDRI-EAF foi estimado em 3,72 MWh, o que é apenas levemente maior que os 3,48 MWh requeridos para a produção através da rota do alto-forno e aciaria a oxigênio. Os processos de mineração de ferro, fabricação de pelotas e de acabamento do aço não foram considerados. Análises sensitivas revelaram que a eficiência do eletrolisador é o fator mais importante que afeta o consumo de energia do sistema, enquanto o fator de emissão de rede elétrica está fortemente relacionado às emissões globais do sistema. [5]

O referido estudo tem como diferencial o fato de os limites do sistema terem sido claramente definidos, tornando mais fácil comparar as intensidades de emissão e de consumo energético entre os processos siderúrgicos baseados em alto-forno e aciaria a oxigênio e aqueles baseados em HDRI-EAF. Mais detalhes sobre parâmetros de processos foram incluídos nesta modelagem do que em outros modelos comparáveis disponíveis na literatura, além disso os códigos foram escritos em *software* de fonte aberta e estão disponíveis ao exame minucioso de outros pesquisadores que assim desejem fazê-lo [5]. A Figura 7 ilustra a configuração do sistema HDRI-EAF e seus diferentes componentes.

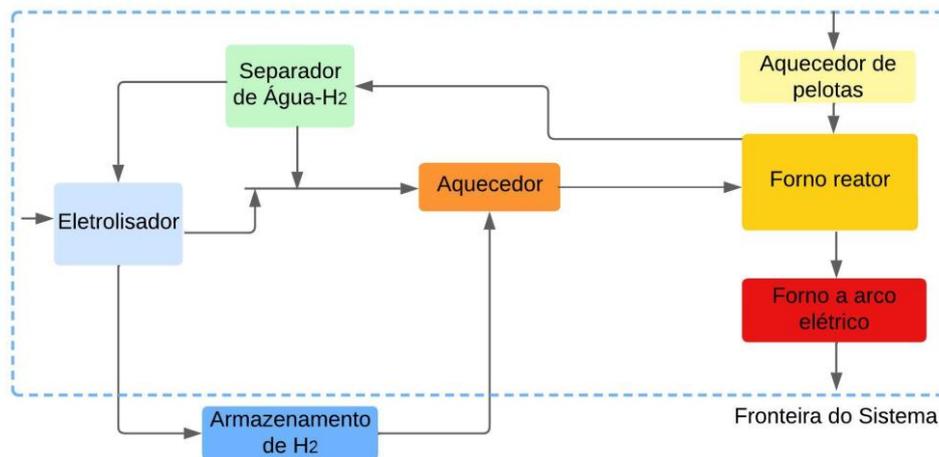


Figura 7 - Esquema do forno cuba de redução direta do minério de ferro por hidrogênio acoplado ao forno de arco elétrico. Um eletrolisador foi considerado para a produção de hidrogênio.

Fonte: Adaptada de [5].

A seguir, cada etapa do processo é resumida e alguns valores assumidos para as variáveis da modelagem do sistema são mencionados. Esta modelagem tem como resultado a análise de emissões e consumo energético pelo uso da tecnologia HDRI-EAF, o que possibilita verificar a viabilidade de seu uso para cada país.

(a) Aquecimento das Pelotas

Assumiu-se nesta análise que uma unidade elétrica de aquecimento foi utilizada para aquecer as pelotas (*pellets*) de minério de ferro até 800 °C. [5]

(b) Forno de Redução Direta

O forno cuba utilizado na redução direta é um reator sólido-gás de formato vertical, onde pelotas de minério de ferro pré-aquecidos a 800 °C são carregados pelo topo para reagir com o fluxo de hidrogênio que entra pela base do reator. As partículas de minério necessitam ser completamente submersas em hidrogênio para uma taxa ótima de reação. A reação é endotérmica com entalpia de 99,5 KJ/mol. Neste forno ocorre a metalização e a taxa de metalização (α) é definida como a porcentagem de ferro metálico que deixa o forno no fluxo de ferro. O ferro reduzido diretamente (DRI) contém ferro metálico juntamente com FeO (wustita), que precisa ser reduzida dentro do FAE. Assumiu-se uma taxa de metalização de 94% para este estudo. Quanto ao fluxo de gás residual que deixa o forno, assumiu-se ser uma mistura de hidrogênio que não reagiu e vapor d'água produzido durante a reação de redução. A quantidade de água produzida depende da taxa de metalização, já a quantidade de hidrogênio não utilizado no fluxo residual depende do montante de

hidrogênio que adentra o forno. Um melhor entendimento da cinética de reação e do *design* do forno são necessários para se calcular a exata composição e temperatura do fluxo de gás residual. Mais energia é necessária para uma produção DRI baseada 100% em hidrogênio do que aquela baseada em gás de síntese, uma vez que a redução do minério de ferro por hidrogênio é uma reação endotérmica e a redução por CO é exotérmica. [5]

(c) Forno a Arco Elétrico

Assumiu-se que o ferro reduzido de modo direto (DRI) com conteúdo de ferro metálico de 94% entra no FAE a uma temperatura de 700°C. Este forno opera com 100% de DRI quente e a temperatura do forno foi tida como 1650 °C a fim de garantir a completa fusão do ferro metálico. A eficiência elétrica do forno, β_{el} , foi considerada 0,6 para englobar as perdas no transformador, retificador, eletrodos e outros subsistemas. O carbono é adicionado ao forno para a produção de CO e o O₂ produzido a partir da eletrólise da água poderia ser acrescentado também para produção de CO com a finalidade de reduzir o FeO (wustita) no FAE. Assumiu-se que 70% do FeO que adentra o forno é reduzido, sendo o restante removido como escória. O fluxo de gás de escape do forno é considerado ser uma mistura de CO e CO₂. Elementos adicionais são incorporados ao fundido para melhorar suas propriedades termo-físicas e eles não foram considerados nesta análise. [5]

(d) Eletrolisador

Neste modelo, um eletrolisador alcalino foi considerado devido a seu custo mais baixo em comparação e a seu uso no empreendimento HYBRIT (citado na tabela 4), um projeto piloto de redução direta de minério de ferro baseada em hidrogênio na Suécia. Já as especificações técnicas do modelo de eletrolisador foram tiradas do eletrolisador alcalino 20MW produzido pela Thyssenkrupp indústrias. Quanto ao excesso de hidrogênio produzido em períodos fora de pico, este poderia ser inserido num tanque de armazenamento pressurizado de hidrogênio. A eletricidade utilizada no eletrolisador poderia ser oriunda tanto da rede quanto de um sistema de geração de energia renovável dedicada e o consumo de energia foi considerado em 45KWh/KgH₂. [5]

(e) Unidade de Separação de Gás Residual

O H₂ que não reagiu é separado do fluxo de gás residual usando-se um adsorvedor com modulação de pressão [5]. Trata-se de uma tecnologia usada para

separar algumas espécies de um gás sob pressão de acordo com as características moleculares destas espécies e afinidade por um material adsorvente. [13]

A água separada do fluxo residual é reintroduzida no eletrolisador. A energia requerida para funcionamento do adsorvedor não foi considerada neste modelo. Assumiu-se que o fluxo de água e de hidrogênio são livres de impurezas bem como que a temperatura do fluxo de gás residual que entra no adsorvedor é 250°C. [5]

(f) Aquecedor Elétrico para Fluxo de Hidrogênio

Um aquecedor elétrico com eficiência de 0,6 foi considerado para aquecer o fluxo de gás hidrogênio que entra no forno cuba a uma temperatura de 500°C. O fluxo de gás hidrogênio que adentra o aquecedor é uma mistura de hidrogênio vindo do eletrolisador a 90°C e de hidrogênio separado nos adsorvedores com modulação de pressão a 250°C. [5]

4.1.1 Resultados da Modelagem

Os resultados desta modelagem foram analisados em termos de consumo energético e de emissões do sistema HDRI-EAF. Cabe frisar que se assumiu que o minério de ferro contém 5% de impurezas e que a taxa de metalização de 0,94 foi atingida durante a redução direta do minério no forno cuba. [5]

4.1.1.1 Consumo de Energia Elétrica no Sistema HDRI-EAF

A variação do consumo de eletricidade com a mudança no fluxo de massa de hidrogênio que adentra o forno cuba é mostrada na Figura 8:

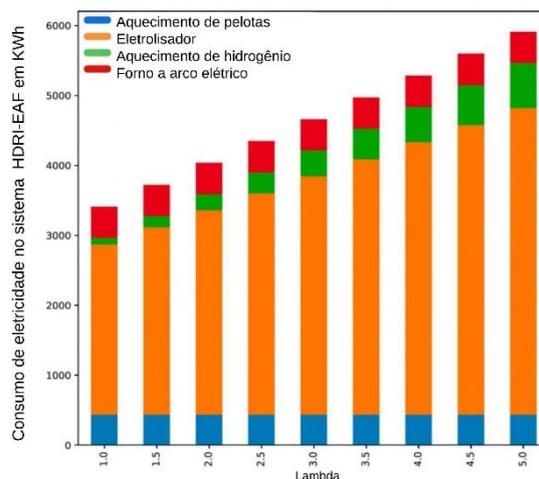


Figura 8 - Variação na demanda de eletricidade (KWh) no sistema HDRI-EAF conforme se varia a taxa do fluxo de massa de hidrogênio (lambda) no forno cuba de redução direta de minério.

Fonte: Adaptada de [5].

A energia total consumida variou entre 3,4 até 5,91 MWh/tls (onde tls significada tonelada de aço líquido) conforme λ variou de 1 a 5.

O consumo específico de energia (CEE) no sistema HDRI é de 3,72 MWh/tls ($\lambda= 1.5$) e foi mais alto do que aquele da produção de aço baseada em alto-forno e aciaria a oxigênio (conversor LD), cujo valor do CEE é de 3,48 MWh. Toda a energia neste sistema HDRI-EAF foi consumida na forma elétrica. Eletricidade foi necessária para aquecimento das pelotas, para produção de hidrogênio, aquecimento do fluxo de hidrogênio que adentra o forno cuba e para fusão do ferro dentro do FAE. A troca do sistema alto-forno e aciaria a oxigênio pelo sistema HDRI-EAF para produção de aço levaria a uma demanda adicional de eletricidade de 375 TWh na UE. Também se observou que aumentando o fluxo de massa de hidrogênio no forno de redução direta, aumenta-se o consumo de energia no eletrolisador bem como no aquecedor para aquecimento de hidrogênio. [5]

Por meio da análise da Figura 8, é possível notar que cerca de 436 KWh/tls de eletricidade foram necessárias para aquecimento das pelotas de minério de ferro até a temperatura de reação, que é 800°C. O pré-aquecimento do fluxo de hidrogênio que entra no forno cuba requer 160 KWh de eletricidade. O eletrolisador consumiu a maior fatia, 2680 KWh/ de eletricidade, o que é aproximadamente 70% do total da energia consumida em todo o sistema HDRI-EAF. Por fim, o FAE consome 445 KWh/tls de energia elétrica. [5]

O desempenho do eletrolisador e o fluxo de massa de H₂ têm um impacto significativo no consumo global de energia do sistema. Cabe frisar que o tipo de matéria-prima, a temperatura da reação de redução e o *design* do reator impactam no fluxo de massa de H₂ para uma taxa ótima de reação. Já o consumo de energia no FAE aumenta a taxas menores de metalização. Se a quantidade de impureza nas pelotas de minério aumenta, uma tendência similar no consumo de energia pode ser observada. O consumo de energia no FAE diminui a temperaturas maiores do ferro reduzido de modo direto. [5]

4.1.1.2 Emissões do Sistema HDRI-EAF

Neste sistema, as emissões estão diretamente relacionadas à quantidade de eletricidade utilizada. Uma pequena parte das emissões é produzida também no FAE como resultado da redução de wustita com carbono e da oxidação do carbono

a CO e a CO₂ subsequentemente. Estas emissões não foram consideradas. A intensidade de emissões do sistema varia com o fator de emissão de rede dos países como se pode observar na Figura 9. [5]

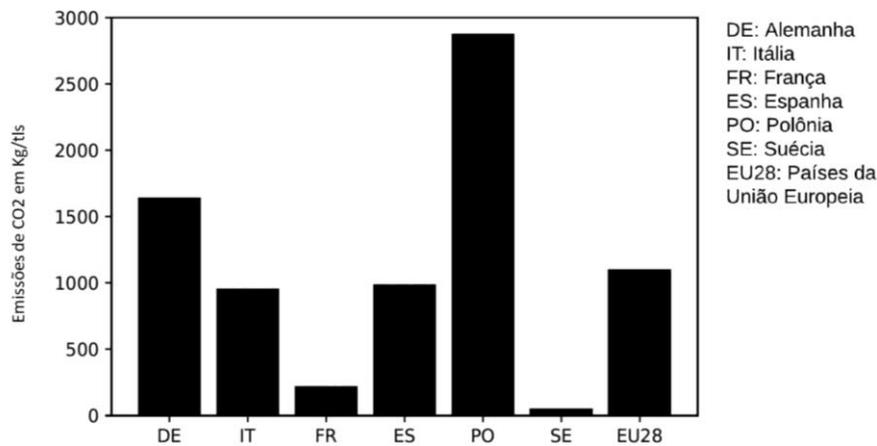


Figura 9 - Variação na emissão de CO₂ conforme os países em KgCO₂ por tonelada de aço líquido produzido.

Fonte: Adaptada de [5].

A intensidade de emissão do processo alto-forno e conversor LD é de 1688 KgCO₂/tls na UE, que é muito maior que os 1101 KgCO₂/tls correspondentes à intensidade de emissão do sistema HDRI-EAF (com um fator de emissão de rede na UE de 295 KgCO₂/MWh). Os resultados da modelagem apontaram que as emissões oriundas da produção de aço no sistema HDRI-EAF poderiam ser menores que os da rota convencional na maioria dos países da UE nos níveis de emissão de rede atuais, exceto na Polônia. O fator de emissão de rede da Polônia é de 773 gCO₂/Wh, o que é mais que o dobro da média dos fatores da UE, 295 gCO₂/KWh. A intensidade de emissões devido à produção de aço baseada em HDRI-EAF poderia ser reduzida a 415 KgCO₂/tls em países com fatores de emissão de rede baixos, como a Suécia por exemplo. Se a eletricidade for fornecida a partir de fontes de energia renováveis então haveria uma redução de 170,26 MtCO₂ anualmente. Porém, o emprego da produção de aço baseada em HDRI-EAF poderia aumentar as emissões da siderurgia em países com um fator de emissão de rede maior que 456 gCO₂/KWh, lembrando que a média para a UE é de 295 gCO₂/KWh. [5]

4.1.1.3 Consumo Energético e Emissões nos Países da União Europeia

Agora serão avaliados o impacto na demanda energética e emissões em diferentes países da UE devido à transição para o sistema de produção primária de aço baseado em HDRI-EAF. Os dados de produção do aço foram coletados da base de dados integrada do setor de energia europeu (IDEES) e o ano de referência para os dados de produção é 2015. O consumo adicional de energia e aumento de emissões devido à produção das pelotas, sinterização e processos de acabamento também foram considerados nesta análise. Os resultados são apresentados nas Figuras 10-a e 10-b. [5]

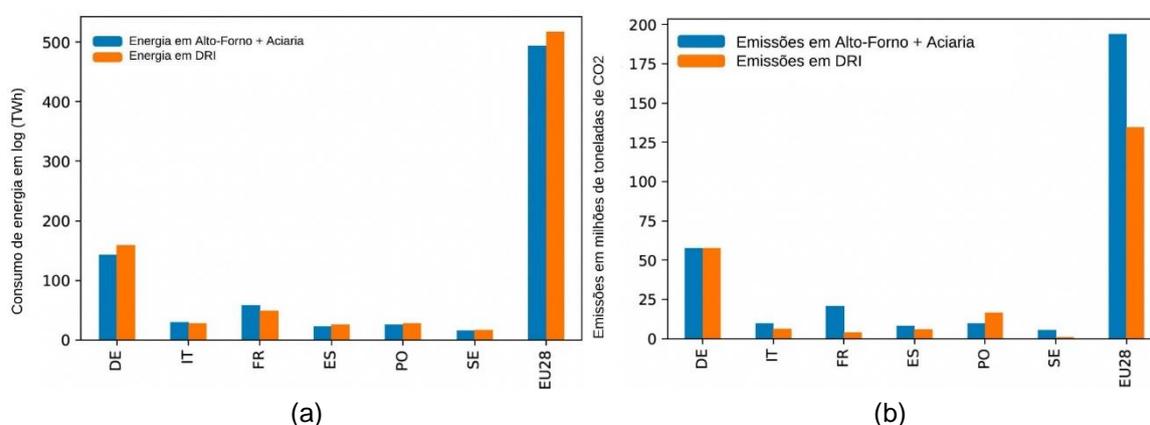


Figura 10 - Comparação de consumo energético e emissões nos países da EU entre produção atual e (HDRI)-EAF. (a) Comparação entre a demanda de energia atual da produção primária de aço em países da UE e a demanda de energia projetada para conversão à redução direta do minério de ferro por hidrogênio com FAE (HDRI)-EAF. (b) Comparação entre as emissões atuais da produção primária de aço em países da UE e emissões projetadas para completa conversão para a produção de aço baseada em HDRI-EAF.

Fonte: Adaptada de [5].

A energia necessária para a produção de aço na UE poderia aumentar de 493 TWh a 517 TWh devido à mudança para uma produção baseada em HDRI-EAF. Por outro lado, as emissões da produção siderúrgica poderiam ser reduzidas de $193 \cdot 10^6$ de tons. de CO₂/ano para cerca de $134 \cdot 10^6$ de tons. de CO₂/ano. [5]

4.1.1.4 Análise de Sensibilidade

Uma análise de sensibilidade local foi conduzida pela variação dos parâmetros de entrada em $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$, $\pm 20\%$, um de cada vez e mantendo-se os outros parâmetros fixos. Os parâmetros considerados na análise de sensibilidade foram: fluxo de massa de hidrogênio (λ), eficiência do

eletrolisador, temperatura de entrada de hidrogênio (T3), temperatura de entrada do forno a arco (T4), eficiência do adsorvedor e fator de emissão de rede. Os resultados desta análise são apresentados na Figura 11. [5]

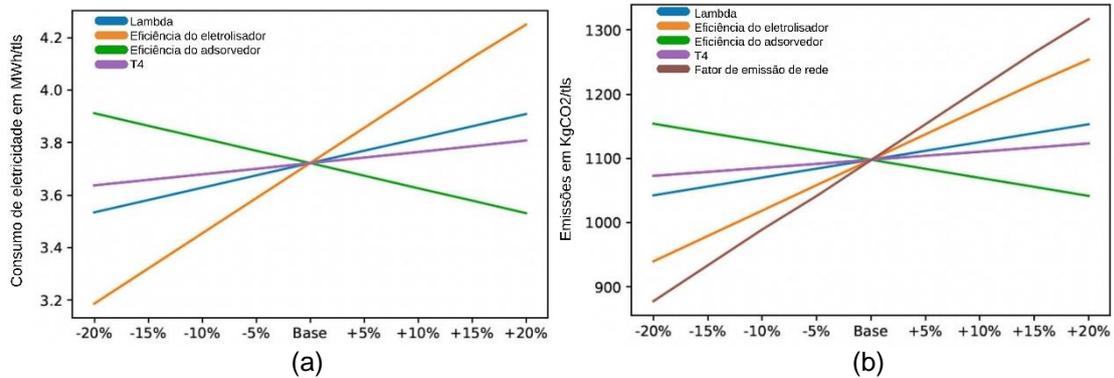


Figura 11 -Análise de sensibilidade do sistema. (a) Análise de sensibilidade para identificar os parâmetros que afetam a demanda de eletricidade do sistema HDRI-EAF. (b) Análise de sensibilidade para identificar os parâmetros mais importantes que afetam as emissões de CO₂ no sistema HDRI-EAF.

Fonte: Adaptada de [5].

Como se nota a partir da Figura 11-a, a análise de sensibilidade revelou que a saída do eletrolisador afeta o consumo de eletricidade o sistema HDRI-EAF. A saída do eletrolisador é um indicador de eficiência em termos de quantidade de eletricidade requerida para a produção de um Kg de hidrogênio (KWh/H₂). Um outro fator importante que afeta o consumo de eletricidade é o lambda, este valor está relacionado ao *design* do forno reator e às condições de operação. A demanda de eletricidade do sistema diminui com o aumento da eficiência de adsorção na unidade de adsorvedor com modulador de pressão. Já as emissões do sistema estão fortemente relacionadas ao fator de emissão de rede, como mostra a Figura 11-b. Portanto, a eficiência do eletrolisador, o lambda, o fator de adsorção e o fator de emissão de rede são parâmetros importantes que governam emissões gerais do sistema, uma vez que eles estão diretamente relacionados ao consumo de eletricidade do sistema HDRI-EAF. [5]

4.2 PRODUÇÃO DE AÇO VERDE VIA ROTA H₂-DRI-EAF BASEADA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS E DEPÓSITOS DE MINÉRIO DE FERRO

Toda a energia consumida no sistema de redução direta do minério de ferro com uso de FAE para produção de aço é energia elétrica e esta pode vir tanto da

rede quanto de uma fonte dedicada empregando fontes renováveis de energia, favorecendo a descarbonização do setor.

Um estudo realizado por Devlin et al., onde mais de 300 localidades foram analisadas pelo uso combinado de otimização e aprendizado de máquina (*machine learning*), mostrou que produções de aço baseadas em fontes renováveis que são competitivas no mercado são aquelas localizadas próximas aos trópicos de Capricórnio e de Câncer, pois são caracterizados pela incidência solar superior juntamente com ventos costeiros e além disso contam com minério de ferro de alta qualidade e uma remuneração da mão de obra relativamente menor. A estimativa é que, se os preços do coque permanecerem altos e as projeções de custos para eletrolisadores, painéis solares e turbinas eólicas se concretizarem, a maioria das localidades pode se tornar competitiva frente à rota fóssil baseada em alto-forno e aciaria a oxigênio em 2050. A implementação desta tecnologia em larga escala requer atenção à abundância de minério de ferro adequado e outros recursos, como terra e água, desafios técnicos associados à redução direta, e configuração futura da cadeia de suprimentos. [6]

A tecnologia H₂-DRI-EAF apresenta uma oportunidade única de se reavaliar a localização das instalações de produção e conseqüentemente as configurações da cadeia de suprimentos, a fim de otimizar o uso dos recursos locais disponíveis. Uns poucos estudos têm investigado a produção H₂-DRI-EAF com custo minimizado, entretanto com uma cobertura espacial limitada: Reino Unido e norte da Europa. Em estudos que não levaram em conta a diferenciação em termos de recursos regionais (climáticos e geológicos) nem otimização de energias renováveis, a suposição comum foi que futuras instalações de produção estarão correlacionadas com as localizações das atuais instalações de produção. Em contrapartida, no estudo aqui discutido, é feita uma análise do potencial global da produção de "aço verde" usando tecnologia H₂-DRI-EAF com energias renováveis onde toda a cadeia de suprimentos está localizada nas vizinhanças das minas de ferro. Levando-se em conta os desafios da oferta de energias renováveis e de minérios de ferro, o estudo considera particularmente a distribuição geográfica dos recursos locais. [6]

Foram projetados três cronogramas (seguindo o avanço tecnológico) de implantações: 2030, 2040 e 2050 combinados a diferentes níveis de sucata no aço: 0%, 25% e 50%. A modelagem foi resolvida para 44 regiões em 17 importantes

países produtores de minério de ferro. Para cada região, os custos da obtenção de minério de ferro adequado para o sistema DRI (custos esses baseados em dados de qualidade do minério de ferro nacional) foram estimados e combinados com custos de mão de obra e com a saída de otimização do modelo para produção de aço a fim de estabelecer o custo total do aço baseado em H₂ verde. Energia solar e eólica foram escolhidas como o núcleo dos recursos energéticos renováveis para as análises, uma vez que estão disponíveis em todas as localidades estudadas e previstas a entregar 70% da geração elétrica global em 2050. Ademais foram comparadas plantas movidas à eletricidade da rede e outras movidas 100% à energia renovável. A oferta isolada de energia renovável (100%), embora garanta emissões de carbono próximas a zero, apresenta intermitência e variabilidade que podem ser contornadas usando armazenamento de energia e/ou superdimensionando uma planta de produção flexível, por esta razão é que plantas alimentadas por eletricidade da rede também foram analisadas, já que oferecem um suprimento de energia estável. A perspectiva econômica e com relação às emissões de carbono para os dois esquemas foi avaliada em referência à rota convencional: alto-forno mais aciaria a oxigênio (conversor LD). Os resultados para a rota verde são mostrados na Figura 12. [6]

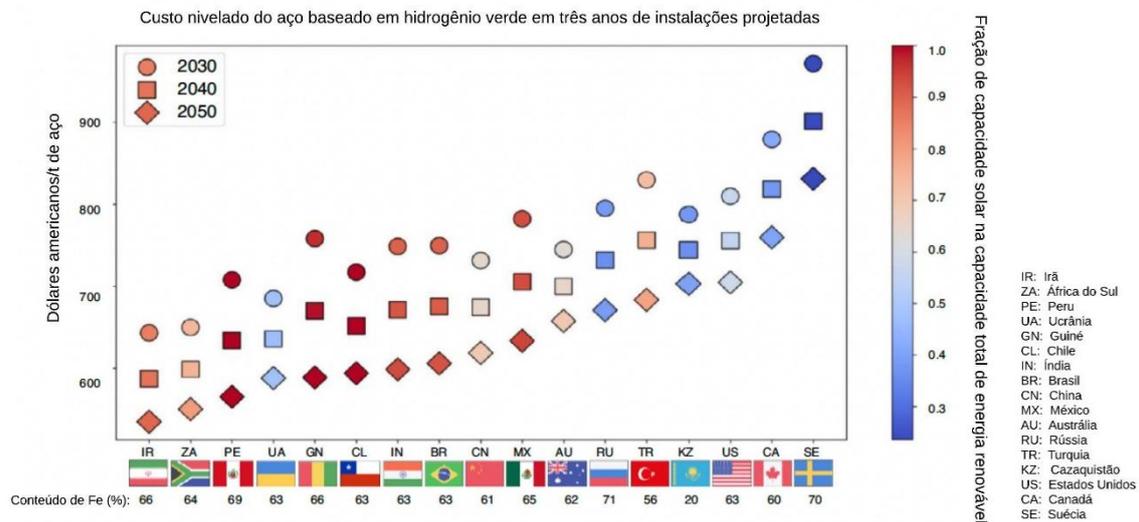


Figura 12 - Resultados da otimização da siderurgia via H₂-DRI-EAF com oferta isolada de energias renováveis (0% sucata). Ranking de custos de 17 países ao longo de 3 anos projetados – 2030, 2030 e 2050.

Fonte: [6].

4.2.1 Minérios e Energias Renováveis de Alta Qualidade para um Aço Verde de Baixo Custo

Como visto na Figura 12, os custos nivelados projetados para o aço verde nas condições descritas situaram-se na faixa de \$535-972/t, sem carregamento de sucata. Em 2050, a faixa de custos nivelados projetados cai para \$535-831/t, com custos nivelados do H₂ de \$1,63 a \$2,80/t e custos nivelados de energia, calculados com base na energia consumida na produção de aço, de \$16 a 50MWh. Os custos variaram de acordo com a região (afetados pelo potencial em energia renovável, qualidade do minério de ferro e remunerações de mão de obra) e o ano de instalação do projeto (afetados pelos custos das unidades tecnológicas emergentes e eficiência do eletrolisador). Localidades favoráveis foram aquelas com dominância solar na infraestrutura de ER, embora com alguma capacidade eólica para balancear o perfil diurno. Em 2050, a porção solar da capacidade de ER nas localidades mais favoráveis, sendo elas: Irã, Peru, África do Sul e Chile, será de 89%, 100%, 80% e 100%, respectivamente. Um forte potencial em energia solar com variações sazonais mínimas permitiu aos sistemas de produção lucrarem devido aos custos unitários mais baratos dos painéis solares fotovoltaicos em relação a turbinas eólicas (\$327/KW e \$835/KW, respectivamente, em 2050) e reduzir o superdimensionamento dos eletrolisadores e/ou requisitos de armazenamento. Uma produção acessível de aço baseada em hidrogênio verde foi correlacionada com consumo menor de energia e de território. [6]

Energia solar e eólica foram consideradas na oferta isolada de energia renovável por representarem os tipos de ER mais prováveis a dominar o crescimento da capacidade em ER na maioria dos países nas próximas décadas. Contribuições de fontes energéticas zero-carbono contínuas e controláveis, como hidrelétrica (muito importante para países como Brasil e Suécia) e nuclear, podem exercer um papel crítico na produção competitiva de aço verde. No entanto, estas fontes de energia não foram consideradas no caso isolado (100% de ER), mas se refletirão na evolução do mix energético nacional no estudo baseado em energia de rede discutido mais à frente. [6]

4.2.2 Competitividade de Mercado nas Próximas Décadas para Localidades Ideais

A rota verde de produção H₂-DRI-EAF pode ser competitiva frente à rota alto-forno e aciaria a oxigênio em termos de custos já na próxima década em localidades favoráveis e, para a maioria das localizações, até 2050. Os custos projetados para a produção de aço verde produzido em locais com minas de ferro são plotados frente aos custos atuais da rota alto-forno e aciaria a oxigênio na Figura 13. [6]

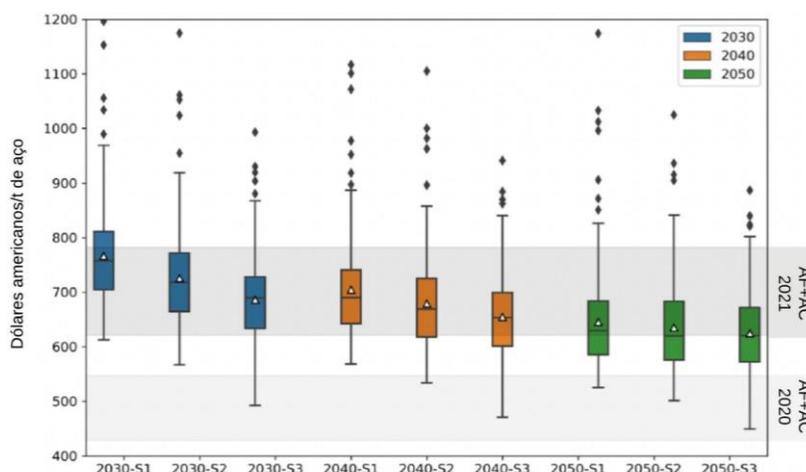


Figura 13 - Custos de produção do aço verde em três décadas comparados aos custos referentes aos anos de 2020 e 2021 da rota alto-forno e aciaria. Caso S1= 0% de sucata; caso S2= 25% de sucata e caso S3= 50% de sucata.

Fonte: [6].

Os custos operacionais da rota AF+AC em 2021 variaram de \$621-\$782 por tonelada nas localidades selecionadas, o que representa um aumento acentuado em relação ao ano de 2020 (\$428-\$547/t) devido à alta nos preços das *commodities*, notavelmente carvão metalúrgico e minério de ferro. Com referência aos custos da rota tradicional (AF + AC) em 2021, foi projetado que, já em 2030, algumas regiões estudadas experimentarão competitividade (<\$782/t) do aço verde produzido unicamente com energia solar e eólica (sem carregamento de sucata nem taxaço de carbono). Para reduzir a diferença de custos que há entre as duas rotas, mecanismos de taxaço de carbono podem ser essenciais. Em 2030, observa-se uma clara relação entre adição de sucata e os custos de produção, onde a adição de 25% gera uma redução de 5% nos custos, enquanto a adição de 50% de sucata produz uma redução de custos de 9%. Já em 2050, o uso da sucata é menos influente em reduzir os custos de produção, isso se deve à queda nos custos da energia renovável que faz com que os custos do ferro reduzido de modo direto

sejam comparáveis aos custos da sucata (adição de 50% de sucata gera uma redução de 2% nos custos). O carregamento de sucata no FAE favoreceu países onde a sucata é mais barata: China (\$212/t), Suécia (\$355/t), Brasil (\$380/t) e Chile (\$387/t), por outro lado desfavoreceu aqueles onde a sucata é cara: Rússia (\$624/t), Ucrânia (\$534/t) e Canadá (\$472/t). Deve-se levar em conta que enquanto a adição de sucata beneficia esta rota verde, a rota tradicional também é beneficiada. Ainda pensando em custos, a energia representa 8-20% dos custos de produção da rota AF+AC, enquanto na rota verde, todo o sistema de ER (painéis solares, turbinas eólicas, eletrolisadores) ocupa 21-33% dos custos totais em 2050 (e 27-41% em 2030). A média de custos dos projetos instalados em 2040 e 2050 caiu 8% e 16%, respectivamente, comparado a 2030, em conformidade com as projeções a longo prazo de custos unitários reduzidos para a infraestrutura de energia renovável. [6]

Os custos do aço baseado em H₂ verde (em 2050, sem carregamento de sucata) foram atribuídos a: minério de ferro (28%), painéis solares e turbinas eólicas (19%), eletrolisadores (9%), planta de produção (14%), armazenamento de energia (6%), mão-de-obra (9%), outras matérias-primas (7%) e operação e manutenção (9%). Por fim, a transição do sistema convencional para o de aço baseado em H₂ verde pode impactar a competitividade regional relativa, (Figura 14). [6]

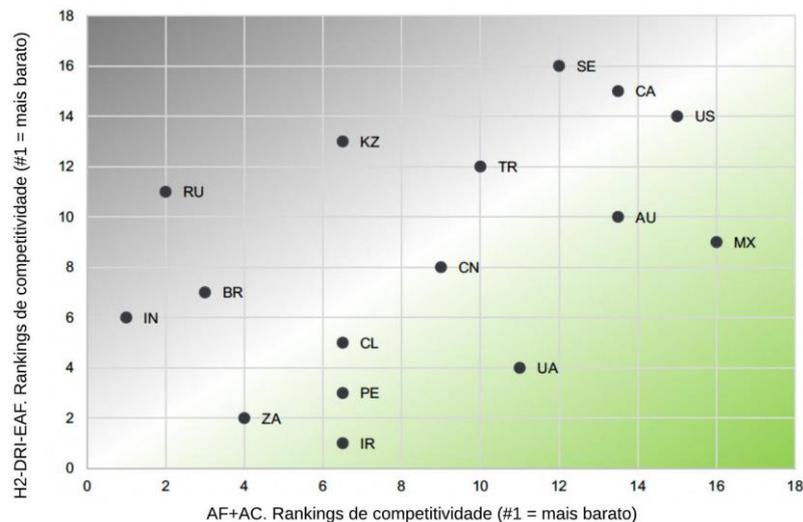


Figura 14 - Competitividade de custo relativa entre AF+AC (2021) e produção verde H₂-DRI-EAF (2050) para 16 dos 17 países otimizados, exceto a Guiné, onde atualmente não existe indústria siderúrgica. Quanto mais próximo um país estiver da parte de baixo do canto.

Fonte: [6].

México (MX) e Ucrânia (UA) podem se beneficiar mais significativamente da transição, seguidos por Irã (IR), Austrália (AU) e Peru (PE). Em contraste, Rússia

(RU), Cazaquistão (KZ), Índia (IN), Brasil (BR) e Suécia (SE) provavelmente irão diminuir sua competitividade relativa de mercado caso a produção de aço verde seja estabelecida com uso isolado de energia renovável baseado em energia solar e eólica. No entanto, alguns desses países podem, alternativamente, explorar eletricidade acessível e de baixo carbono da rede local. [6]

4.2.3 Produção Localizada com Uso da Energia de Rede Barata, Confiável e Renovável

Para uma siderurgia próxima a zero carbono nas emissões é fundamental dispor de uma eletricidade acessível, confiável e totalmente renovável. Para explorar a viabilidade de potenciais futuros sistemas de produção de energia, a produção de aço via H₂-DRI-EAF, usando tanto a energia renovável isolada (carga variável) quanto sistemas de energia de rede (carga contínua), foi comparada à rota convencional (AF+AC). Os resultados referentes aos custos e às emissões são mostrados nas Figuras 15 e 16. [6]

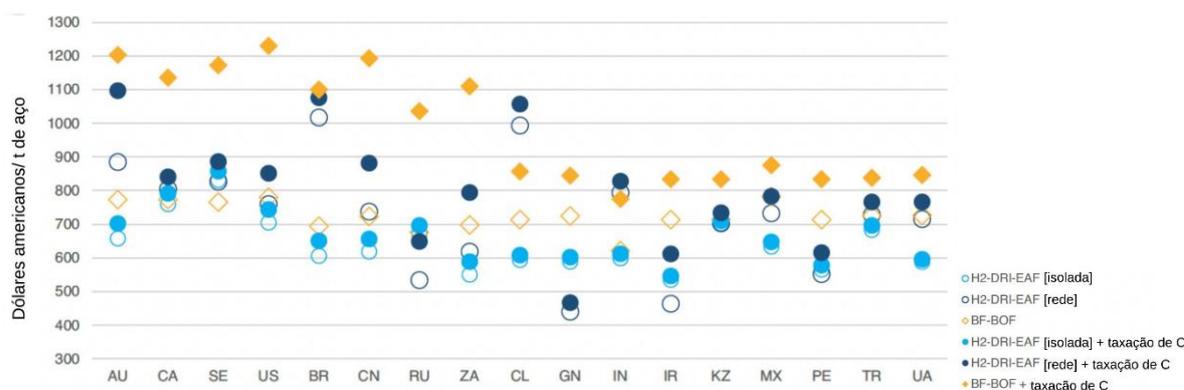


Figura 15 - Comparação entre os custos de produção do aço baseado na rota fóssil convencional e na nova rota com H₂ verde (projetos instalados em 2050, sem carregamento de sucata). Os custos nivelados do aço estão projetados com e sem taxa de carbono para os 17 países analisados.

Fonte: [6].

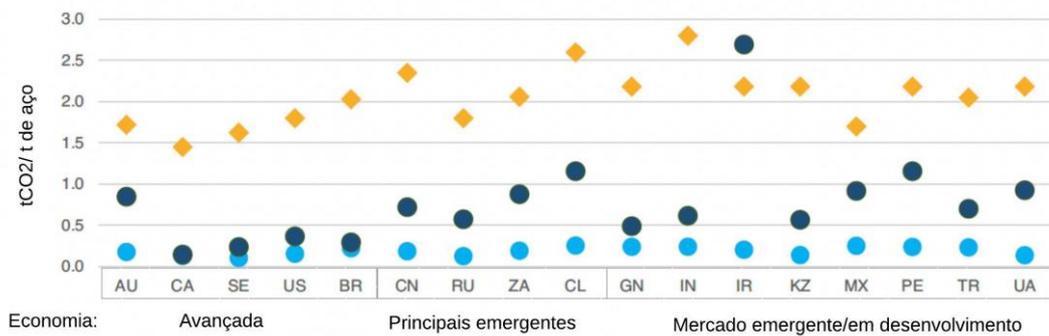


Figura 16 - Comparação entre as emissões de produção do aço baseado na rota fóssil convencional e na nova rota com H₂ verde (projetos instalados em 2050, sem carregamento de sucata). São mostradas as intensidades de emissões de CO₂ onde a rota H₂-DRI-EAF é modelada com sistema isolado de energia renovável de carga variável e com sistema de energia conectada à rede de carga contínua. A análise é feita para os 17 países já mencionados.

Fonte: [6].

Diferentemente do sistema isolado, os custos de geração de energia do sistema de rede para 2030 e 2050 são de difícil estimativa, portanto tarifas atuais de eletricidade industrial foram utilizadas para indicar o custo da energia pelo sistema de rede, o qual varia significativamente de \$169/MWh no Brasil a \$41/MWh na Rússia, refletindo as políticas e mixes de energia nacionais em vigor. Por volta de 2050, foi projetado que, em 7 dos 17 países produtores de minério de ferro estudados, ao menos uma das duas opções de produção de aço baseada em H₂ verde (energia isolada ou de rede) se tornaria competitiva com a rota convencional (AF-AC), mesmo sem taxaço de carbono. Seis países foram classificados para produzir aço baseado em H₂ verde usando o sistema de energia movido pela rede em 2050 como opção mais barata (Guiné, Irã, Cazaquistão, Peru, Rússia e Suécia), entretanto, quando são levados em conta os preços de carbono, a produção via rede permanece mais barata em apenas dois países, Rússia e Guiné. A vantagem que geralmente aparece para o sistema isolado de energia renovável frente ao sistema de energia de rede se deve a dois fatores principais: o custo de produção da energia renovável foi favorável em comparação aos preços de energia da rede e devido à alta participação de combustíveis fósseis em muitas redes nacionais, o que resulta em mais emissões e, portanto, custos significativos em penalidades por taxaço de carbono. O caso mais proeminente foi aquele projetado para o Irã, como se pode ver na figura 16, que depende de eletricidade movida a gás, onde mesmo em 2050 a intensidade de emissões da rota verde com uso da energia de rede foi maior que a da rota convencional (AF-AC), ficando em 2,7tCO₂/t de aço, enquanto a média para

todos os outros países em 2050 foi de 0,7tCO₂/t de aço. Por outro lado, sistemas com base na energia de rede no Canadá e Suécia (seguida de perto por Brasil) podem emitir apenas 0,2tCO₂/t de aço em 2030, isso devido às suas carteiras de rede com substancial participação de energia hidrelétrica e nuclear. Isso já é comparável ao sistema isolado de energias renováveis que tem intensidade de emissões na faixa de 0,1-0,3tCO₂/t de aço em todos os casos, considerando-se o carbono incorporado dentro de painéis solares e turbinas eólicas. [6]

Quanto aos custos, a competitividade da produção de aço verde via rota H₂-DRI-EAF depende de energia barata e livre de CO₂, onde a variedade de recursos é gerenciada. Enquanto apenas recursos solares e eólicos foram investigados, outras fontes de eletricidade estável e limpa (ex.: hidrelétrica) são ideais para uma produção de aço com intenso consumo de eletricidade. Se uma rede dominada por energias renováveis pudesse ser garantida para alimentar a produção de aço via H₂-DRI-EAF, um preço médio global de eletricidade de \$80, \$70 e \$60/MWh seria necessário para os anos de 2030, 2040 e 2050, respectivamente, para igualar os custos nivelados de aço (sem taxaço de carbono) nos sistemas isolado e de rede. Em 2050, os maiores distanciamentos entre a produção de aço via energia da rede e energia renovável isolada e, portanto, entre as atuais tarifas de eletricidade industrial e aquelas necessárias para uma siderurgia competitiva via H₂-DRI-EAF com uso da rede, foram observadas no Brasil, Chile e Austrália. Nestes países, sistemas isolados de ER (solar e eólica) podem ser mais efetivos que sistemas de uso de rede, visto que os primeiros emitem menos e são mais baratos. [6]

4.2.4 Potencial Global da Siderurgia Baseada em H₂ Verde

Os modelos obtidos por *machine learning* possibilitaram o desenvolvimento de uma visão global do potencial da produção de aço baseada em H₂ verde, como se pode ver na Figura 17. [6]

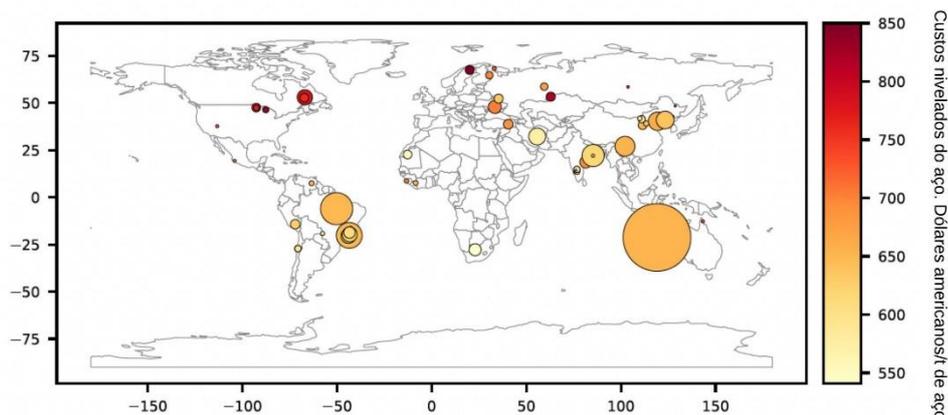


Figura 17 - Custos globais da siderurgia H₂-DRI-EAF projetados por machine learning usando sistemas isolados de energia solar e/ou eólica (projetos instalados em 2050, sem carregamento de sucata). São apresentados os custos nivelados de aço, incluindo o minério.

Fonte: [6].

Os resultados mostraram que as localidades favoráveis estavam localizadas ao longo do trópico de Capricórnio (+23,5° de latitude) e do trópico de Câncer (-23,5° de latitude) onde a radiação solar intensa é prontamente acessível. Aglomerados competitivos na siderurgia baseada em H₂ verde foram encontrados no norte e sul da África, região central da América do Sul, Ásia Central e Austrália. Recursos solares abundantes e pouco variáveis foram mais importantes que os eólicos para o estabelecimento de uma planta siderúrgica do tipo H₂-DRI-EAF efetiva em custos, o vento desempenhou mais um papel de complementariedade na geração de ER. [6]

4.3 CAMINHOS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA

A transformação de setores que consomem energia de fontes fósseis para energia de fontes limpas e renováveis é um dos principais desafios e oportunidades da transição energética do Brasil e passo fundamental para reduzir as emissões e pegadas de carbono. A indústria de ferro e aço é a maior emissora de CO₂ do setor industrial brasileiro. A produção de uma tonelada de aço emite 1,5 tCO₂, menos que a média de países produtores significantes (2tCO₂/t aço), mas ainda assim o setor de aço brasileiro precisa reduzir suas emissões para competir num mercado global descarbonizado. Como visto anteriormente, o Brasil possui importantes vantagens neste quesito: primeiro, é bem servido com reservas substanciais de minério de ferro, o que o coloca como o segundo maior exportador de minério de ferro do mundo, segundo, possui abundância em fontes de energia renovável, biomassa e

água, que possibilitam a produção de um aço neutro em carbono a custos significativamente mais baixos que outras regiões. [8]

4.3.1 O Cenário Nacional de Produção de Aço

O Brasil é o nono maior produtor de aço do mundo e o maior da América Latina. A produção está distribuída em 10 estados, mas concentrada principalmente em: Minas Gerais (31%), Rio de Janeiro (29%), e Espírito Santo (17%), na região sudeste do país [14, 15]. Existem 12 grupos empresariais no país, mas 90% da produção vem de 6 companhias: ArcelorMittal, Gerdau, Ternium, CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), Usiminas, e CSP (Companhia Siderúrgica do Pecém). A Figura 18 mostra um mapa das partes interessadas (*stakeholders*) da indústria de ferro e aço no país. [8]

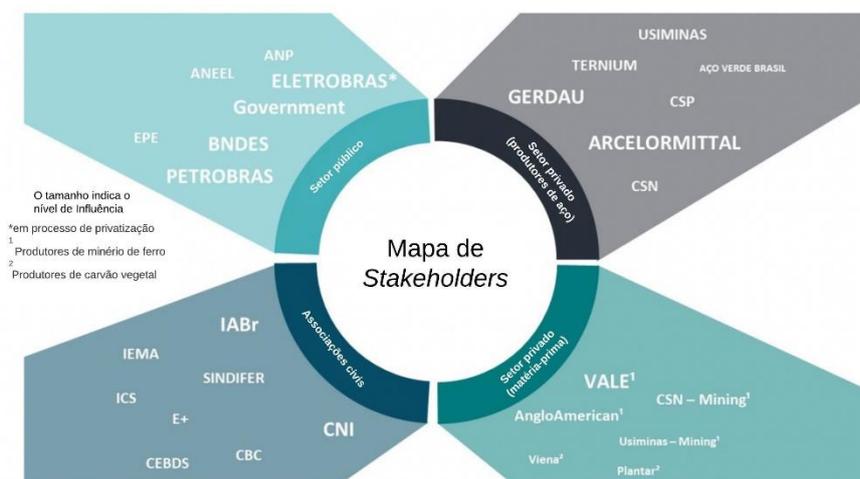


Figura 18 - Principais agentes e interessados do setor siderúrgico brasileiro.

Fonte: Adaptada de [8].

O Brasil possui experiência no uso de carvão vegetal nos processos de produção e políticas para atenuar as emissões em GEE têm sido focadas no uso do carvão vegetal nos altos-fornos, porém devido às desvantagens da sua produção, medidas foram implementadas para combater o uso de carvão vegetal não sustentável na indústria siderúrgica, coibindo práticas ilegais. A seguir são apresentados os principais agentes da cadeia produtiva do aço baseada em carvão vegetal no Brasil. [8]

4.3.1.1 Principais Produtores de Aço e Minério de Ferro

Os maiores produtores de aço são ArcelorMittal e Gerdau, respondendo por quase 50% da produção no setor. São seguidos por CSN, Ternium, CSP, Usiminas. A Aço Verde Brasil foi considerada uma importante agente devido à sua posição de vanguarda como a 1ª companhia siderúrgica neutra em carbono (Tabela 5). [8]

Tabela 5 - Maiores produtores nacionais de aço

ARCELORMITTAL	GERDAU	TERNIUM/CSN/CSP/ USIMINAS	AÇO VERDE BRASIL (AVB)
Detém 28% da produção nacional	Detém 20% da produção nacional	Cerca de 10% da produção nacional cada uma	Aço Verde Brasil: 1,7% da produção nacional
Produção baseada em carvão, carvão vegetal e eletricidade	Produção baseada em carvão, carvão vegetal e eletricidade	Produção baseada em carvão	Primeiro produtor de aço no mundo com produção neutra em carbono
Mundialmente: a cia. está investindo em tecnologias de baixa emissão em carbono (ex.:DRI)	Aço de baixa emissão em carbono: (0,93tCO ₂ /taço-global)	Ternium: Ternium e Vale assinaram um acordo visando tecnologias para redução de ferro (ex.: Tecnoled, HYL)	
Pontos de pressão/dificuldade: disponibilidade de carvão vegetal; preços da eletricidade; disponibilidade de sucata	Pontos de pressão/dificuldade: disponibilidade de carvão vegetal; preços da eletricidade; disponibilidade de sucata	Pontos de pressão/dificuldade: emissão difícil de reduzir; preços dos combustíveis fósseis	

Fonte: Adaptada de [8].

Com respeito à silvicultura e processos de carbonização, uma grande parte da produção de florestas de eucaliptos e produção de carvão vegetal (que usa o processo de carbonização) é realizada pelas próprias companhias de aço. Os principais problemas para produtores primários de aço que se utilizam de carvão vegetal surgem justamente com a descarbonização da indústria siderúrgica mundial e suas consequências para o Brasil. Os principais riscos apontados para esta transição são: preços dos combustíveis para a transição energética (gás natural, carvão vegetal, eletricidade, hidrogênio); disponibilidade de combustíveis de baixas emissões em carbono (gás natural e carvão vegetal); infraestrutura para gás natural e hidrogênio; disponibilidade de sucata. [8]

Quanto à produção de minério de ferro, a Vale é a maior produtora do Brasil e uma das maiores produtoras do mundo (Tabela 6). [8]

Tabela 6 - Maiores produtoras de minério de ferro no Brasil

VALE	CSN Mineração/ AngloAmerican/Usiminas
<p>Maior produtora de minério de ferro do Brasil e uma das maiores do mundo</p> <p>72% da produção de minério de ferro no Brasil</p> <p>Exportadora de minerais</p> <p>Possibilidades como produtora DRI (ferro reduzido de forma direta) [16]</p> <p>Ternium e Vale assinaram um acordo visando tecnologias para redução de ferro (ex.: TecnoRed, HYL)</p> <p>Pontos de pressão: impactos ambientais e regulamentação</p>	<p>Juntas, elas respondem por 20% da produção de minério de ferro no Brasil</p> <p>Pontos de pressão: impactos ambientais e regulamentação</p>

Fonte: Adaptada de [8].

Minas Gerais é um Estado que possui abundância histórica de minério de ferro, no entanto, importantes mudanças têm sido observadas na qualidade do minério de ferro extraído em Minas Gerais comparado ao do Estado do Pará. De acordo com a Vale, o minério encontrado em Carajás-PA é considerado o minério de maior qualidade do planeta, já que as rochas contêm, em média, um teor de 67% de ferro [17]. Quanto a Minas Gerais, sendo o Estado com o histórico mais longo de extração mineral no país, já observa a escassez de reservas de minério de ferro de qualidade superior, como reservas de hematita, o que tem contribuído para pesquisas de tecnologias que usam minérios de ferro de baixo teor, como os minérios de itabirito (teor de ferro menor que 62%). [8, 18]

4.3.1.2 Setor Público: Níveis Governamental e Regulatório

Os principais agentes no setor público incluem: o governo executivo (e seus ministros); o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES); companhias públicas de energia como a Petrobras e Eletrobras (em processo de privatização); agências regulatórias (ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica e a ANP- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e a EPE- Empresa de Pesquisa Energética. [8]

A lista a seguir resume as principais atribuições de cada agente público citado: (a) Governo- o governo tem o poder de criar a precificação de carbono, estabelecer seu preço ou licenças de emissão; o Ministério de Ciência e Tecnologia tem dentre suas competências a implementação de políticas nacionais para pesquisas científicas e tecnológicas e o encorajamento da inovação [19]; o Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Economia, Ministério da Agricultura, Ministério de Minas e Energia podem criar políticas com respeito aos recursos minerais e

energéticos [19]. (b) BNDES- um dos maiores bancos de desenvolvimento do mundo; principal instrumento do governo federal para financiamentos e investimentos de longo prazo em todos os segmentos da economia brasileira [20]. (c) Petrobras- é uma das maiores produtoras de óleo e gás do mundo [21]; há uma oportunidade econômica e ambiental para se usar gás natural no setor siderúrgico, sendo que as principais dificuldades residem na infraestrutura do gás natural e regulamentação ambiental. (d) Eletrobras- uma empresa de capital aberto em processo de privatização; é a maior companhia de geração de energia elétrica no Brasil (1/3 da capacidade total instalada no país); mais de 90% da capacidade instalada vem de fontes com baixas emissões de GEE [22]; pode ser um agente importante com o aumento do uso de eletricidade na produção de aço e na produção de hidrogênio verde. (e) ANEEL e ANP- a ANEEL é a agência regulatória do setor energético e a ANP providencia a regulação, contratação e inspeção das atividades econômicas que fazem parte da indústria de óleo. (f) EPE- presta serviços ao Ministério de Minas e Energia em estudos e pesquisas projetados para dar suporte ao planejamento do setor de energia [8,19].

4.3.1.3 Organizações da Sociedade Civil

Para conhecimento são citadas algumas das organizações civis que se relacionam com o setor do aço oferecendo conhecimento que auxilia na transição para uma economia de baixo carbono: (a) ICS-Instituto Clima e Sociedade; (b) Instituto E + Transição Energética; (c) CBC-Centro Brasil no Clima; (d) IEMA-Instituto de Energia e Meio Ambiente; (e) CEBDS-Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. [8]

4.3.1.4 Carvão Vegetal na Siderurgia Brasileira

A indústria brasileira sempre se baseou fortemente em energia renovável, principalmente carvão vegetal e outras fontes de biomassa [23]. Como resultado da produção de aço, o país se tornou o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo [24]. A cadeia de produção de aço baseada em carvão vegetal pode ser caracterizada por três processos gerais: (i) a produção de biomassa renovável, principalmente florestas plantadas de eucaliptos; (ii) transformação da biomassa em carvão vegetal renovável, através de processos de carbonização em diferentes tipos de fornos e (iii) o uso do carvão vegetal como agente redutor ou termo redutor no

processo de manufatura de ferro-gusa, ligas ferrosas ou aço, nas suas mais variadas formas. Em termos de uso industrial, uma grande parte da produção de aço a carvão vegetal é concentrada nos segmentos de ferro gusa e ferroligas, cuja produção não é vertical, ou seja, não é integrada fisicamente com a produção de aço e geralmente é baseada em fornos de escala menor em comparação à indústria de aço baseada em carvão. Entretanto, uma fração relevante da produção de aço ocorre em plantas integradas ou semi-integradas, que produzem ferro gusa como matéria-prima para a produção de aço em processos verticais. Em geral, o uso de carvão vegetal nunca excedeu a proporção de 25% da capacidade total de produção de ferro-gusa no Brasil (32 milhões de toneladas em 2020). No entanto, durante a recessão econômica de 2015-2018, a participação total do carvão vegetal diminuiu a 20% do total de ferro-gusa produzido. No período mais recente de pós pandemia, foi observada a recuperação da cadeia produtiva, relacionada à recuperação geral do setor siderúrgico, que foi conduzida por segmentos como construção civil, indústria automotiva e outros (Figura 19). [8]

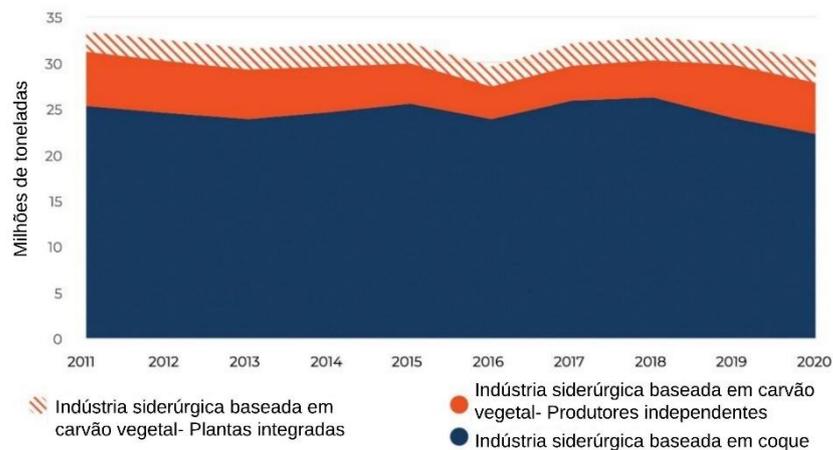


Figura 19 - Produção total de ferro gusa no Brasil.

Fonte: Adaptada de [8, 25].

A siderurgia baseada em carvão vegetal pode ser vista como uma alternativa de alto potencial, especialmente para o Brasil, que faz parte de um portfólio de soluções de nível global. Ainda assim, alguns aspectos podem dificultar a expansão da siderurgia a carvão vegetal no país. [8]

4.3.1.5 Principais Barreiras ao Aumento do Uso de Carvão Vegetal

Há limites tecnológicos e diversas barreiras à expansão da siderurgia baseada em carvão vegetal. Em relação à produção de aço, a resistência mecânica mais baixa do carvão vegetal comparado ao coque torna inviável o uso em parte dos grandes altos-fornos. Entre outros fatores, isto torna impossível substituir o uso de coque em todas as plantas existentes. [8]

Em geral, o principal desafio a esta expansão se deve ao longo ciclo da cadeia produtiva comparado a outros investimentos ou entradas. Em média, o ciclo do eucalipto no Brasil dura sete anos. Assim, é necessário se investir grandes quantias de dinheiro em aquisição ou arrendamento de terra, na execução e gerenciamento das plantações e em todos os aspectos associados ao uso da terra, incluindo longos processos de licença ambiental, para que do sétimo ano em diante, a área possa ser colhida e o carvão vegetal produzido até o décimo quarto ano, quando a última plantação é amortizada (realizada no ano 7, se a companhia planta quantidades constantes). A companhia poderia optar por comprar madeira no mercado e não internalizar todo o processo, entretanto embora um mercado madeireiro independente tenha avançado no Brasil nos últimos anos, ainda não há disponibilidade de florestas para completa terceirização, em adição a isso há os desafios associados à previsibilidade e estabilidade da oferta. Quando esta lógica é comparada ao uso do carvão coque, por exemplo, a diferença se torna evidente. Carvão é um dos recursos fósseis mais disponíveis no mundo. Embora o Brasil não seja o maior produtor de carvão, ele pode ser facilmente importado de países como China, Austrália e África do Sul e frequentemente, quando importam, companhias podem fazer um avanço no contrato de câmbio, que permite o pagamento da matéria-prima após a produção e venda do produto final de aço, o que é, uma lógica temporal inversa àquela do carvão vegetal. Assim, os custos transacionais associados ao carvão vegetal e, especialmente, a necessidade de uma grande imobilização de capital por longos períodos torna as decisões sobre investimentos relativamente mais complexas e arriscadas em comparação ao uso de coque. [8]

Em adição a este desafio estrutural, uma série de outras barreiras precisam ser transpostas para aumentar a participação do carvão vegetal na produção de aço no Brasil, dentre as quais pode se mencionar a falta de disponibilidade para financiamento com um período de carência com juros e políticas de garantia

adequadas ao ciclo de eucalipto, que varia de 7 a 14 anos; a necessidade de melhoria em infraestrutura e logística que permitam aumentar o alcance de polos de desenvolvimento florestal; termos mais longos de licença ambiental relacionados ao uso da terra; investimentos para melhorar o uso de processos de carbonização de madeira e exploração de subprodutos, incluindo cogeração de energia e bio-óleos; uma maior engajamento dentro da cadeia produtiva florestal, que permita otimizar a disponibilidade de madeira e o custo de capital envolvido no uso da terra, entre outras. Neste contexto, o mercado e taxaço de carbono e instrumentos de financiamento do mercado verde podem ser de importância crescente para a indústria siderúrgica baseada em carvão vegetal devido aos seus grandes potenciais de mitigação e os vários compromissos nacionais e globais para alcançar uma economia neutra em carbono até 2050. [8]

4.3.1.6 O Potencial de Mitigação

No processo de carbonização da madeira, a emissão de CO₂ é neutra, uma vez que o carbono emitido provém de madeira plantada que anteriormente já removeu CO₂ da atmosfera, no entanto há ainda emissões de metano CH₄. [8]

Já no processo industrial, para cada tonelada de metal aquecido (ferro-gusa, ligas de ferro, aço) produzido com carvão vegetal ao invés de carvão coque, aproximadamente 1,25 tCO_{2eq} (tonelada de CO₂ equivalente) é evitada. Este é o efeito direto de se utilizar um agente redutor renovável no lugar de um agente de fonte fóssil (carvão coque), que é a fonte predominante no setor de aço global. [26]

Assim, apesar das barreiras e limitações, o uso do carvão vegetal renovável promove um grande efeito mitigador. [8]

4.3.2 Políticas de Descarbonização do Setor Siderúrgico Brasileiro

4.3.2.1 Nível Nacional

Com o objetivo de reduzir as emissões de GEE, o Brasil ratificou em 2016 o Acordo de Paris e submeteu metas de redução de emissão chamadas de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC-*Nationally Determined Contribution*). A NDC brasileira estabelece que o Brasil deve reduzir suas emissões em 37% até 2025 e 43% até 2030, em relação às emissões de 2005. Em 2021, o Brasil se comprometeu ainda a ampliar sua meta para 50% de redução até 2030 e alcançar emissões líquidas neutras até 2050, ou seja, tudo o que o país emitir deverá ser

recompensado com fontes de captura de carbono, como o plantio de florestas, recuperação de biomas ou outras tecnologias. [27]

Embora nenhuma dessas publicações tenha mencionado especificamente o setor siderúrgico brasileiro, foi citada a adoção de medidas de mitigação para o setor industrial como um todo: desenvolvimento de uma estrutura de baixo carbono, novos padrões de tecnologia limpa, e melhoras na eficiência energética. [8]

O governo federal tem tomado algumas iniciativas para reduzir as emissões de GEE no setor de aço, focando principalmente o aumento do uso de carvão vegetal. Em 2008, por exemplo, foi liberado o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, cujo objetivo era aumentar o uso de carvão vegetal sustentável para substituir o carvão coque nas plantas siderúrgicas, principalmente por meio do encorajamento de reflorestamento em áreas degradadas. [8]

Em 2014, o Projeto de Aço Sustentável foi aprovado, visando a redução das emissões de GEE em Minas Gerais (Estado piloto) através da produção de aço com uso de carvão vegetal a um custo competitivo e estabelecimento de uma estrutura legal [28]. Já em 2018, o relatório Mudança do Clima e Indústria Brasileira foi publicado e analisou o setor de aço brasileiro recomendando diversas medidas, incluindo a substituição do carvão por carvão vegetal, aumento da eficiência energética, expansão do uso de sucata, e adoção de inovações tecnológicas disruptivas. [8, 29]

4.3.2.2 Nível Estadual

Em termos de descarbonização a nível estadual, os Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, São Paulo, Pará, Maranhão, Pernambuco, Paraná, e Mato Grosso do Sul aderiram à campanha da ONU intitulada "Corrida para o Zero" ("*Race to Zero*"). Esta campanha tem como meta alcançar a neutralidade em emissões de GEE em 2050 e abrange diversas outras regiões pelo mundo. É digno de nota que, considerando os Estados produtores de aço, apenas o Ceará e o Rio Grande do Sul ainda não aderiram à campanha. [8]

4.3.2.3 Nível Empresarial

A indústria siderúrgica brasileira tem adotado gradualmente mais medidas sustentáveis em sua produção sendo impulsionada pela tendência global de descarbonização, pelos esforços de multinacionais em território brasileiro e pelas

influências de associações industriais. Entre 2018 e 2020, a indústria de aço brasileira investiu aproximadamente 2,6 bilhões de reais em medidas visando reduzir as emissões de GEE e promover a sustentabilidade. [14]

No Brasil, a ArcelorMittal se comprometeu a reduzir as emissões em 10% até 2030 para alcançar a meta de neutralidade climática global da companhia em 2050. As medidas seguintes foram planejadas como uma estratégia para atingir esta redução: expandir o uso de sucata; aumentar o uso de gás natural; e otimizar o uso de carvão vegetal em unidades que já utilizam este combustível. [30]

Gerdau, o segundo maior produtor de aço do Brasil, ainda não estabeleceu metas de redução a médio e longo prazo, mas possui uma baixa intensidade de emissão de CO₂ por aço produzido (0,93tCO₂ /t de aço) quando comparado à média global. Isso se deve principalmente ao uso de sucata (73% do aço produzido pela companhia mundialmente usa sucata em seus processos), carvão vegetal, e eficiência energética. [31]

A Ternium estabeleceu uma meta de descarbonização para 2030: uma redução de 20% nas emissões por tonelada de aço produzido, usando o ano 2018 como linha de base. As atividades seguintes deverão ser desenvolvidas para atingir este objetivo: aumentar o uso de sucata e a participação de fontes de energia renováveis no processo de produção, substituição parcial de carvão por carvão vegetal, aumentar a eficiência energética, adoção de tecnologias mais limpas, e colaboração com fornecedores de matérias-primas para reduzir as emissões de processos [32]. Somado a isso, em 2021, as companhias Ternium e Vale assinaram um acordo para realizar estudos de viabilidade econômica como parte de suas estratégias de redução de emissões. Estes estudos focam em tecnologias para redução direta do minério de ferro. [33]

Outro destaque é a Aço Verde Brasil, o primeiro produtor de aço no mundo com produção neutra em carbono. A neutralidade foi alcançada usando carvão vegetal reflorestado pela companhia, pelo uso de gases de processo e reutilização de resíduos sólidos. [14]

Com respeito à produção de minério, a Vale planeja reduzir as emissões absolutas de escopos 1 e 2 (emissões diretas e indiretas) em 33% até 2030 e reduzir em 15% as emissões líquidas (GEE que são removidos da atmosfera pela vegetação) de escopo 3 (emissões da cadeia de valor) até 2035, além de tornar-se

uma mineradora neutra em carbono até 2050. Além disso, planejam consumir 100% de energia elétrica a partir de fontes renováveis até 2025 no Brasil. [34]

4.3.3 Principais Tecnologias Sustentáveis e Vantagens Competitivas do Brasil na Siderurgia

Em termos de eficiência energética e de emissões, a siderurgia brasileira se encontra um passo à frente dos produtores líderes. No entanto, para cumprir o acordo de Paris, um esforço maior será exigido do setor. As tecnologias aqui discutidas são aquelas frequentemente mencionadas nas rotas de descarbonização e que já foram abordadas ao longo deste trabalho, o diferencial é que esta seção apresenta as medidas de mitigação analisadas sob uma perspectiva nacional. [8]

Inicialmente, serão analisadas medidas de mitigação que podem ser aplicadas às tecnologias convencionais tais como eficiência energética, o uso do carvão vegetal como agente redutor, e forno a arco elétrico. Em seguida, tecnologias alternativas são discutidas sob um ponto de vista nacional e é importante mencionar que, até o presente momento, há uma escassez de estudos investigando o impacto de tecnologias alternativas na descarbonização da siderurgia brasileira. [8]

4.3.3.1 Eficiência Energética

Este termo se refere a uma série de medidas para baixar o consumo de energia na produção de aço. O consumo de energia brasileiro no setor é de 20,9 GJ/t de aço, cerca de 10% a mais que a média mundial (18,6 JG/t de aço). [3]

A produção nacional usando a rota convencional AF-AC (alto-forno e aciaria a oxigênio) tem um consumo energético de 18,6 JG/t de aço quando se considera a produção com carvão e de 23,4 JG/t de aço usando o carvão vegetal. [35]

Com respeito à segunda maior rota, a do forno a arco elétrico, o Brasil tem o segundo menor consumo energético dentre os dez maiores produtores. [36]

Alguns estudos investigaram a possibilidade de se reduzir o consumo de energia e de emissões por meio da adoção de medidas de eficiência energética. Segundo [35], existe um potencial de 23% na redução do consumo de energia para produção do ferro gusa e de 10% na produção de aço. De acordo com [37], medidas de eficiência energética podem cortar 16% das emissões da siderurgia brasileira projetadas para 2050 [8]. Como se nota e conforme já dito em outras seções prévias, trata-se de uma medida que pode ser utilizada para reduzir as emissões em

curto prazo, mas que é por si só insuficiente para descarbonizar a siderurgia brasileira segundo as metas estabelecidas em acordos firmados pelo Brasil.

4.3.3.2 Forno a Arco Elétrico

A curto prazo, aumentar a produção de sucata para aplicações em FAE podem gerar resultados muito benéficos. O consumo de energia desta tecnologia é consideravelmente inferior àquele da rota convencional AF-AC, assim como suas emissões (0,7 versus 2,3 tCO₂/t de aço). [3]

Cerca de 25% da produção de aço no Brasil se origina de sucata, enquanto países como EUA, Índia e México possuem participações superiores a 50%. O Brasil tem o potencial para aumentar sua produção de aço por FAE e esta medida ajudaria a cortar emissões da indústria em cerca de 36% até 2050 [38]. Até 2030, 13,4% das emissões poderiam ser reduzidas. [8]

A produção de aço por meio do FAE é uma das opções disponíveis mais efetivas quanto aos custos. A oferta de metais responde por 70% do custo total da produção por FAE. Como a indústria brasileira tem o terceiro menor custo de suprimento de metais, o Brasil possui o quarto menor custo de produção de aços longos em comparação aos maiores produtores de aço [39]. Existem duas grandes preocupações com respeito a esta produção: o custo da eletricidade e a disponibilidade de sucata [38].

4.3.3.3 Gás Natural e Tecnologias de Redução Direta

Uma das tecnologias mais promissoras com respeito à transição da indústria siderúrgica é a redução direta usando gás natural (GN). Sua aplicação na siderurgia brasileira pode desempenhar um importante papel até 2050. O gás natural pode ser injetado no alto-forno diminuindo o consumo de energia do processo AF-AC ou ser usado como um agente redutor no processo DRI (*Direct Reduced Iron*). [8, 37]

No Brasil ainda não há estudos publicados com respeito ao seu potencial de mitigação e custos. A tecnologia DRI, por sua vez, já está disponível e sendo testada em muitos países, como já visto. Segundo [3], em 2050 a participação global da DRI na produção de aço terá aumentado de 5% a 20-25%. [3, 8]

Uma das principais razões pela qual o GN poderia ser uma boa opção para reduzir as emissões na siderurgia brasileira é que sua oferta deve aumentar nos próximos anos, principalmente devido à produção associada ao pré-sal. Além do

aumento na oferta de GN, uma regulamentação promovendo a competitividade do mercado de gás natural foi aprovada pelo congresso [27]. A nova lei visa melhorar a eficiência de mercado do GN, competitividade e rede de transportes, enquanto também diminui os preços. Esta combinação pode criar um solo fértil para projetos usando GN. Estas características colocam a RD-GN (redução direta via gás natural) como uma opção para reduzir as emissões na indústria de aço. Futuramente, o GN pode ser substituído por hidrogênio, alcançando assim reduções ainda maiores. [8]

Uma das maiores preocupações em se produzir aço segundo esta tecnologia é o custo do GN. O Brasil tem um dos custos mais altos do mundo. Entre 30 países analisados, Brasil possui o 3º maior preço (10,5 USD/BTU), depois da Finlândia (13,6 USD/BTU) e da Suécia (11,3 USD/BTU), onde BTU é a Unidade Térmica Britânica, uma unidade de potência equivalente a 0,2929 W. Isto pode ser explicado em parte pelo alto custo de extração e em parte pelos altos impostos cobrados pelo combustível. O Brasil tem o 2º maior imposto de GN, cerca de 24% do preço é pago pelos consumidores [8, 40]. É importante notar que biogás e biometano podem ser usados em substituição ao GN no processo de produção e esta troca auxilia na redução da intensidade de emissões do processo. Tem-se o ex. da Ternium que substituiu 30% do consumo de GN por biometano em 2019. Porém, o aumento da participação do biogás e biometano pode ser impedido pela falta de oferta. [8, 33]

4.3.3.4 Hidrogênio e Tecnologia de Redução Direta (HDRI)

Como já visto neste trabalho, o hidrogênio pode agir como um redutor na redução direta do minério de ferro, em substituição parcial ou em até 100% da matéria-prima em algumas tecnologias. [8, 41]

Por não existir nenhum estudo específico sobre o uso do hidrogênio pela indústria brasileira ainda não é possível providenciar dados sobre o potencial de mitigação e custos sob uma perspectiva nacional. Entretanto, o papel que o hidrogênio pode desempenhar na indústria siderúrgica brasileira pode ser compreendido ao se olhar para as vantagens e necessidades do país, o que se fará no tópico seguinte [8]. Um pouco disso também já foi discutido no tópico que trata da produção de aço via rota DRI-EAF baseada em H₂ verde levando-se em conta os depósitos de minério e as fontes de energias renováveis no Brasil, categorizando-o como uma localidade ideal.

4.3.3.4.1 Vantagens Competitivas

O fornecimento de eletricidade oriunda de fontes mais limpas é importante para a produção de hidrogênio limpo, por ex., energia hidrelétrica e eólica. A geração de eletricidade brasileira é uma das mais limpas do mundo, sendo que 83% da geração de eletricidade vem de fontes renováveis (65% energia hidrelétrica e 8% energia eólica). Isto resulta em um-terço da intensidade média de emissão dos países do G20 (cerca de 100gCO₂/KWh vs. 500g CO₂/KWh) [42]. Além disso, o Brasil tem a possibilidade de produzir hidrogênio usando biocombustíveis (etanol e biogás, por ex.) e transportá-lo através da infraestrutura existente para o GN, mencionada no Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂). [43]

Como se sabe, outra importante fonte natural para a produção de hidrogênio é a água. A produção de 1 Kg de H₂ consome entre 9-15 litros de água. Se o Brasil produzir todo o hidrogênio necessário para atingir a demanda da Alemanha em 2030, ele alcançará apenas 0,02% do consumo atual de água. Entretanto, o Brasil ocupa a posição 116 entre os países com risco de estresse hídrico, com regiões específicas com alto risco como a Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte. [44, 45]

O Brasil pode ter um dos custos mais baixos para a produção de H₂. Um estudo publicado em 2021 reporta que o custo de produção do H₂ em 2030 será em torno de 1,50 USD/KgH₂ para o Brasil, mais baixo que o dos EUA, China e Alemanha [46]. A BloombergNEF estima que o Brasil terá o custo de produção mais baixo em 2050, cerca de 0,50 USD/KgH₂, como mostra a Figura 20. [47, 48]

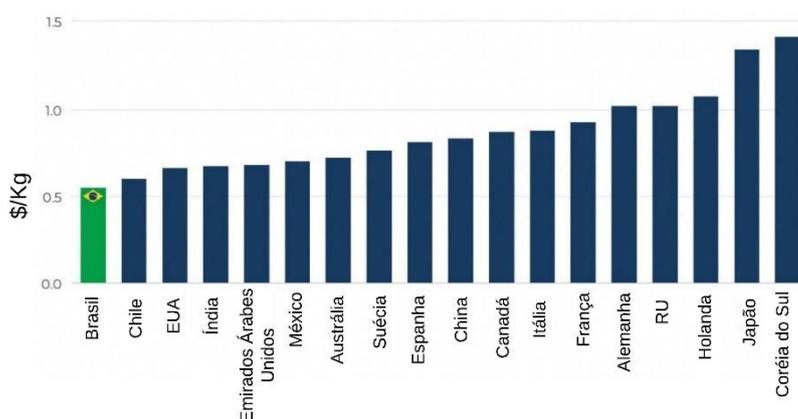


Figura 20 - Custo nivelado médio global da produção de hidrogênio por fontes renováveis em 2050.

Fonte: Adaptada de [8, 48].

4.3.3.4.2 *Desafios e Riscos*

Os principais desafios para a produção de hidrogênio no Brasil estão relacionados à necessidade de infraestrutura para transporte e armazenamento. Devido à sua baixa densidade de energia, o transporte através de longas distâncias pode aumentar seus custos. Será preciso um elevado nível de investimentos para possibilitar a indústria do hidrogênio. [46, 49]

Outro desafio importante é o desenvolvimento de regulamentação quanto ao uso do H₂ [46, 49]. Será necessária uma nova e específica regulamentação para transporte, armazenamento e uso. O desenvolvimento de políticas e regulamentações é fundamental para estabelecer a indústria do H₂ no Brasil. [8]

A participação desta tecnologia na rota de descarbonização da indústria siderúrgica depende de certas condições. Como primeiro passo, plantas DRI precisam ser construídas para o uso inicial de GN, mas estarem prontas para a adaptação e operação com participação crescente do hidrogênio. Em paralelo, a eletrólise e infraestrutura para produção e fornecimento de hidrogênio renovável precisa ser desenvolvida com o objetivo de, gradualmente, reduzir os custos da tecnologia e do hidrogênio resultante. O segundo passo refere-se ao custo de produção do hidrogênio verde, que tem que cair consideravelmente a fim de se tornar competitivo (de três a cinco vezes). [8, 30]

4.3.3.5 *Captura e Armazenamento de Carbono*

A captura e armazenamento de carbono (CAC) é uma tecnologia chave para zerar as emissões líquidas [30, 50, 51]. Conforme [50], que analisou o potencial e custos da captura de carbono no Brasil, considerando a estrutura de produção atual, o uso do alto-forno com recuperação de gás do topo (ou superior) associado à captura de carbono faz com que o setor de aço seja capaz de diminuir 54% de suas emissões a um custo de 112USD/tCO₂. [8]

Rotas alternativas de produção também podem se beneficiar da CAC. A tecnologia de redução de fusão (*Smelting Reduction-SR*), produz um gás rico em CO₂, facilitando sua captura e reduzindo os custos de abatimento [41, 52]. Entretanto, as tecnologias SR não deverão estar disponíveis até 2030. [8]

Quando usado em conjunto com o carvão, possui o potencial de reduzir as emissões em até 80%. Quando utilizado com carvão vegetal, as emissões podem ser negativas. [53]

Além disso, redução direta com uso de gás natural pode melhorar sua redução de emissões com uso da CAC. [51]

É importante mencionar que não há nenhum estudo até o momento sobre CAC associada às tecnologias inovativas sob uma perspectiva brasileira. Apesar da importância desta medida de mitigação para a descarbonização da produção de aço, um certo número de pré-requisitos, tais como desenvolvimento de infraestrutura, precisa ser atingido antes que a captura de carbono possa ser considerada uma alternativa viável para a indústria. [8]

4.3.3.6 Compensação das Emissões de GEE

A quantidade de investimentos necessários para se atingir o zero em emissões durante o processo de fabricação de aço pode elevar os custos de produção, resultando em fuga de carbono, que é quando empresas realocam a produção em outros países. Por outro lado, as emissões de aço podem ser compensadas através de florestas plantadas fora dos locais de produção ou dentro de sua própria cadeia de valores. A compensação das emissões de GEE pode ser um instrumento útil para se atingir emissões zero na economia brasileira, uma vez que há um potencial significativo no Brasil, o que aliviaria a pressão sobre os produtores de aço para alcançar uma intensidade de emissões próxima de zero, diminuindo o risco de haver fuga de carbono. No documento "Brasil Carbono Zero em 2060", o Fórum Brasileiro de Mudança do Clima examinou as perspectivas para se atingir emissões líquidas iguais a zero em 2060. A restauração da floresta nativa, bem como da floresta plantada, pode mitigar mais de 1,0 MtCO₂-eq, cinco vezes mais que as emissões projetadas para toda a indústria no mesmo ano. [8, 54]

4.3.3.7 Produção de Aço por Eletrólise

A geração de eletricidade limpa no Brasil dá uma clara vantagem ao uso da tecnologia de eletrólise de óxido fundido, um processo patenteado pela *Boston Metal*. No entanto, esta tecnologia ainda está em seu início de desenvolvimento e a incerteza a respeito do seu potencial e custos é alta. Assim, é improvável que ela tenha um impacto significativo até 2050. [8]

4.3.4 Desafios Econômicos e de Mercado

Tecnologias de baixo carbono para produção de aço, tais como H-DRI, redução de fusão e CAC, possuem custos mais altos de investimentos do que o método de produção tradicional AF-AC. A redução de intensidade de emissões destas tecnologias pode aumentar seus custos de produção em até duas vezes o custo de produção típico via AF-AC [55]. Isto pode ter um impacto negativo na indústria, uma vez que produtores de aço têm uma baixa lucratividade e operam em mercados extremamente competitivos. Este aumento nos custos de produção pode levar a uma participação reduzida de mercado, além da fuga de carbono. [8]

A parte mais significativa das despesas operacionais na produção de aço se deve ao custo da energia, que representa cerca de 60-80% [3]. As principais tecnologias de redução de emissões focam em gás natural, hidrogênio e biomassa. A tecnologia H-DRI baseada em hidrogênio verde é uma das mais caras, mas que tem um dos potenciais de mitigação mais altos, como já discutido, e os preços da eletricidade podem impactar na descarbonização da siderurgia, uma vez que eletricidade é usada em duas importantes tecnologias: FAE e H-DRI. Assim, conforme já visto, os preços da eletricidade no Brasil devem baixar para a H-DRI se tornar competitiva.

Mudanças climáticas e desmatamento são duas questões importantes que podem impactar os custos da eletricidade. Um estudo [56] identificou que, com a mudança climática, espera-se um aumento no potencial de energia eólica na maior parte do Brasil, e que nas regiões nordeste e sudeste, o potencial de energia solar poderia aumentar modestamente.

4.3.5 Perspectivas para a Produção de "Aço Verde" e Outros Produtos Siderúrgicos Sustentáveis pelo Brasil

4.3.5.1 Projeções de Emissões e de Produção de Aço no Brasil

Poucos estudos têm analisado as projeções das emissões na siderurgia brasileira e o potencial de mitigação dessas emissões. [8]

As emissões industriais podem ser separadas em duas fontes primárias: (i) emissões devido ao processo industrial e ao uso de produtos e (ii) emissões de energia [8]. As indústrias do ferro e do aço são as maiores emissoras de CO₂ do setor industrial brasileiro, respondendo por 30% das emissões totais do setor [57]. A indústria de ferro e de aço é a mais emissiva (44%) quando se considera as

emissões do tipo (i) e a terceira (11%), quando se consideram as emissões de energia no setor industrial, ou seja, emissões tipo (ii) [58]. Ademais, a indústria de ferro e aço responde por 6% do consumo de energia nacional. [59]

Para comparar o quão limpo é o setor em termos de GEE, um dos melhores indicadores é a intensidade de emissões. A produção de aço brasileira emite 1,5 tCO₂/t de aço [57]. Este valor é menor do que a média dos maiores produtores: 2,0 tCO₂/t de aço [36]. Apesar de superar os maiores produtores tais como China e Índia, a indústria de aço brasileira precisa agir, pois o futuro do setor exigirá um aço de baixas emissões a fim de competir no mercado global descarbonizado. [8]

Quanto à produção de aço, o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) em parceria com a ONU projetou um aumento na produção de aço de 34 Mt em 2015 para 67 Mt em 2050 e no cenário de negócios usual, as emissões aumentariam de cerca de 45 Mt de CO₂ em 2015 para quase 90 Mt de CO₂ em 2050 [8, 60]. Um outro estudo realizado [38] projetou um crescimento mais modesto quanto à produção de aço, com 43 Mt de aço (mediana) em 2050. Sem alterações nos processos de produção, as emissões poderiam dobrar em relação ao ano de 2015, atingindo 64 Mt de CO₂ (mediana) em 2050 [8, 38]. Essas projeções estão sumarizadas na Figura 21.

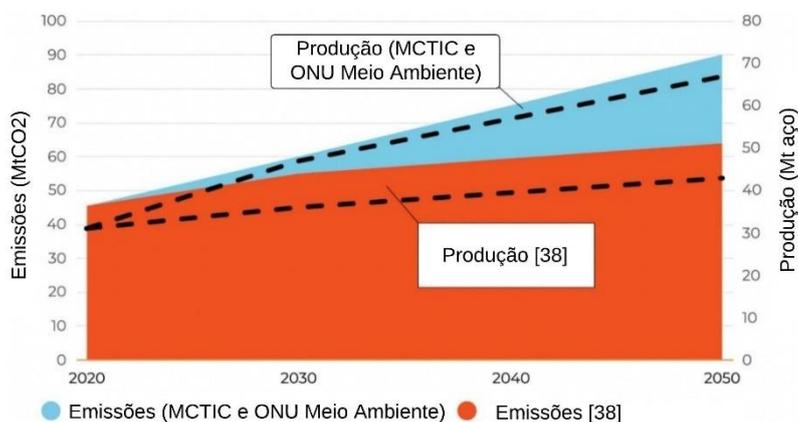


Figura 21 - Projeções de emissões e de produção no Brasil entre 2020 e 2050.

Fonte: Adaptada de [8, 38, 60].

4.3.5.2 Perspectivas Quanto à Adoção de Tecnologias

Como citado, o setor de aço possui uma participação significativa nas emissões industriais globais e, portanto, esforços para promover a rápida descarbonização do setor são necessários. Siderúrgicas possuem de 20 a 30 anos

de vida útil [3, 8]. Isso indica que as plantas em operação atualmente serão desativadas nas próximas décadas e como resultado, o setor de aço precisará de investimentos significantes nos próximos 10 a 15 anos para empregar tecnologias de baixas emissões em substituição à linha de produção atual. A fim de alcançar o desenvolvimento sustentável da indústria de ferro e aço, o governo, as companhias e a sociedade devem trabalhar juntos para propor um financiamento robusto bem como uma estrutura regulatória para o setor. [8]

Como foi visto, a transição para emissões nulas já é um comprometimento dos principais produtores da siderurgia brasileira, mas nem sempre há uma descrição precisa de como seus objetivos serão alcançados. De fato, não há uma solução única para a descarbonização do setor, mas sim uma combinação de tecnologias e iniciativas voltadas às especificidades das regiões onde as indústrias se localizam. A Tabela 7 mostra as principais medidas de mitigação que podem beneficiar o setor, levando em conta o potencial das mesmas em reduzir as emissões, a relevância de seus custos associados, as vantagens do Brasil que podem alavancar a adoção dessas tecnologias nas indústrias do país e o horizonte de tempo no qual a adoção é mais provável de ocorrer. Considerou-se como curto prazo um período de tempo entre 0 e 10 anos, médio prazo entre 10 e 20 anos, e como longo prazo mais de 20 anos. [8]

Tabela 7 - Perspectivas quanto à adoção de tecnologias para a produção ferro e aço no Brasil

Medida de Mitigação	Período de Tempo	Potencial de Mitigação	Custo	Vantagens do Brasil
Eficiência Energética	Curto prazo	Baixo-médio	Baixo-alto	Brasil ainda tem o potencial de reduzir sua intensidade energética
Sucata e FAE	Curto-médio	Médio	Baixo-médio	Geração de eletricidade limpa e competitiva. Disponibilidade de sucata
Carvão Vegetal- AF e Aciaria a Oxigênio	Curto-médio	Médio	Baixo	Pioneiro no uso de carvão vegetal como fonte de energia na produção de aço. Alto potencial de oferta
Redução Direta-Gás Natural	Médio-longo prazo	Médio	Médio	É esperado que a oferta de gás natural aumente e os preços caiam
Carvão Vegetal-Redução de Fusão	Longo prazo	Alto	Médio	Alto potencial de oferta
Redução Direta-Hidrogênio	Longo prazo	Alto	Alto	Eletricidade limpa competitiva e geração de hidrogênio
Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono	Longo prazo	Alto	Alto	-
Eletrificação Direta	Longo prazo	Alto	Alto	Geração de eletricidade limpa e competitiva
Inserções e Compensações de Emissões	Curto-longo prazo	Médio-alto	Baixo	Extensa área para plantação de floresta

Fonte: Adaptada de [8, 30, 41, 55].

Num horizonte de curto prazo, tecnologias maduras se sobressaem por terem ao mesmo tempo um potencial atrativo de uso e custos mais acessíveis. Sendo assim, as companhias brasileiras deveriam investir inicialmente em medidas de eficiência energética, aumentar o uso do FAE com sucata e o uso de carvão vegetal no AF-Aciaria a oxigênio. Melhorar a eficiência energética na rota de produção tradicional pode levar a uma redução de 20% nas emissões de GEE [3]. Devido ao seu baixo custo e potencial, a eficiência energética pode ser uma das opções fundamentais para reduzir as emissões do setor num curto prazo. [8]

Ainda existe um potencial para que tecnologias maduras continuem ajudando no processo de descarbonização no médio e longo prazo, assim a produção de aço com uso de carvão vegetal e FAE possuem um grande potencial que não se esgotará no curto prazo de tempo. [8]

O carvão vegetal é importante para o país, sendo responsável por quase 20% do mix de energia total do setor. Esta relevância torna o Brasil o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo [61]. No entanto, devido às restrições econômicas e técnicas já abordadas, o carvão vegetal não é uma opção para a completa substituição do carvão coque nas operações existentes. Além do mais, o Brasil precisa expandir suas plantações de florestas (permitindo também a remoção do carbono) e produzir carvão vegetal de modo sustentável, adotando tecnologias como uso dos gases, reuso de coprodutos, etc. [8]

A produção de sucata para aplicação no FAE pode ser muito benéfica para reduzir emissões a curto prazo, já que possuem uma intensidade de emissão mais baixa devido a um gasto energético menor. Além do mais, espera-se um aumento na taxa de coleta de sucata especialmente para usos finais e em regiões com baixos níveis de coletas atuais. Entretanto, o uso de sucata na produção de aço doméstica ainda é relativamente baixa em comparação a outros países. [8]

Uma outra tecnologia utilizada em muitos países e com alto poder de mitigação é a redução direta com gás natural. Esta pode ser uma enorme oportunidade para a siderurgia brasileira já que se espera uma redução de preço do GN do pré sal juntamente com aumento da oferta para a indústria. Esta tecnologia também pode ser usada como uma solução de transição para ajudar a reduzir o uso de combustíveis fósseis (carvão) quando as renováveis não são uma opção viável. O uso do hidrogênio na redução direta pode aumentar bastante o potencial de

mitigação graças à geração de eletricidade limpa do Brasil, entretanto os custos de produção com esta tecnologia devem baixar no país para que ela se torne competitiva com as alternativas fósseis. [8]

Tecnologias inovativas tais como a redução de fusão com carvão vegetal e outras biomassas, CAC e eletrólise, possuem um poder de mitigação grande. Porém, a incerteza com respeito aos seus papéis na rota de descarbonização brasileira nos próximos 30 anos é alta. As tecnologias de eletrólise ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento, já a CAC precisa superar seus altos custos antes de se tornar uma opção de mitigação viável. [8]

A compensação de emissões por meio de florestas plantadas também é uma grande oportunidade para a economia brasileira. [8]

Em resumo, a geração de eletricidade limpa, abundância de reservas de minério de ferro e biomassa, potencial para fornecimento de GN e de hidrogênio verde a baixo custo, colocam o Brasil em posição vantajosa. Como o mundo precisará de aço com emissões baixas em carbono, o Brasil pode desempenhar um importante papel no fornecimento de "aço verde" e "ferro verde" reduzido diretamente para suprir a demanda da China e outras nações que têm um setor do aço com uma alta intensidade de emissões, contribuindo assim para a descarbonização mundial. A Figura 22 mostra uma possível rota de descarbonização para a siderurgia brasileira, considerando o potencial identificado em pesquisas do passado bem como a antecipação de novas tecnologias. [8]

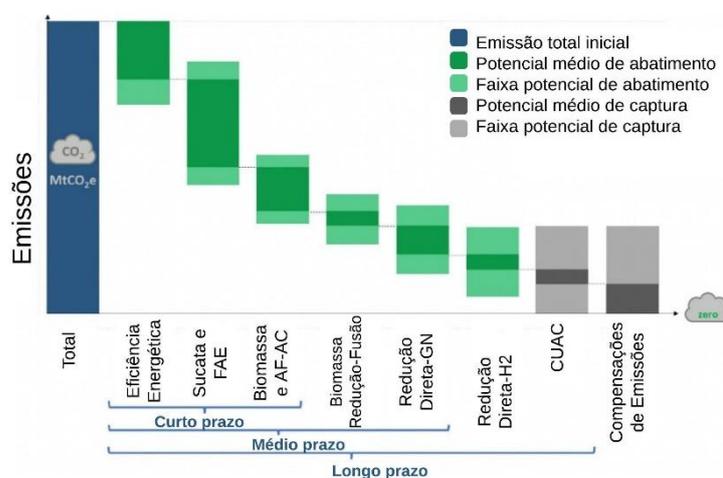


Figura 22 - Possível rota de descarbonização para a indústria de aço brasileira.

Fonte: Adaptada de [8].

Há ainda que se considerar os obstáculos existentes que podem atrasar a transição para uma produção mais limpa, tais como os altos custos das tecnologias. Neste caso, uma série de instrumentos financeiros e regulatórios podem ser aplicados para ajudar a diminuir os custos de tecnologias disruptivas, como por exemplo: incentivos financeiros, precificação do carbono, aumento de reciclagem, incentivar a demanda de mercado, incentivar pesquisa e desenvolvimento. A taxaço de carbono pode se um dos mecanismos mais efetivos para o alcance das metas de reduço e seu estabelecimento pode incentivar as companhias a acelerem seus programas de descarbonizaço em direço às tecnologias de baixas emissões. Também é necessário garantir que as condições para as diferentes companhias do setor sejam equalitárias evitando-se assim a fuga de carbono, já que a indústria de aço possui alta intensidade de emissões de GEE e um elevado grau de competitividade internacional. [8]

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora o termo "aço verde" ainda apareça pouco na literatura e apesar da falta de consenso quanto ao seu significado, pode se dizer que faz referência aos produtos siderúrgicos manufaturados via processos com emissões menores de GEE. Atualmente este tipo de aço ganha cada vez mais visibilidade devido à necessidade de descarbonização das siderúrgicas, grandes emissoras de carbono. Visando atender à demanda crescente por aço, mas ao mesmo tempo atingir as metas de redução, os países devem recorrer a tecnologias disruptivas, tais como redução direta do minério de ferro via hidrogênio, captura e armazenamento de carbono, etc. A redução direta feita por hidrogênio verde tem sido apontada com frequência como a tecnologia mais promissora na siderurgia, tendo sido aplicada em algumas plantas mundo afora para teste. Para a maioria dos países da UE, verificou-se que a substituição da rota convencional de produção pela rota de redução direta via hidrogênio é vantajosa, gerando grandes reduções de GEE. O consumo de energia para a produção de uma tonelada de aço líquido (tIs) através desta rota HDRI-EAF foi estimado em 3,72 MWh, o que é apenas levemente maior que os 3,48 MWh requeridos para a produção através da rota convencional. Porém, o emprego da produção de aço baseada em HDRI-EAF poderia aumentar as emissões da siderurgia em países com um fator de emissão de rede maior que 456 gCO₂/KWh.

Quanto ao Brasil, foram feitos investimentos na produção de aço com uso de carvão vegetal em substituição ao coque, de origem fóssil. No entanto, apesar da experiência nacional no uso de carvão vegetal, ele não é um substituto definitivo em virtude de inúmeras barreiras em seu processo de fabricação. Um possível caminho para descarbonização da siderurgia brasileira consiste em, num curto prazo, promover a eficiência energética, aumentar o uso do FAE com sucata e o uso de carvão vegetal no AF; já no médio prazo pode-se realizar a redução direta do minério de ferro com GN, visto que a produção do mesmo é esperada a aumentar e seus preços caírem em território nacional e, por fim, no longo prazo pode-se transicionar para a redução direta com hidrogênio, à medida que a produção de hidrogênio avança e os custos diminuem.

Por meio da redução direta via hidrogênio, o Brasil pode deixar sua condição de exportador de minério e passar a comercializar o briquetado a quente de ferro reduzido diretamente, aumentando seus ganhos.

O Brasil possui inúmeras vantagens que o colocam em posição privilegiada e que podem favorecer a descarbonização do setor de aço: abundância de minério de ferro de qualidade, disponibilidade de energias renováveis, biomassas (carvão vegetal, bagaço da cana, etc.), GN, perspectiva de produzir hidrogênio a um custo baixo no futuro, entre outros. Para tirar proveito desta condição, deve haver uma ação conjunta do Governo, das empresas e da sociedade civil em direção à criação de um mercado para os produtos de aço verde.

Por fim, muito embora algumas tecnologias se destaquem, não há uma pílula mágica para a descarbonização do setor de aço, sendo necessária a avaliação das realidades e peculiaridade regionais de cada nação.

REFERÊNCIAS

- [1] **Bíblia Sagrada**. 3ª ed. Distrito Federal: Edições CNBB, 2019. 1776 p.
- [2] LISIENKO, V. G. et al. Types of greenhouse gas emissions in the production of cast iron and steel. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 150, n. 1, set. 2016, 8 p. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/150/1/012023/pdf#:~:text=Ferrous%20metallurgy%20produces%20a%20lot,carbon%20dioxide%20in%20metallurgical%20units>. Acessado em: 30 jun. 2023.
- [3] Iron and Steel Technology Roadmap: towards more sustainable steelmaking. **Internacional Energy Agency**. 2020 a. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf. Acessado em: 13 jul. 2023.
- [4] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Fator médio-Inventários Corporativos**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acessado em: 13 jul. 2023.
- [5] BHASKAR, Abhinav; ASSADI, Mohsen; SOMEHSARAEI, Homam Nikpey. Decarbonization of the iron and steel industry with direct reduction of iron ore with green hydrogen. **MDPI Energies**, Norway, v. 13, n. 3, fev. 2020. 23 p. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/758>. Acessado em: 24 maio 2023.
- [6] DEVLIN, Alexandra et al. Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits. **Nature Communications**, Oxford, v. 14, n. 2578, maio 2023, 14 p. Disponível em: <https://www-nature.ez31.periodicos.capes.gov.br/articles/s41467-023-38123-2#citeas>. Acessado em: 03 jul. 2023.
- [7] World Steel in Figures. **Worldsteel Association**. 2021 b. Disponível em: <https://worldsteel.org/world-steel-in-figures-2021/>. Acessado em: 12 jul. 2023.
- [8] Scoping Paper on the Brazilian Steel Industry Decarbonization. **E + Energy Transition Institute**, RJ, set. 2022. 58 p. Disponível em: <https://emaisenergia.org/?s=decarbonization>. Acessado em 12 jul. 2023.
- [9] World Steel in Figures. **Worldsteel Association**. Jun. 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/world-steel-in-figures-2023-now-available/>. Acessado em: 12 jul. 2023.
- [10] SILVA, José Nazareno Santos. Siderurgia. Belém-PA. 2011, 110 p. Disponível em:

http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/siderurgia/161012_siderurgia.pdf. Acessado em: 7 ago. 2023.

[11] RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Conversores a Oxigênio. Editora ABM. 2006. 118 p.

[12] MUSLEMANI, Hasan et al. Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, n. 128127, set. 2021, 13 p. Disponível em: https://rnp-primo.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/vsvpiv/TN_cdi_gale_infotraccademiconefile_A672304832. Acessado em: 16 maio 2023.

[13] **Dicionário Técnico**. Disponível em: <https://www.dicionariotecnico.com/index.php?mob=0>. Acessado em: 28 jun. 2023

[14] Anuário Estatístico 2021a. **Instituto Aço Brasil**. RJ, jul. 2021. 88 p. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/07/Anuario_Completo_2021.pdf. Acessado em: 14 jul. 2023.

[15] BRAZIL STEEL INSTITUTE. 2021b. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/en/about-the-institute/>. Acessado em: 14 jul. 2023.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. Vale divulga intenção de investir na produção de HBI, pressionando o governo por queda dos preços do gás. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/vale-divulga-intencao-de-investir-na-producao-de-hbi-pressionando-o-governo-por-queda-dos-precos-do-gas/>. Acessado em: 14 jul. 2023.

[17] VALE. **Minério de Ferro e Pelotas**. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/mineracao>. Acessado em: 19 jul. 2023.

[18] CARVALHO, Bruno C. L. **Aproveitamento de Minérios de Ferro de Baixo Teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

[19] MME; GIZ; PROCOBRE. Quem é quem da eficiência energética no Brasil. 2019. 86 p. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/sef/document_0_5217708718995228.pdf. Acessado em: 19 jul. 2023.

[20] BNDES. **Quem Somos**. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/quem-somos>. Acessado em: 19 jul. 2023.

[21] PETROBRAS. **Petróleo Brasileiro S. A.** 2021. Disponível em: <https://petrobras.com.br/en/about-us/>. Acessado em: 19 jul. 2023.

- [22] ELETROBRAS. **About Eletrobras**. 2021. Disponível em: <https://eletrobras.com/en/Paginas/About-Eletobras.aspx>. Acessado em: 19 jul. 2023.
- [23] EPE. **Balanço Energético Nacional: Ano Base 2020**. RJ. 2021. 268 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acessado em: 19 jul. 2023.
- [24] IBÁ. **Dados Estatísticos**. Disponível em: <https://iba.org/dados-estatisticos>. Acessado em: 19 jul. 2023.
- [25] SINDIFER. **Anuário Estatístico: Ano Base 2022**. Disponível em: <http://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>. Acessado em: 19 jul. 2023.
- [26] BABICH, Alexander; SENK, Dieter. Coke in the Iron and Steel Industry. **Science Direct**. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081022016000133>. Acessado em: 21 jul.2023
- [27] BNDES. **Painel NDC: nossa contribuição para as metas de redução de emissões do Brasil**. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-evitadas>. Acessado em 21 jul. 2023.
- [28] PNUD. **Siderurgia Sustentável Estimula Economia de Baixo Carbono**. Disponível em: <https://www.undp.org/pt/brazil/news/siderurgia-sustent%C3%A1vel-estimula-economia-de-baixo-carbono>. Acessado em: 21 jul. 2023.
- [29] CNI. **Mudança do Clima e Indústria Brasileira: iniciativas e recomendações estratégicas implementação e financiamento da NDC do Brasil**. Disponível em: https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-externo/pt-br/images/Mudana_aa_doa_Climaa_ea_Industriaa_Brasileira.pdf. Acessado em: 21 jul. 2023.
- [30] ARCELORMITTAL. **Climate Action Report 2: July 2021**. Disponível em: https://corporate-media.arcelormittal.com/media/ob3lpdom/car_2.pdf. Acessado em: 21 jul. 2023.
- [31] GERDAU. **Relatório Anual Gerdau 2020**. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/wp-content/uploads/2022/07/RelatorioGerdau2020-1.pdf>. Acessado em: 21 jul. 2023.
- [32] TERNIUM. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. Disponível em: https://br.ternium.com/media/m4dnfrwm/reporte_de_sustentabilidad-1- revanderson-final.pdf. Acessado em: 21 jul. 2023.

[33] TERNIUM. **Ternium e Vale Assinam Memorando de Entendimento para Desenvolver Soluções de Descarbonização na produção de Aço**. Disponível em: <https://br.ternium.com/pt/novidades/noticias/ternium-e-vale-assinam-memorando-de-entendimento--01603222821>. Acessado em: 21 jul. 2023.

[34] VALE. **Relato Integrado 2020**. Disponível em: https://www.vale.com/documents/d/quest/vale_relato_integrado_2020. Acessado em: 21 jul. 2023.

[35] EPE. **Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados**.: segmento cadeia siderúrgica. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/Produto%205%20-%20Relatorio%20da%20cadeia%20sider%C3%BArgica.pdf>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[36] HASANBEIGI, A; SPRINGER, C. How Clean is The U.S. Steel Industry? **Global Efficiency Intelligence**. Nov. 2019. 42 p. Disponível em: <http://www.bluegreenalliance.org/wp-content/uploads/2021/04/HowCleanistheU.S.SteelIndustry.pdf>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[37] PINTO, R. G. D et al. CO₂ Emissions Mitigation Strategy in the Brazilian Iron and Steel Sector- From Structural to intensive Effects. **Energy Police**. V. 114. Mar. 2018. P. 380-393. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517307875?via%3Dihub>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[38] de SOUZA, J. F. T; PACCA, S.A. Carbon Reduction Potential and Costs Through Circular Bioeconomy in the Brazilian Steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**. V. 169. Jun. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921001245?via%3Dihub>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[39] CARVALHO, P. S. L. et al. Sustentabilidade da Siderurgia Brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial**. 2015. p.181-236. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4287/2/BS%2041%20Sustentabilidade%20da%20siderurgia%20brasileira_.pdf. Acessado em: 24 jul. 2023.

[40] DUTRA, Joísa; RODRIGUES, Mirella; LISBONA, Diogo. Distribuição de Gás Natural no Brasil: dados e aspectos regulatórios. **FGV-Centro de estudos em Regulação e Infraestrutura**. Jul. 2019. 28 p. Disponível em: https://ceri.fgv.br/sites/default/files/publicacoes/2019-07/Cartilha%20distribui%C3%A7%C3%A3o_formatada%2012072019.pdf. Acessado em: 24 jul. 2023.

[41] EUROFER. A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050. 2013.35 p. Disponível em: <https://www.eurofer.eu/assets/publications/archive/archive-of-older-eurofer-documents/2013-Roadmap.pdf>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[42] CLIMATE TRANSPERENCY. Brown to Green: the G20 transition to a low-carbon economy. 2018. 44 p. Disponível em: <https://germanwatch.org/sites/default/files/Brown%20to%20Green%20Report%202018%20web.pdf>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[43] MME. Programa Nacional do Hidrogênio. Brasília, DF. Jul. 2021. 24 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-aocnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[44] E+, Transição Energética. Desafios e Oportunidades para o Brasil com o Hidrogênio Verde. Maio 2021. 39 p. Disponível em: https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2021/05/Desafios_Oportunidades_Brasil_Hidrogenio_Verde.pdf. Acessado em: 24 jul. 2023.

[45] WRI. Aqueduct Water Risk Atlas. Disponível em: https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=w_awr_def_tot_cat&lat=30&lng=-80&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scenario=optimistic&scope=baseline&threshold&timeScale=annual&year=baseline&zoom=3. Acessado em: 24 jul. 2023.

[46] MCKINSEY & COMPANY. Hidrogênio Verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. Nov. 2021. 14 p. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[47] BloombergNEF. **New Energy Outlook**. 2021. Disponível em: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[48] BloombergNEF. BNEF 1H 2021 Hydrogen Levelized Cost Update. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/2h-2022-levelized-cost-of-electricity-update/>. Acessado em: 24 jul. 2023.

[49] MME, EPE, 2020. **Plano Nacional de Energia-2050**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acessado em: 26 jul. 2023.

[50] ROCHEDO, P. R. R. et al. Carbon Capture Potential and Costs in Brazil. **Journal of Cleaner Production**. V. 131. Set. 2016. P. 280-295. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616304887?via%3Dihub>.
Acessado em: 26 jul. 2023.

[51] TOKTAROVA, A. et al. Pathways for Low-Carbon Transition of the Steel Industry- A Swedish Case Study. **Energies**. Jul. 2020. Disponível em:
<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/15/3840>. Acessado em: 26 jul. 2023.

[52] IRENA. Reaching Zero with Renewables: Eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5 o C climate goal. **International Renewable Energy Agency**. Abu Dhabi. 2020. 216 p. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_Reaching_zero_2020.pdf.
Acessado em: 26 jul. 2023.

[53] GRIFFIN, P. W.; HAMMOND, G. P. Analysis of the Potential for Energy Demand and Carbon Emissions Reduction in the Iron and Steel Sector. **Energy Procedia**. V.158. Fev. 2019. p.3915-3922. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219308938?via%3Dihub>.
Acessado em: 26 jul. 2023.

[54] FBMC. Brasil Carbono Zero em 2060. 2018. 39 p. Disponível em:
http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/documentos/Relat%C3%B3rio_Brasil_CarbonoZero_2060_final_1.pdf. Acessado em: 26 jul. 2023.

[55] FAN, Z.; FRIEDMANN, S. J. Low-Carbon Production of Iron and Steel: Technology options, economic assessment, and policy. V. 5. abr. 2021. p. 829-862. Disponível em: [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(21\)00095-7?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435121000957%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(21)00095-7?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435121000957%3Fshowall%3Dtrue). Acessado em: 26 jul. 2023.

[56] de JONG, P. et al. Estimating the Impact of Climate Change on Wind and solar Energy in Brazil Using a South American Regional Climate Model. **Renewable Energy**. V. 141. Out. 2019. p. 390-401. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811930391X?via%3Dihub>.
Acessado em: 26 jul. 2023.

[57] CENTRO CLIMA. Preparação de Modelagem para Estimar os Impactos Socioeconômicos da Adoção de um Instrumento de Precificação de Carbono como parte do Pacote de Implementação da NDC Brasileira – Componente 2a (Modelagem) - Produto 4 - Resultados Finais. RJ. Mai. 2020. 258 p. Disponível em:
<https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-externo/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/pmr/componente-2/produto-4-resultados-e-analise.pdf/view>. Acessado em: 31 jul. 2023.

[58] SEEG, 2021. Emissões Totais. Disponível em:
https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acessado em: 31 jul. 2023.

[59] EPE, 2019. Balaço Energético Nacional 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>. Acessado em: 31 jul. 2023.

[60] MCTIC; ONU, Meio Ambiente 2017. Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferro-gusa e aço. Brasília. 2017. 166 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/clima/arquivos/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave/modelagem-setorial-de-opcoes-de-baixo-carbono-para-o-setor-de-ferro-gusa-e-aco.pdf>. Acessado em: 31 jul. 2023.

[61] IBÁ. **Carvão vegetal**. Disponível em: <https://www.iba.org/carvao-vegetal-2>. Acessado em: 01 ago. 2023.